

## **Sección 2**

# **Equipo Generico y Dispositivos**

# Capítulo 1

## Campanas, Ductos y Chimeneas

William M. Vatavuk

*Innovative Strategies and Economics Group, OAQPS*

Grupo de Economía y Estrategias Innovadoras, OAQPS

*U.S. Environmental Protection Agency*

Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU.

Research Triangle Park, NC

Septiembre de 1999

## Contenido

1.1	Introducción .....	1-3
1.2	Descripción del Equipo .....	1-4
1.2.1	Campanas .....	1-4
1.2.1.1	Tipos de Campanas .....	1-4
1.2.2	Sistema de Conductos .....	1-7
1.2.2.1	Componentes del Sistema de Conductos .....	1-9
1.2.3	Chimeneas .....	1-13
1.3	Procedimientos de Diseño .....	1-14
1.3.1	Fundamentos de Diseño .....	1-14
1.3.1.1	La Ecuación de Bernoulli .....	1-14
1.3.1.2	Presión: Estática, Velocidad y Total .....	1-19
1.3.1.3	Ajustes por Temperatura y Presión .....	1-22
1.3.2	Procedimiento de Diseño de la Campana .....	1-23
1.3.2.1	Factores de Diseño de la Campana .....	1-23
1.3.2.2	Procedimiento de Diseño del Tamaño de la Campana .....	1-28
1.3.3	Procedimiento de Diseño del Sistema de Conductos .....	1-30
1.3.3.1	Dos Enfoques de Diseño del Sistema de Conductos .....	1-30
1.3.3.2	Parámetros de Diseño del Sistema de Conductos .....	1-31
1.3.3.3	Caída de Presión en el Sistema de Conductos .....	1-33
1.3.4	Procedimientos de Diseño de Chimeneas .....	1-38
1.3.4.1	Calculando el Diámetro de la Chimenea .....	1-38
1.3.4.2	Calculando la Altura de la Chimenea .....	1-39
1.3.4.3	Calculando el Tiro de la Chimenea .....	1-40
1.4	Estimando la Inversión de Capital Total .....	1-42
1.4.1	Costos de Equipo .....	1-43
1.4.1.1	Costos de las Campanas .....	1-43
1.4.1.2	Costos del Sistema de Conductos .....	1-45
1.4.1.3	Costos de la Chimenea .....	1-50
1.4.2	Impuestos, Fletes y Costos de Instrumentación .....	1-53
1.4.3	Costo de Equipo Comprado .....	1-53
1.4.4	Costos de Instalación .....	1-53
1.5	Estimando el Costo Total Anual .....	1-54
1.5.1	Costos Directos Anuales .....	1-54
1.5.2	Costos Indirectos Anuales .....	1-55
1.5.3	Costo Total Anual .....	1-56
1.6	Reconocimientos .....	1-56
	Referencias .....	1-58

## 1.1 Introducción

La mayoría de los dispositivos de control están localizados a cierta distancia de las fuentes de emisión que ellos controlan. Esta separación puede ser necesaria por varias razones. Allí, puede no haber suficiente espacio para instalar el dispositivo de control cerca de la fuente. O, el dispositivo puede recolectar emisiones de varias fuentes localizadas por todas partes del establecimiento y, por tanto, debe ser emplazado en alguna ubicación equidistante conveniente. O, puede ser que las conexiones a los servicios requeridas para el dispositivo de control están disponibles solamente en algún sitio remoto. Sin importar la razón, la corriente del gas residual debe ser conducida desde la fuente hasta el dispositivo de control y de allí a la chimenea antes de que pueda ser liberada a la atmósfera.

Los tipos de equipo necesarios para conducir el gas residual, son los mismos para la mayoría de los tipos de dispositivos de control. Estos son: (1) campanas, (2) sistema de conductos, (3) chimenea, y (4) ventiladores (México: se llaman extractores, si se encuentran después de la fuente). Juntos, estas piezas comprenden un sistema de ventilación (México: sistema de extracción). Se utiliza una campana para capturar las emisiones en la fuente; el sistema de conductos, para conducirlos al dispositivo de control; una chimenea, para dispersarlas después que abandonan el dispositivo; y un ventilador, para proporcionar la energía para moverlas a través del sistema de control. Esta sección cubre los primeros tres tipos de equipo. Sin embargo, debido a que constituyen un tema tan amplio y complejo, los ventiladores serán tratados en otra sección de este Manual a ser desarrollado en el futuro. También, los tipos de chimeneas cubiertas son las chimeneas cortas (100-120 pies de alto o menos). Típicamente, éstas están incluidas en sistemas de control en paquete o agregadas a ellos. Las llamadas *tall stacks* (chimeneas altas) utilizadas en plantas generadoras de energía eléctrica u otras fuentes donde los gases de escape deben ser dispersados sobre grandes distancias, no serán discutidas en esta sección.

Esta sección presenta toda la información que uno podría necesitar para desarrollar estimaciones de costo de estudio ( $\pm 30\%$  exactas), para campanas, sistemas de conductos y chimeneas. En consecuencia, las siguientes secciones incluyen: (1) descripciones de los tipos de equipo utilizados en sistemas de ventilación de control de la contaminación del aire, (2) procedimientos para diseñar el tamaño (diseño) de este equipo, y (3) metodologías y datos para estimar sus costos de capital y anual. También, dispersos por todo el capítulo están varias ilustraciones (problemas de ejemplo), que muestran al lector como aplicar las varias metodologías de diseño de tamaño y estimación de costos.

## 1.2 Descripción del Equipo

En esta sección, los tipos de campanas, sistemas de conductos y chimeneas utilizadas en sistemas de control de la contaminación del aire, se describen, cada uno en una subsección separada. Estas descripciones se han basado en información obtenida de referencias, artículos de revistas y proveedores de equipo de ventilación estándar y de control de la contaminación del aire.

### 1.2.1 Campanas

De los varios componentes de un sistema de control de la contaminación del aire, el dispositivo de captura es el más importante. Esto debe ser autoevidente, porque si las emisiones no son capturadas eficientemente en la fuente, no pueden ser conducidas a, y removidas por un dispositivo de control. Hay dos categorías generales de dispositivos de control: (1) *direct exhaust connections - DEC* (conexiones de escape directas) y (2) campanas. Como el nombre lo implica, una *DEC* es una sección de conducto (típicamente un codo), dentro del cual fluyen directamente las emisiones. Estas conexiones son utilizadas con frecuencia cuando la fuente de emisión es en sí misma un conducto o un desfogue, tal como un desfogue en una planta de manufactura química o una refinería de petróleo (Véase la siguiente discusión “Sistema de Conductos”).

Las campanas comprenden una categoría mucho más amplia que las *DECs*. Son utilizadas para capturar particulados (se refiere a partículas diminutas separadas), gases y/o rocíos emitidos desde una variedad de fuentes, tales como los hornos básicos de oxígeno para fabricación de acero, operaciones de soldadura y tanques de electrodeposición. Los procesos encampanados son generalmente categorizados ya sea como “calientes” o “fríos”, una delineación que, a su vez, influye la selección, colocación y diseño de la campana.

Las condiciones de la fuente también influyen los materiales con que se fabrica la campana. El material de elección para estas aplicaciones es el acero templado (al carbón), donde la corriente de emisión es no corrosiva y de temperatura moderada. Sin embargo, donde están presentes sustancias corrosivas (v.g., gases ácidos), en altas concentraciones, se necesita acero inoxidable o plásticos (v.g., plástico reforzado con fibra de vidrio o *FRP*). A medida que la mayoría de las campanas se diseñan y construyen a pedido del cliente, el proveedor involucrado determinaría que material sería óptimo para una aplicación dada.

#### 1.2.1.1 Tipos de Campanas

Aunque los nombres de ciertas campanas varían, dependiendo de cual fuente se consulte, hay acuerdo general en como se clasifican. Hay cuatro tipos de campanas: (1) envoltura, (2) cabinas, (3) campanas de captura, y (4) campanas receptoras.[1,2]

Las envolturas son de dos tipos: (1) aquellas que están completamente cerradas al ambiente exterior y (2) aquellas que tienen aberturas para la entrada/salida de material. El primer tipo es utilizado solamente cuando se maneja material radioactivo, el cual debe manejarse con manipuladores remotos. También son herméticas al polvo y gas. Estos tipos de envolturas raramente son utilizadas en control de la contaminación del aire.

El segundo tipo, de envoltura total, tienen aplicaciones en varias áreas, tales como en el control de emisiones de hornos de arco eléctrico y de operaciones de estampado y de llenado de recipientes de carga. Están equipadas con pequeñas aberturas en la pared que se llaman *natural draft openings - NDO* (aberturas de tiro natural), que permiten que el material sea movido hacia adentro o afuera y para ventilación. Sin embargo, el área para estas aberturas debe ser pequeña comparada con el área total de las paredes de la envoltura (típicamente 5% o menos).

Otra aplicación de las envolturas totales es en la medición de la eficiencia de captura de dispositivos de captura de compuestos orgánicos volátiles (COV). La eficiencia de captura es la fracción de todos los COVs generados en, y liberados por, un establecimiento afectado, que son dirigidos al dispositivo de control. En esta aplicación, una envoltura total es una estructura temporal que rodea completamente un proceso emisor, de modo que todas las emisiones de COV son capturadas para descargarse a través de conductos o chimeneas. El flujo de aire a través de la envoltura total debe ser suficientemente alto para mantener la concentración de la mezcla de COV en la envoltura, tanto dentro de los límites de salud requeridos por la *Occupational Safety and Health Administration - OSHA* (Administración de Seguridad y Salud Ocupacionales) y como de los límites de explosividad del vapor. (Estos últimos son fijados típicamente a 25% del *lower explosive limit - LEL* (límite inferior de explosividad) para la mezcla de COV en cuestión.) Además, la velocidad superficial total del aire fluyendo a través de la envoltura debe ser al menos de 200 ft/min.[3]

Las superficies de las envolturas totales temporales son construidas usualmente ya sea de película de plástico o de materiales rígidos tales como las hojas de aislante o de *plywood* (madera en hojas prensadas). La película de plástico ofrece las ventajas de que es ligera, transparente, barata y fácil de trabajar con ella. Sin embargo, es endeble, inflamable y tiene un punto de fusión relativamente bajo. Además, el plástico debe colgarse en un marco de madera, de tubos de plástico o de un andamio.

Aunque los materiales rígidos son más caros y menos trabajables que el plástico, son más durables y pueden soportar diferenciales de presión mayores entre el interior y el exterior de la envoltura. Las especificaciones de diseño de la envoltura total (las cuales han sido incorporadas en varias normas de emisión de *EPA*), están contenidas en el informe de *EPA, The Measurement Solution: Using a Temporary Total Enclosure for Capture Testing* (La Solución a las Mediciones: Utilizando una Envoltura Total Temporal para Pruebas de Captura). [4]

Las cabinas son como las envolturas, que rodean a la fuente de emisión, excepto una pared (o porción de ésta), que se omite para permitir el acceso a operadores y a equipo. Como las envolturas, las cabinas deben ser lo suficientemente grande para prevenir que los particulados incidan sobre las paredes interiores. Son utilizadas con operaciones (y fuentes de emisión), tales como rociado de pintura y esmerilado portátil, pulido y operaciones de abrillantado.

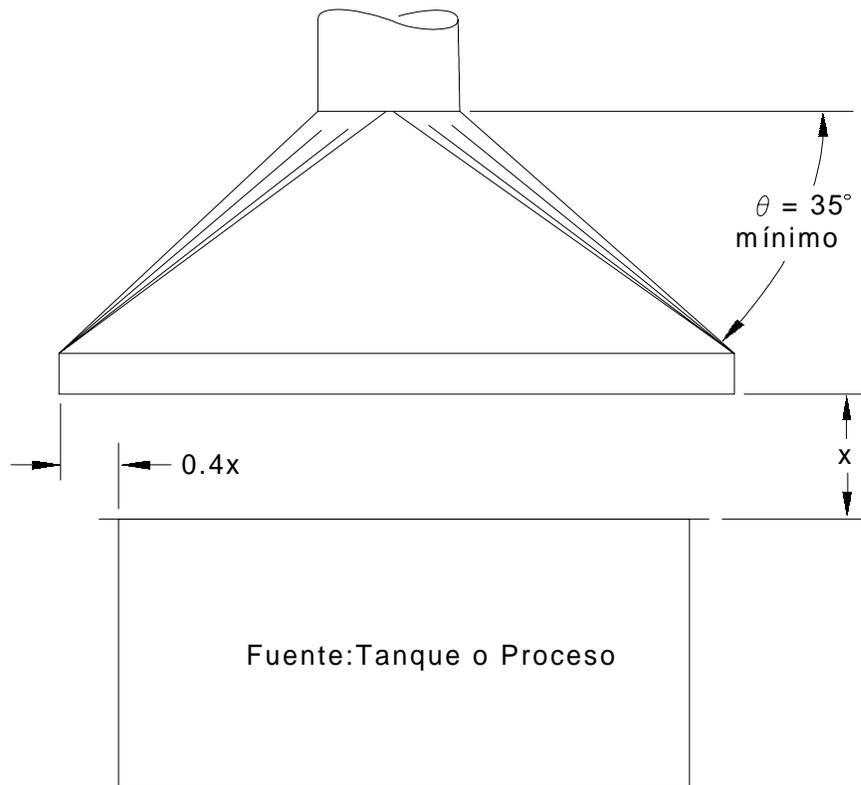
Contrario a las envolturas y cabinas, las campanas de captura (también llamadas *campanas activas* o *externas*), no encierran a la fuente del todo. Consistentes de uno a tres lados, se localizan a una distancia de la fuente y succionan a las emisiones hacia ellas vía ventiladores. Las campanas de captura se clasifican también como *side-draft/backdraft* (de tiro lateral/tiro posterior), *slot* (de ranura), *downdraft* (de tiro hacia abajo) y *high-velocity, low-volume (HVLV) hoods* (campanas de alta velocidad, bajo volumen). Una campana de tiro lateral/tiro posterior se localiza típicamente a un lado/detrás de la fuente de emisión, pero tan cerca a ella como sea posible, ya que las velocidades del aire disminuyen inversamente (y abruptamente) con la distancia. Ejemplos de estas incluyen las *snorkel-type welding hoods* (campanas para soldadura tipo tubo de respiración) y las *side shake-out hoods* (campanas de lado sacudido).

Una campana de ranura opera en una manera similar a las de tiro lateral/tiro posterior. Sin embargo, la abertura de entrada (cara) es mucho más pequeña, siendo larga y angosta. Mas aún, una campana de ranura se sitúa en la periferia de una fuente de emisión, tal como un tanque abierto, angosto. Este tipo de campanas se emplean también con operaciones de soldadura de banco.

Mientras que las campanas de ranura y de tiro lateral/tiro posterior se localizan al lado/detrás de una fuente, las campanas de tiro hacia abajo se sitúan en seguida por debajo de ella. Succiona al aire cargado de contaminantes hacia abajo a través de la fuente y, por lo tanto, hacia el dispositivo de control. Las aplicaciones de campanas de tiro hacia abajo incluyen operaciones de *foundry shake-out* (fundición con sacudida) y soldadura de banco y corte con soplete.

Las campanas *HVLV* se caracterizan por el uso de velocidades extremadamente altas (velocidades de captura), para recolectar los contaminantes en la fuente y por la distribución óptima de esas velocidades a través de la cara de la campana. Para mantener una razón de flujo volumétrico baja, estas campanas se localizan tan cerca de la fuente como sea posible, para minimizar el arrastre de aire.

La última categoría son las campanas receptoras (también llamadas campanas pasivas o de toldo). Una campana receptora se localiza típicamente arriba o al lado de una fuente, para recolectar las emisiones, a las cuales se les da impulso por la fuente. Por ejemplo, una campana de toldo podría situarse directamente arriba de un tanque abierto conteniendo un líquido caliente (una fuente boyante). Con el aire arrastrado, los vapores emitidos desde el líquido se elevarían hacia la campana. Aquí, la campana de toldo funciona como un colector pasivo, ya que los gases que se elevan serían succionados hacia la campana vía tiro natural. (Véase la Figura 1.1.)



**Figura 1.1:** Instalación Típica de Campana de Toldo

Las campanas receptoras son utilizadas también con fuentes no boyantes, fuentes desde las cuales las emisiones no se elevan. Sin embargo, las emisiones pueden ser “lanzadas” desde un proceso, tal como un esmeril giratorio. La velocidad inicial de las emisiones típicamente es suficientemente alta para conducir las hacia la campana receptora. [5]

### 1.2.2 Sistema de Conductos

Una vez que la emisión es capturada ya sea por la campana o por una conexión de escape directa, es conducida al dispositivo de control vía un sistema de conductos. Los términos “sistema de conductos” denotan todo el equipo entre el dispositivo de captura y el dispositivo de control. Esto incluye: (1) conductos rectos; (2) accesorios, tales como codos y «Tes»; (3) dispositivos de control de flujo (v.g., compuertas); y (4) soportes de los conductos. Estos componentes se describen en la Sección 1.2.2.1.

En sistemas de control de la contaminación del aire, el ventilador usualmente se localiza inmediatamente antes o después del dispositivo de control. Consecuentemente, la mayor parte

del sistema de conductos está bajo presión estática negativa, variando desde unas pocas de pulgadas hasta aproximadamente 20 pulgadas de columna de agua. Estas condiciones de presión dictan el tipo de conducto utilizado, así como parámetros de diseño tales como el espesor de pared (calibre). Por ejemplo, en aplicaciones a vacío se prefiere conducto soldado a *spiral-wound duct* (conducto ensamblado en espiral). [6]

El sistema de conductos se fabrica ya sea de metal o de plástico, siendo dictada la selección del material por las características de la corriente de gas residual, consideraciones estructurales, costos de compra e instalación, estética y otros factores. Los metales utilizados incluyen al acero al carbón (sin protección o galvanizado), acero inoxidable y aluminio. Los plásticos más comúnmente utilizados son *polyvinyl chloride - PVC* (cloruro de polivinilo) y *fiberglass-reinforced plastic - FRP* (plástico reforzado con fibra de vidrio), aunque el polipropileno (PP) y el *linear polyethylene - LPE* (polietileno lineal), también se han aplicado. Sin embargo, un inconveniente serio del PP y del LPE, es que ambos son *combustibles*. [7]

Los sistemas de conductos de PVC y de otros plásticos, son resistentes a una variedad de sustancias corrosivas, desde agua regia hasta ácido sulfúrico al 95%. Pero los sistemas de conductos de plástico no pueden tolerar temperaturas ambientales arriba de 150°F.[8] Los sistemas de conductos de metal pueden manejar temperaturas hasta de aproximadamente 1000°F, pero solamente ciertas aleaciones pueden tolerar corrientes corrosivas.

En términos de construcción, los sistemas de conductos pueden ser ya sea rígidos o flexibles. Como el nombre lo implica, los sistemas de conductos rígidos, sean de metal o de plástico, tiene una forma fija. Contrariamente, los sistemas de conductos flexibles pueden doblarse para tomar en cuenta situaciones donde el espacio es limitado o donde su disposición es tan intrincada que los accesorios rígidos no pueden cumplir con los requerimientos de construcción. Usualmente, de sección transversal de forma circular, los conductos flexibles pueden ser fabricados de metales o de plásticos y pueden ser aislados o no aislados.

El sistema de conductos rígido se fabrica de sección transversal de formas circular, ovalada o cuadrada/rectangular. De estas, los conductos circulares son los más comúnmente utilizados en sistemas de control de la contaminación del aire. Aunque el conducto cuadrado/rectangular es ventajoso de usar cuando el espacio es limitado, el conducto redondo ofrece varias ventajas. Resiste el colapso, proporciona mejores condiciones de transporte y utiliza menos metal que las formas cuadradas/rectangulares u ovaladas planas de área de sección transversal equivalentes. [9] A menos que se indique de otro modo, la siguiente discusión estará relacionada a conductos rígidos, circulares, puesto que este es el tipo más comúnmente utilizado en el control de la contaminación del aire.

El conducto circular rígido de metal se clasifica aún más de acuerdo a su método de fabricación. El conducto de costura longitudinal se hace doblando una hoja de metal en forma circular sobre un mandrel (eje), y soldando juntos los dos extremos. El conducto de costura en

espiral se construye de una tira larga de hoja de metal, cuyos bordes son unidos por un cordón helicoidal intertrabable que corre a lo largo del conducto. Este cordón está ya sea levantado o a ras de la superficie de la pared del conducto.

El método de fabricación y la forma de la sección transversal no son las únicas consideraciones al diseñar el sistema de conductos, sin embargo. Uno debe también especificar el diámetro, el espesor de pared, tipo, número y localización de los accesorios, controles y soportes, y otros parámetros. Consecuentemente, la mayoría de los componentes del sistema de conductos se diseñan y fabrican sobre pedido, de modo que abastezca óptimamente al dispositivo de control. Algunos proveedores ofrecen componentes prefabricados, pero estos son usualmente accesorios comunes (v.g., codos de 90°), que están disponibles solamente en tamaños nominales (v.g., 3 a 12 pulgadas de diámetro). [10,11]

Si cualquiera, la temperatura o el contenido de humedad de la corriente de gas, es excesiva, el sistema de conductos necesita estar aislado. El aislante inhibe la pérdida/ganancia de calor, ahorrando energía (y dinero), por un lado, y previene condensación, por el otro. El aislante protege también al personal que pudiera tocar el sistema de los conductos, de sufrir quemaduras. Hay dos formas de aislar un conducto. La primera es instalar el aislante sobre la superficie exterior del sistema de conductos y cubrirla con una barrera de vapor de película de plástico o de metal. El tipo y espesor del aislante utilizado dependerá de varios parámetros relacionados con la transferencia de calor. Por ejemplo, un proveedor afirma que 4 pulgadas de aislante de lana mineral son adecuadas para mantener una temperatura en la superficie (“piel”) de 140°F (el límite de *OSHA* en el centro de trabajo), o menor, siempre que la temperatura del gas de escape no exceda de 600°F. [12]

La segunda forma de aislar un sistema de conductos es usando un conducto y accesorios aislados, de pared doble. El sistema de conductos de pared doble sirve para reducir ambos, el calor y el ruido. Un proveedor lo construye de una coraza de presión exterior de hoja de metal sólida y un recubrimiento interior de hoja de metal, con aislante de fibra de vidrio como emparedado en medio de ellas. La capa de aislante es típicamente de 1 pulgada, aunque están disponibles espesores de 2 y 3 pulgadas para aplicaciones más extremas. Las conductividades térmicas de estos espesores son 0.27, 0.13, y 0.09 *Btu/hr-ft<sup>2</sup>-°F*, respectivamente. [13]

#### 1.2.2.1 Componentes del Sistema de Conductos

Tal como se discutió anteriormente, un sistema de conductos consiste de conductos rectos, accesorios, dispositivos de control de flujo y soportes. El conducto recto se explica por si mismo y es fácil de visualizar. La categoría “accesorios”, sin embargo, abarca un rango de componentes que realizan una o más de las siguientes funciones: cambia la dirección de la corriente de gas conducida, modifica la velocidad de la corriente, empata a otro(s) conducto(s), facilita la conexión de dos o más componentes o permite la expansión/contracción cuando surgen los esfuerzos térmicos.

Los accesorios más comúnmente utilizadas son los codos (“eles”). Estos sirven para cambiar la dirección de la corriente de gas, típicamente en 30°, 45°, 60°, o 90°, aunque igual pueden diseñarse para otros ángulos. El radio a la línea central del codo determina la razón a la que ocurre este cambio direccional (Véase la Figura 2.2). El *standard centerline radius*,  $R_{cl}$ , (radio a la línea central estándar) es 1.5 x el diámetro de la sección transversal del codo ( $D_c$ ). Sin embargo, en codos de “radios largos”, en los cuales el cambio direccional es más gradual que en los codos estándares,  $R_{cl} = \geq 2D_c$ . [14]

Las Tes son utilizadas cuando dos o más corrientes de gas deben conectarse. En las Tes rectas, las corrientes convergen con un ángulo de 90°, mientras que en las tes angulares (“laterales”, “yes”), la conexión es hecha a 30°, 45°, 60°, o a algún otro ángulo. (Véase la Figura 1.2.). Las tes pueden tener una “tapa” (conexión) o dos, y puede tener ya sea una sección transversal recta o “cónica” ya sea en uno o los dos extremos. Las cruces también son utilizadas para conectar ramales de conductos. Aquí, dos ramales se intersectan uno con otro en ángulo recto.

Los reductores (comúnmente llamados “expansiones” o “contracciones”), se requieren siempre que deban unirse conductos de diferentes diámetros. Los reductores son de diseño ya sea concéntricos o excéntricos. En los reductores concéntricos, el diámetro se estrecha gradualmente desde la sección transversal mayor a la más pequeña. Sin embargo, en los reductores excéntricos, el diámetro disminuye completamente en un lado de la conexión.

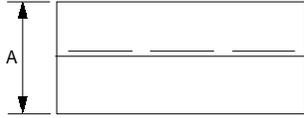
Para controlar la razón de flujo volumétrico a través de sistemas de ventilación, se utilizan compuertas. Las compuertas son usualmente delineadas de acuerdo al mecanismo de control del flujo (de una sola cuchilla o de múltiples cuchillas), clasificación de presión (baja/ligera o alta/pesada), y medios de control (manual o automático). En las compuertas de una sola cuchilla, un plato circular es sujetado a una varilla, uno de cuyos extremos sobresale hacia afuera del conducto. En los tipos más comúnmente utilizados de compuertas de una sola cuchilla, (tipo mariposa), esta varilla es utilizada para controlar el flujo de gas, rotando el plato en la compuerta. Totalmente cerrada, la cara de la compuerta se asienta perpendicular a la dirección del flujo de gas; totalmente abierta, la cara es paralela a las líneas de flujo de gas. Varias compuertas de “control” de una sola cuchilla se representan en la Figura 1.2.

Con las compuertas de guillotina, un segundo tipo, el flujo es controlado deslizando la cuchilla de la compuerta hacia adentro o hacia afuera del conducto. Las guillotinas son a veces utilizadas para controlar el flujo de corrientes de aire conteniendo sólidos suspendidos, tal como en los transportadores neumáticos. A este respecto, las compuertas de mariposa y las de guillotina son análogas, respectivamente, a las válvulas de globo y de compuerta de abertura rápida, que son utilizadas para regular el flujo de líquidos en tuberías.

Las compuertas de múltiples cuchillas (de persiana), operan por medio del mismo principio. Sin embargo, en lugar de utilizar una sola cuchilla o plato para controlar el flujo de gas, las compuertas de múltiples cuchillas emplean tablillas que abren y cierran como persianas venecianas. [15] Las

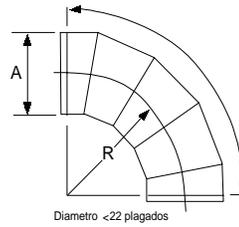
## CONDUCTO DE COSTURA LONGITUDINAL

(costura longitudinal totalmente soldada)



**DIMENSIONES:**  
8-plagado mínimo  
90-plagado máximo

## CODO ARMADO

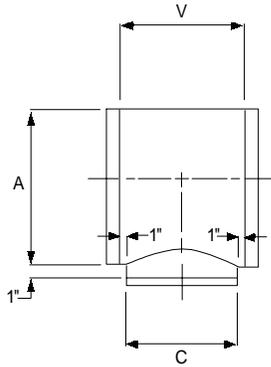


**DIMENSIONES:**  
 $R = 1.5A$

Donde:

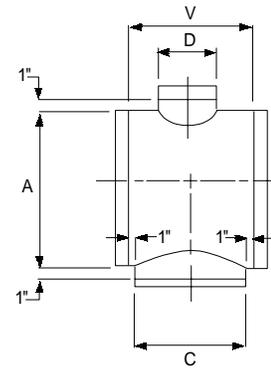
	Numero de secciones
0 - 35	2
36 - 71	3
72 - 90	5

## TE RECTA



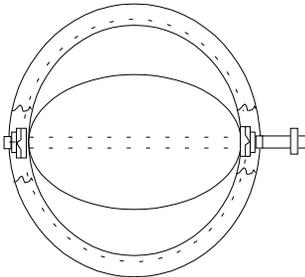
**DIMENSIONES:**  
 $V = C + 2$   
máximo  $C = A$

## CRUZ RECTA DE 90°



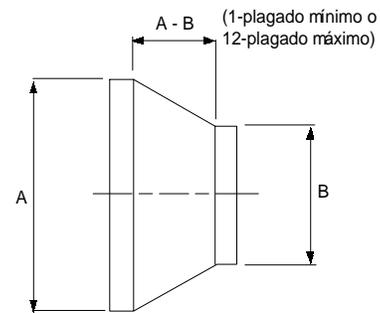
**DIMENSIONES:**  
 $V = C + 2$   
máximo  $C$  o  $D = A$

## Compuertas

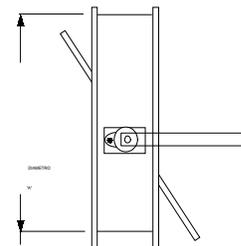


Vista Fronta

## REDUCTOR CONCÉNTRICO

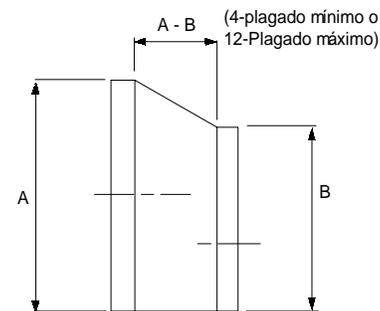


(1-plagado mínimo o  
12-plagado máximo)



Vista Lateral

## REDUCTOR EXCÉNTRICO



(4-plagado mínimo o  
12-Plagado máximo)

compuertas de persiana son típicamente utilizadas en conductos muy grandes donde una compuerta de cuchilla de una sola pieza sería muy difícil de mover.

Las compuertas controladas manualmente simplemente tienen una manivela unida a la varilla de control, la cual es utilizada para ajustar el flujo de gas a mano. Si se necesita control automático, se utiliza un actuador neumático o electrónico. El actuador recibe una señal neumática (aire presurizado) o eléctrica desde un regulador y la convierte a energía mecánica, la cual es utilizada a la vez, para abrir/cerrar la compuerta vía la varilla de la compuerta. A este respecto, una compuerta actuada es análoga a una válvula de control automática. [16] Por ejemplo, una compuerta automática puede utilizarse para controlar la razón de flujo de aire de dilución a la cámara de combustión de un incinerador. Esta razón de flujo, a la vez, dependería de la concentración de combustibles (v.g., porcentaje del límite inferior de explosividad - %LEL), en la corriente de gas residual de entrada. Si esta concentración se desvía de una cantidad predeterminada (“*set-point*”; “punto fijo”), se envía una señal desde el dispositivo de medición vía el regulador, hasta la compuerta automática, para aumentar/disminuir la razón de flujo de aire de dilución a modo de mantener el %LEL deseado.

Se instalan juntas de expansión, especialmente en tramos largos de conductos metálicos para permitir al sistema de conductos expandirse o contraerse en respuesta a esfuerzos térmicos. Estas conexiones son de varios diseños. Un tipo, la junta de expansión de fuelles, consiste de una pieza de metal flexible (v.g., acero inoxidable 304), que se solda a cada uno de los extremos de dos conductos, conectándolos. A medida que la temperatura del conducto aumenta, los fuelles se comprimen; a medida que la temperatura disminuye, los fuelles se expanden.

Otra junta de expansión comúnmente utilizada consiste de dos bridas entre las cuales se instala una sección de tela. Como la junta de expansión de fuelles, se comprime a medida que la temperatura del conducto aumenta, y viceversa. La temperatura dicta el tipo de tela utilizada. Por ejemplo, se puede utilizar tela de fibra aramid y de fibra de vidrio con silicón para temperaturas de conducto hasta de 500°F., mientras que se necesita tela recubierta con fibra de vidrio para tener en cuenta temperaturas de 1000°F.[17]

El último componente considerado es el sistema de soporte del sistema de conductos. Sin embargo, está lejos de ser el menos importante. Como establece el manual *HVAC Duct Construction Standards* (Normas de Construcción de Conductos de Aire Acondicionado para Calefacción y Ventilación) de la *Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association - SMACNA* (Asociación Nacional de Contratistas de Hojas de Metal y Aire Acondicionado), “La selección de un sistema de soporte no debe tomarse a la ligera, puesto que implica no solo una porción importante del trabajo de construcción, pero también porque (la construcción de) un sistema inadecuado de soporte puede ser desastroso”. Como regla, debe proporcionarse un soporte por cada 8 a 10 pies de tramo de conducto. [18] El sistema de conductos puede suspenderse del cielo o de otras estructuras elevadas por medio de perchas o soportadas desde abajo por vigas, pilares u otros soportes.

Un arreglo de suspensión consiste típicamente de un accesorio superior, un colgante y un accesorio inferior. El accesorio superior une el colgante al cielo, etc. Este puede ser un inserto de concreto, un perno o un sujetador tal como un remache o un clavo. El colgante es generalmente un tirante de acero galvanizado, una varilla redonda de acero o un alambre que es anclado al cielo por el accesorio superior. El tipo de colgante utilizado será dictado por el diámetro del conducto, el cual es proporcional a su peso por pie lineal. Por ejemplo, los colgantes de alambre son recomendadas solamente para conductos de diámetro hasta de 10 pulgadas. Para diámetros mayores (hasta de 36 pulgadas), deben utilizarse tirantes o varillas. Típicamente, se tira un colgante de tirante desde el accesorio superior, se ciñe alrededor del conducto y se asegura por un sujetador (el accesorio inferior). Un colgante de varilla también se extiende hacia abajo desde el cielo. A diferencia de los tirantes, se sujetan al conducto vía una banda o bandas que se ciñen alrededor de la circunferencia. Los conductos de diámetro mayores a 3 pies, deben soportarse con dos colgantes, uno a cada lado del conducto, y asegurarse a dos bandas circundantes, una en la parte de arriba y otra en la de abajo del conducto. [19] Aun más, los soportes para sistemas grandes de conductos, deben permitir ambas, la expansión axial y longitudinal y la contracción, para tomar en cuenta los esfuerzos térmicos.[20]

### 1.2.3 Chimeneas

Las chimeneas cortas se instalan después de los dispositivos de control para dispersar los gases de escape por arriba del nivel del suelo y de los edificios circundantes. Al contrario de las chimeneas “altas”, las cuales pueden ser hasta de 1,000 pies de alto, las chimeneas cortas típicamente no son mayores a 120 pies.

Ciertos dispositivos de control en paquete vienen equipados con chimeneas cortas (“*stub*”; “colilla”), con alturas que van desde 30 hasta 50 pies. Pero si tal chimenea no es proporcionada ni adecuada, el establecimiento debe construir una chimenea separada para servir a dos o más dispositivos. Esencialmente, esta chimenea es un conducto vertical construido sobre un cimiento y soportado de alguna manera. Para estabilidad estructural, el diámetro del fondo de la chimenea es ligeramente más grande que el diámetro de la parte superior, el cual típicamente varía de 1 a 7 pies. [21]

Una chimenea corta puede ser fabricada de acero, ladrillo o plástico (v.g., plástico reforzado con fibra de vidrio o *FRP*). Una chimenea puede estar forrada o no forrada. La selección del material depende de las propiedades físicas y químicas de la corriente de gas, tales como corrosividad y acidés, así como la diferencial de temperatura entre la corriente de gas y el aire ambiente. Forros de acero inoxidable, ladrillo o *FRP*, son por lo general utilizados para proteger la chimenea contra daños por la corriente de gas. Son más fáciles y más baratos de reponer que la chimenea entera. Alternativamente, el interior de una chimenea no forrada, puede ser cubierta con zinc (galvanizado), aluminio u otro material resistente a la corrosión, pero una capa protectora no proporciona la misma protección que un forro y no dura tanto tiempo.

Las chimeneas cortas son ya sea autoestables (que se sostienen por sí mismas), soportadas por cables o sujetas a estructuras adyacentes. El tipo de soporte utilizado depende del diámetro de la chimenea, altura y peso, la carga del viento, las características sísmicas de la zona y otros factores.

El equipo auxiliar para una chimenea típica incluye una puerta de acceso, una plataforma de muestreo, escaleras, sistema pararrayos y luces de advertencia para las aeronaves. La puerta de acceso permite remoción de cualquier materiales acumulados en el fondo de la chimenea y permite acceso al forro para reparación o reposición. Las regulaciones locales y estatales de control de la contaminación del aire pueden también requerir el sistema permanente de plataformas de muestreo para utilizarse durante las pruebas periódicas de cumplimiento; mientras que las escaleras son utilizadas durante ambos, el muestreo de la chimenea y los procedimientos de mantenimiento. El sistema pararrayos se necesita para prevenir daño a la chimenea y a sus alrededores inmediato durante tormentas eléctricas. Por último, las luces de advertencia para las aeronaves son requeridas por las autoridades de aviación locales.[23] Todos juntos, estos auxiliares pueden añadir una gran cantidad al costo base de la chimenea.

### **1.3 Procedimientos de Diseño**

Tal como se indicó anteriormente, una campana, el sistema de conductos y una chimenea son los elementos clave en cualquier sistema de control de la contaminación del aire. Debido a que cada uno de estos elementos es diferente, tanto en apariencia como en función, cada uno debe ser diseñado separadamente. Pero al mismo tiempo, estos elementos comprenden un *sistema*, el cual está gobernado por ciertas leyes físicas que sirven para unir estos elementos en una “causa común”. Así, antes de los procedimientos individuales de diseño para campanas, sistemas de conductos y chimeneas sean descritos, se presentarán los fundamentos de ventilación. Estos fundamentos cubrirán conceptos básicos de flujo de fluidos y como pueden ser aplicados a sistemas de ventilación de control de la contaminación del aire. No obstante, estos conceptos serán presentados tan claramente como sea posible, con el objetivo de hacer a los parámetros de diseño fáciles de entender y computar.

#### **1.3.1 Fundamentos de Diseño**

##### **1.3.1.1 La Ecuación de Bernoulli**

El flujo de fluidos en cualquier campana, conducto, tubo, chimenea u otra envolvente está gobernada por una relación simple, la familiar ecuación de Bernoulli. Puesto simple e idealmente, la ecuación de Bernoulli establece que la energía mecánica total de un elemento de un fluido fluyendo es constante a través del sistema. Esto incluye a su energía potencial, energía cinética y energía de presión. Sin embargo, como ningún sistema es ideal, la ecuación de Bernoulli debe ser ajustada para tomar en cuenta las pérdidas a los alrededores debido a la fricción. Las ganancias

debidas a la energía agregada por ventiladores, bombas, etc., también debe tomarse en cuenta. Para una libra masa ( $lb_m$ ) de fluido fluyendo en un sistema en estado estable, la ecuación de Bernoulli ajustada es: [24]

$$\int_1^2 v dp + \Delta z \left( \frac{g}{g_c} \right) + \frac{\Delta(u^2)}{2g_c} = W - F \quad (1.1)$$

donde

$v$	=	volumen específico de fluido ( $ft^3/lbm$ )
$p$	=	presión estática—manométrica ( $lb_f/ft^2$ )
$z$	=	altura del fluido por encima de algún punto de referencia ( $ft$ )
$u$	=	velocidad del fluido a través del conducto, campana, etc. ( $ft/sec$ )
$g$	=	aceleración gravitacional ( $ft/sec^2$ )
$g_c$	=	constante gravitacional ( $32.174 [(lb_m \cdot ft/sec^2)/lb_f]$ )
$W$	=	trabajo agregado por ventilador, etc. ( $ft \cdot lb_f/lb_m$ )
$F$	=	energía perdida debido a la fricción ( $ft \cdot lb_f/lb_m$ )

Cada uno de los términos en el lado izquierdo de la Ecuación 1.1 representa un cambio de energía en una libra masa de fluido entre dos posiciones en el sistema—puntos “1” y “2”. Los términos de trabajo ( $W$ ) y la fricción ( $F$ ) denotan las cantidades de energía añadida/perdida entre los puntos 1 y 2.

Note que las unidades de cada término en la Ecuación 1.1 son “ $ft \cdot lb_f/lb_m$ ,” energía por unidad de masa. En el sistema de unidades Inglesas, “ $lb_f$ ” y “ $lb_m$ ” son, para todo propósito, numéricamente equivalentes, puesto que la relación del término de la aceleración gravitacional ( $g$ ) a la constante gravitacional ( $g_c$ ) es muy cercana a 1. En efecto, por lo tanto, la unidad de la ecuación es “pie de fluido” o “cabezal del fluido en pies”. En situaciones de control de la contaminación del aire, el fluido tiene con frecuencia las propiedades del aire. Esto es porque los contaminantes en la corriente de gas residual están presentes en cantidades tan pequeñas que las propiedades físicas de la corriente se aproximan a las del aire puro.

Debido a que el aire es un fluido “compresible”, su volumen específico es mucho más sensible a cambios en presión y temperatura que el volumen específico de tales fluidos “incompresibles” como el agua. Por esto, el término “ $vdp$ ” en la ecuación tenga que ser integrado entre los puntos 1 y 2. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas de ventilación de control de la contaminación del aire ni la presión ni la temperatura cambian apreciablemente desde el punto donde las emisiones son capturadas hasta la entrada del dispositivo de control. Consecuentemente, el volumen específico es, para todo propósito práctico, constante a través del sistema de ventilación, y uno no tiene que integrar el término  $vdp$ . Con esta suposición, el primer término en la Ecuación 1.1 se vuelve simplemente:

$$\int_1^2 v dp = v \int_1^2 dp = v \Delta p \quad (1.2)$$

**Ejemplo:** COV emitido por un tanque abierto, es capturado por una campana y conducido vía un soplador, a través de 150 pies de un sistema de conductos de 12 pulgadas de diámetro hasta un condensador refrigerado, al aire libre. El soplador, el cual mueve al gas a través de la campana, el sistema de conductos y el condensador, está localizado inmediatamente antes de la entrada al condensador. Así, el sistema de ventilación entero está a vacío. La temperatura y presión absoluta de la corriente son 100°F y aproximadamente 1 atmósfera ( $14.696 \text{ lb}_f/\text{in}^2$ ), respectivamente. La elevación de la entrada al condensador refrigerado está 30 pies por debajo de la del tanque. La velocidad del aire en la fuente es esencialmente cero, mientras que la velocidad de transporte en el conducto es  $2,000 \text{ ft}/\text{min}$ . La presión estática manométrica aumenta desde  $-0.50 \text{ in. w.c.}$  (columna de agua) en la fuente, hasta  $4.5 \text{ in. w.c.}$  a la salida del soplador. Finalmente, la pérdida de fricción calculada a través del sistema de conductos y de la campana totaliza  $1.25 \text{ in. w.c.}$  Calcular la cantidad de energía mecánica que el soplador añade a la corriente de gas. Suponga que la temperatura del gas permanece constante de principio a fin.

**Solución:**

Primero, desarrolle un factor para convertir “pulgadas de agua” a “pies de aire”:

$$\text{Pies de aire} = (\text{pulgadas de agua}) \left( \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) \left( \frac{v_{a100}}{v_{w100}} \right) \quad (1.3)$$

donde

$$\begin{aligned} v_{w100} &= \text{volumen específico del agua @ } 100^\circ\text{F} = 0.01613 \text{ ft}^3/\text{lb}_m \\ v_{a100} &= \text{volumen específico del aire @ } 100^\circ\text{F, } 1 \text{ atmósfera} \end{aligned}$$

debido a que la presión absoluta del sistema está cercana a la atmosférica, el gas residual se comporta como un *gas ideal*. Así, el volumen específico puede calcularse de la ley del gas ideal:

$$v_a = \frac{RT}{pM} \quad (1.4)$$

donde

$$\begin{aligned} R &= \text{constante del gas ideal} = 1,545 \text{ ft}\cdot\text{lb}_f/(\text{lb}_m\text{-mole})(ER) \\ T &= \text{temperatura absoluta del gas} = 100 + 460 = 560ER \\ M &= \text{peso molecular del gas (aire)} = 28.85 \text{ lb}_m/\text{lb}_m\text{-mole} \\ p &= \text{presión absoluta} = 2,116 \text{ lb}_f/\text{ft}^2 \end{aligned}$$

Substituyendo, obtenemos:

$$v_a = 14.17 \frac{ft^3}{lb_m}$$

Finalmente, la sustitución de estos valores para  $v_a$  y  $v_w$  en la ecuación 1.3 produce:

$$\text{Pies de aire (@ } 100 \text{ }^\circ\text{F, 1 atm)} = 73.207 \times \text{pulgadas de agua}$$

Compute los cambios en los términos de la energía mecánica y las pérdidas por fricción entre la entrada a la campana (punto 1) y la salida del soplador/entrada al condensador (punto 2):

Presión de aire:

$$v\Delta p = (4.5 - [-0.50] \text{ in. w.c.}) \left( \frac{73.207 \text{ ft de aire}}{\text{in. w.c.}} \right) = 336.0 \text{ ft de aire}$$

Potencial:  $\Delta z = -30 \text{ ft de aire}$  (punto 2 está por debajo del punto 1)

Cinética:

$$\frac{\Delta u^2}{2g_c} = \left( \frac{\left[ \frac{2,000 \frac{ft}{min}}{60 \frac{ft}{min}} \right]}{\left[ \frac{1 \frac{ft}{sec}}{1 \frac{ft}{sec}} \right]} \right)^2 \times \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{32.174 \left[ \frac{lb_m \cdot ft}{sec^2} \right]}{lb_f} \right)^{-1} = 17.3 \text{ ft de aire}$$

Pérdidas por fricción:  $F = 1.25 \text{ in. w.c} \times 73.207 = 91.5 \text{ ft de aire}$

Substituyendo los resultados anteriores en la Ecuación 1.1 y resolviendo para  $W$ , la energía del ventilador añadida:

$$366.0 + (-30) + 17.1 = W - 91.5, \text{ o}$$

$$W = 444.6 \frac{ft \cdot lb_f}{lb_m \text{ aire}} = 6.07 \text{ in. w.c.}$$

Para convertir el suministro de energía del ventilador,  $W$ , a caballos potencia ( $hp_f$ ), tendríamos que multiplicarlo por la razón de flujo masa del aire ( $lb_m/sec$ ) y dividir el resultado entre el factor de conversión a caballos potencia,  $550 ft-lb/sec-hp$ . Sin embargo, la razón de flujo masa es justo la razón de flujo volumétrico ( $Q, ft^3/sec$ ) dividida por el volumen específico:

$$hp_f = W \left( \frac{Q}{v_a} \right) \left( \frac{1}{550} \right) = 0.001818 \frac{WQ}{v_a} \quad (1.5)$$

A su vez,  $Q$  es una función de la velocidad en el conducto ( $u, ft/sec$ ) y del diámetro del conducto ( $D, ft$ ):

$$Q = u_t \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (1.6)$$

La Ecuación 1.6 se aplica, por supuesto, solamente a conductos circulares.

Si combinamos las Ecuaciones 1.5 y 1.6 y sustituimos los datos para este ejemplo, obtenemos:

$$hp_f = 444.6 \left( \frac{2,000}{60} \right) \left( \frac{\pi}{4} \right) (1)^2 \left( \frac{1}{14.17} \right) \left( \frac{1}{550} \right) = 1.49 hp$$

Algunas observaciones acerca de este ejemplo:

Recuérdese que las unidades precisas para  $W$  y de otros términos en la Ecuación 1.1 son “ $ft-lb/lb_m$  aire,” las cuales, por conveniencia, han sido abreviadas como “ $ft$  aire”. Entonces, ellos miden energía, no longitud.

Comparados con los términos de energía de presión y de fricción, los términos de energía potencial y cinética son pequeños. Si hubieran sido ignorados, los resultados no habrían cambiado apreciablemente.

La gran magnitud de los términos de presión y de fricción claramente ilustra la importancia de mantener las unidades ordenadas. Como se muestra en el paso (1), una pulgada de agua es equivalente a más de 73 pies de aire. Sin embargo, como indica la Ecuación 1.3, la presión correspondiente a alturas equivalentes de columnas de aire y de agua sería la misma.

El suministro de potencia del ventilador depende no solo del “cabezal” total (*ft* aire) requerido, pero también de la razón de flujo de gas. También, nótese que los caballos potencia calculados vía la Ecuación 1.5 es un valor teórico. Tendría que ajustarse para considerar las eficiencias del ventilador y del motor del ventilador. La eficiencia del ventilador varía desde 40 hasta 70 por ciento, mientras que la eficiencia del motor es típicamente de 90 por ciento. Estas eficiencias son usualmente combinadas en un sola eficiencia (fracción), por la que se dividen los caballos potencia teóricos para obtener los requerimientos actuales de caballos potencia.

### 1.3.1.2 Presión: Estática, Velocidad y Total

Aun cuando es más riguroso y consistente expresar los términos de la ecuación de Bernoulli en términos de pies de aire (o, precisamente,  $ft \cdot lb_f / lb_m$  de aire), los ingenieros en ventilación industrial prefieren utilizar las unidades “pulgadas de columna de agua (*in. w.c.*)”. Se escogieron estas unidades porque, como muestra el ejemplo anterior, los resultados expresados en “pies de aire” son con frecuencia números grandes que son incómodos de utilizar. Además, los cambios en la presión total en los sistemas de ventilación son relativamente pequeños, comparados con aquellos en los sistemas de flujo líquido. Los cambios de presión total expresados en pulgadas de mercurio serían números pequeños, los cuales son igual de incómodos de manejar como los números grandes. Por lo tanto, “pulgadas de agua” es aceptable, ya que los valores expresados en estas unidades de medida típicamente varían de solamente 1 a 10. Además, las mediciones prácticas de cambios de presión se hacen con manómetros llenos de agua.

En el párrafo previo se mencionó una unidad nueva, presión total (*TP*). También conocida como la “presión de impacto”, la presión total es la suma de las presiones estática manométrica (*SP*) y de velocidad (*VP*) en cualquier punto dentro de un conducto, campana, etc., todo expresado en *in. w.c.* [25] Esto es:

$$TP = SP + VP \quad (1.7)$$

donde

$$\begin{aligned} SP &= (cf)vp \\ VP &= (cf)u^2/2g_c \end{aligned}$$

El “*cf*” en las expresiones para *SP* y *TP* es el factor para convertir los términos de energía de “*ft* aire” a “*in. w.c.*”, ambas a temperatura estándar y presión absoluta (70°F, 1 atmósfera). (De nuevo, recuerde que, sin importar en que unidades están expresadas *SP* o *VP*, las unidades reales son “energía por unidad de masa”). Este factor de conversión se obtendría vía rearrreglo de la Ecuación 1.3:

$$cf \left( \frac{\text{in. w.c.}}{\text{ft. aire}} \right) = 12 \left( \frac{v_{w70}}{v_{a70}} \right) \quad (1.8)$$

donde

$$v_{w70} = \text{volumen específico del agua a } 70^\circ F = 0.01605 \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m} \right)$$

$$v_{a70} = \text{volumen específico del aire a } 70^\circ F = 13.41 \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m} \right)$$

Entonces:  $cf = 0.01436 \text{ in. w.c./ft aire}$

Claramente, “ $cf$ ” varía como una función de la temperatura y la presión. Por ejemplo, a  $100^\circ F$  y 1 atmósfera,  $cf = 1/73.207 = 0.01366$ . No obstante, a menos que se indique de otro modo, todas las cantidades de aquí en adelante en esta sección reflejarán las condiciones a  $70^\circ F$  y 1 atmósfera.

El término de la energía potencial “ $z(g/g_c)$ ” está ausente, conspicuamente, de la Ecuación 1.7. Esta omisión no fue inadvertida. En sistemas de ventilación, la energía potencial ( $P.E.$ ), usualmente es pequeña comparada con otros términos. (Por ejemplo, vea el ejemplo anterior). La  $P.E.$  es, por supuesto, una función de la distancia vertical del punto de medición en cuestión, desde algún nivel de referencia, usualmente el suelo. Cuando mucho, la distancia equivaldría a no más de 20 o 30 pies, correspondiendo a una  $P.E.$  de aproximadamente 0.3 a 0.4  $\text{in. w.c.}$ . Consecuentemente, usualmente podemos ignorar la contribución de la  $P.E.$  en sistemas de ventilación, sin introducir error importante.

La presión estática manométrica en un conducto es igual en todas direcciones, mientras que la presión de velocidad, una función de la velocidad, varía a través de la sección transversal del conducto. La velocidad en el conducto es la más alta en el centro y la más baja en las paredes del conducto. Sin embargo, para aire fluyendo en un conducto largo, recto, la velocidad promedio ( $u_p$ ) se aproxima a la velocidad de la línea central ( $u_{cl}$ ). [26] Este es un punto importante, porque la velocidad promedio es medida frecuentemente con un tubo de pitot situado al centro del conducto.

Sustituyendo para “ $cf$ ” en la Ecuación 1.7, podemos obtener una ecuación simple que relaciona la velocidad a la presión de velocidad a condiciones estándares:

$$VP = \frac{0.01436u_t^2}{2g_c} \quad (1.9)$$

Resolviendo:

$$u_t \left( \frac{ft}{sec} \right) = 66.94 (VP)^{1/2} \quad (1.10)$$

O:

$$u_t \left( \frac{ft}{min} \right) = 4,016 (VP)^{1/2} \quad (1.11)$$

Incidentalmente, estas ecuaciones se aplican a cualquier conducto, sin importar su forma.

Tal como lo describe Burton, la presión estática manométrica puede concebirse como la energía “almacenada” en un sistema de ventilación. Esta energía almacenada es convertida a la energía cinética de la velocidad y a las pérdidas por fricción (las cuales son principalmente calor, vibración y ruido). Las pérdidas por fricción caen dentro de varias categorías: [27]

- Pérdidas a través de conductos rectos
- Pérdidas a través de accesorios de conductos —codos, Tes, reductores, etc.
- Pérdidas en las entradas a ramales y dispositivos de control
- Pérdidas en campanas debido a turbulencia, impacto o contracción de vena (vena contracta)
- Pérdidas en ventiladores
- Pérdidas en chimeneas

Estas pérdidas serán discutidas en secciones posteriores de este capítulo. Hablando generalmente, se pierde mucha más de la energía de presión manométrica por fricción que la que se convierte a energía de presión de velocidad. Es costumbre expresar estas pérdidas por fricción ( $\Delta SP_f$ ) en términos de presión de velocidad:

$$F = \Delta SP_f = kVP \quad (1.12)$$

donde

$k$  = factor de pérdida determinado experimentalmente (sin dimensiones)

Alternativamente, las Ecuaciones 1.11 y 1.12 pueden combinarse para expresar  $F$  (in. w.c.) en términos de velocidad promedio en el conducto,  $u_t$  (ft/min):

$$F = (6.200 \times 10^{-8}) k u_t^2 \quad (1.13)$$

### 1.3.1.3 Ajustes por Temperatura y Presión

Las Ecuaciones de la 1.8 a la 1.13 fueron desarrolladas suponiendo que la corriente de gas residual estaba a temperatura y presión estándares. Estas condiciones fueron definidas como 70°F y 1 atmósfera ( $14.696 \text{ lb}_f/\text{in}^2$ ), respectivamente. Mientras que 1 atmósfera se toma casi siempre como la presión estándar, en los cálculos científicos y de ingeniería se utilizan varias temperaturas estándares diferentes: 32°F, 68°F, y 77°F, así como 70°F. La temperatura estándar seleccionada varía de acuerdo a la industria o disciplina de ingeniería en cuestión. Por ejemplo, los higienistas industriales y los ingenieros en aire acondicionado prefieren 77°F.

Antes de que estas ecuaciones puedan utilizarse con corrientes de gas residual no a 70°F y 1 atmósfera, sus variables deben ser ajustadas. Tal como se observó anteriormente, las corrientes de gas residual en aplicaciones de control de la contaminación del aire, obedecen la ley del gas ideal. De esta ley, la siguiente ecuación de ajuste puede ser derivada:

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.14)$$

donde

$Q_2, Q_1$  = razones de flujo de gas a condiciones 2 y 1, respectivamente ( $\text{ft}^3/\text{min}$  reales)

$T_2, T_1$  = temperaturas absolutas a condiciones 2 y 1, respectivamente (ER)

$P_2, P_1$  = presiones absolutas a condiciones 2 y 1, respectivamente (atm)

Sin embargo, de acuerdo a la Ecuación 1.6:

$$Q = u_t \left( \frac{\pi D_d^2}{4} \right)$$

Si se combinaran las Ecuaciones 1.6 y 1.14, obtendríamos:

$$u_{t_2} = u_{t_1} \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \left( \frac{D_{d_2}^2}{D_{d_1}^2} \right) \quad (1.15)$$

Esta última expresión puede ser utilizada para ajustar  $u_t$  en cualquier ecuación, siempre que el flujo de gas sea en conductos circulares.

### 1.3.2 Procedimiento de Diseño de la Campana

#### 1.3.2.1 Factores de Diseño de la Campana

Cuando se diseña una campana, varios factores deben de considerarse: [28]

- Forma de la campana
- Razón de flujo volumétrico
- Velocidad de captura
- Fricción

Cada uno de estos factores y sus interrelaciones serán explicados en esta sección.

Tal como se discutió en la Sección 1.2.1, la forma de la campana está determinada por la naturaleza de la fuente siendo controlada. Esto incluye factores tales como la temperatura y la composición de las emisiones, así como las dimensiones y la configuración de la corriente de la emisión. También son importantes tales factores ambientales como la velocidad y temperatura de las corrientes de aire en la vecindad.

La forma de la campana determina parcialmente la razón de flujo volumétrico necesario para capturar la emisión. Debido a que la campana está bajo presión negativa, el aire es aspirado hacia ella de todas direcciones. Considere el tipo más simple de campana, un simple conducto abierto en el extremo. Ahora, visualice una esfera imaginaria rodeando la abertura del conducto. El centro de esta esfera estaría al centro de la abertura del conducto, mientras que el radio de la esfera sería la distancia desde el extremo del conducto hasta el punto donde se capturan las emisiones. El aire sería aspirado a través de esta esfera imaginaria y hacia dentro de la campana del conducto. Ahora, el volumen de aire aspirado a través de la esfera sería el producto del área superficial de la esfera y la velocidad de captura de la campana,  $u_c$ : [29]

$$Q = u_c (4\pi x^2) \quad (1.16)$$

donde

$x$  = radio de la esfera imaginaria (ft)

La Ecuación 1.16 se aplica a conductos cuyo diámetro es pequeño en relación al radio de la esfera. Sin embargo, si el diámetro del conducto es más grande, el área de captura tendrá que ser reducida por el área de la sección transversal del conducto ( $D_d$ ), o:

$$Q = u_c \left( 4\pi x^2 - \frac{\pi D_d^2}{4} \right) \quad (1.17)$$

Similarmente, si se instalara una brida alrededor del exterior del extremo del conducto, el área superficial a través de la cual fuera succionado el aire —y la razón de flujo volumétrico— sería cortada a la mitad. Esto ocurre porque la brida podría, en efecto, obstruir el flujo de aire desde puntos atrás de ella. De aquí:

$$Q = u_c (2 \pi x^2) \quad (1.18)$$

De estos ejemplos, debe estar claro que la forma de la campana tiene una importancia directa en la razón de flujo de gas aspirado hacia ella. Pero las Ecuaciones de la 1.16 a la 1.18 se aplican solamente a campanas con patrones de flujo esféricos. Para otras campanas, se aplican otros patrones de flujo —cilíndricos, planos, etc. Podemos generalizar estas relaciones entre la razón de flujo volumétrico y los parámetros de diseño de la campana como sigue:

$$Q = f(u_i, x, Sh) \quad (1.19)$$

donde

“ $f(\dots)$ ” denota “función de...”

“ $Sh$ ” indica factores por forma de campana

$u_i$  = velocidad de diseño—captura, facial, ranura

La Tabla 1.1. enlista ecuaciones de diseño para varias formas de campanas comúnmente utilizadas. Como esta tabla muestra,  $Q$  es una función de  $x$ , la forma de la campana, y, en general, de la velocidad de captura ( $u_c$ ). Pero en un caso (campana de cabina), la velocidad de diseño es la velocidad en la cara de la campana ( $u_f$ ). Y en el caso de campanas ranuradas con tiro lateral y con tiro posterior, la velocidad de ranura ( $u_s$ ) es la velocidad de diseño. En realidad, ambas velocidades, la de la cara de la campana y la de ranura, son las mismas, ya que cada una mide la velocidad a la cual pasa el gas a través de la(s) abertura(s) de entrada de la campana.

Cuando el gas entra en la campana, hay una pérdida de energía mecánica debida a la fricción. Esta pérdida por fricción se calcula utilizando las Ecuaciones 1.1 y 1.2, suponiendo que la contribución de la energía potencial por la gravedad,  $\Delta z (g/g_c)$ , y el trabajo agregado al sistema,

$W$ , son cero ambos. Entonces:

$$vp_2 - vp_1 + \frac{u_2^2}{2g_c} - \frac{u_1^2}{2g_c} = -F \quad (1.20)$$

Reemplazando estos términos con los correspondientes de las Ecuaciones 1.7 y 1.12, obtenemos:

$$SP_2 - SP_1 + VP_2 - VP_1 = -H_c = -k_h VP_2 \quad (1.21)$$

donde

- $SP_i$  = presión estática manométrica en el punto  $i$  (*in. w.c.*)
- $VP_i$  = presión de velocidad en el punto  $i$  (*in. w.c.*)
- $H_c$  = pérdidas a la entrada de la campana (*in. w.c.*)
- $k_h$  = factor de pérdida de la campana (sin unidades)

En esta ecuación, el subíndice 1 se refiere a un punto justo afuera de la cara de la campana. El subíndice 2 denota el punto en el conducto, justo corriente abajo de la campana, donde se miden la presión estática del conducto  $SP_2$  o  $SP_h$  y la velocidad de transporte en el conducto,  $u_2$  o  $u_t$ . En el punto 1, la presión de velocidad en la campana,  $VP_1$ , es esencialmente cero, ya que la velocidad del aire ahí es despreciable. Aun más, la presión estática manométrica,  $SP_1$ , será cero, ya que la presión absoluta en el punto 1 se supone que es de una atmósfera, la presión de referencia. Después de que estas simplificaciones han sido hechas, la Ecuación 1.21 puede rearrreglarse para resolver para el factor de pérdida de la campana ( $k_h$ ):

$$k_h = \left( \frac{-SP_h}{VP_2} \right) - 1 \quad (1.22)$$

A primera vista, parece que  $k_h$  podría ser negativo, puesto que  $VP$  siempre es positivo. Sin embargo, ya que el aire que entra en la campana está bajo un vacío creado por el ventilador corriente abajo,  $SP_h$  debe ser negativo. Entonces, el término “ $-SP_h/VP_2$ ” debe ser positivo. Finalmente, debido a que el valor absoluto de  $SP_h$  es mayor que  $VP_2$ ,  $k_h > 0$ .

El factor de pérdida de la campana varía de acuerdo a la forma de la campana. Puede variar desde 0.04 para campanas en forma de campana hasta 1.78 para varias campanas ranuradas.

**Table 1.1:** Ecuaciones de Diseño, Factores de Pérdida, y Coeficientes para Entrada para Tipos de Campana Seleccionadas [2]

Tipo De Campana	Ecuación de Diseño	Factor de Pérdida ( $k_h$ )	Coeficiente de Entrada ( $C_e$ )
Extremo de conducto (redondo)	$Q = 4 x^2 u_c$	0.93	0.72
Extremo de conducto con brida (redondo)	$Q = 2 x^2 u_c$	0.50	0.82
Campana de ranura sin soporte	$Q = 2 x L u_c$	1.78	0.55
Campana de ranura c/lados, atrás	$Q = 0.5 x L u_c$	1.78	N/A
Campana ahusada	$Q = 2 x u_c$	0.06 <sup>1</sup>	0.97
Campana de cabina conducto de salida ahusado (redondo)	$Q = u_f A_h$	0.25	0.89
Campana de toldo	$Q = 1.4 P x u_c$	0.25	0.89
Campana de toldo c/inserto	$Q = 1.4 P x u_c$	1.0	0.71
Campana de tanque hondo (ranurado)	$Q = 125 A_t$	1.78	N/A
Campana de cabina de pintura	$Q = 100 A_b$	0.25	N/A

1 Ambas  $K_h$  y  $C_e$  se refieren a conductos redondos y a campanas con reducción a 45°. Con otros ángulos,  $K_h$  y  $C_e$  serán diferentes.

n.a.	=	no aplicable
Q	=	razón de flujo aspirado hacia dentro de la campana
x	=	distancia desde la campana a la fuente
$u_c$	=	velocidad de captura de la campana (ft/min)
$u_f$	=	velocidad en la cara de la campana (ft/min)
$u_s$	=	velocidad en la campana de ranura (ft/min)
$A_h$	=	área de la cara de la campana (ft <sup>2</sup> )
P	=	perímetro de la fuente (ft)
L	=	ancho de la ranura de la campana (ft)
$A_t$	=	área superficial del tanque + mesa de escurrimiento (ft <sup>2</sup> )
$A_b$	=	área de la sección transversal de la cabina (ft <sup>2</sup> )

Un parámetro relacionado con el factor de pérdida de la campana es el coeficiente de entrada ( $c_e$ ). [30] Este se define como:

$$c_e = \left[ \frac{1}{(1 + k_h)} \right]^{1/2} \quad (1.23)$$

$c_e$  depende solamente de la forma de la campana y puede ser utilizado para computar  $k_h$  y parámetros relacionados. Los valores de  $k_h$  y  $c_e$  se enlistan en la Tabla 1.1.

**Ejemplo:** La presión estática manométrica,  $SP_h$ , es  $-1.75 \text{ in. w.c.}$ . La velocidad de transporte del conducto ( $u_t$ ) es  $3,500 \text{ ft/min}$ . Calcular el factor de pérdida y el coeficiente de entrada para la campana. Suponga temperatura y presión estándares.

**Solución:** Primero, calcular la presión de velocidad del conducto. Rearreglando la Ecuación 1.11 y sustituyendo para  $u_t$ , obtenemos:

$$VP = \left( \frac{u_t}{4,016} \right)^2 = \left( \frac{3,500}{4,016} \right)^2 = 0.76 \text{ in. w.c.}$$

Enseguida, sustituya  $VP$  en la Ecuación 1.22 y resuelva:

$$k_h = \left( \frac{-SP_h}{VP} \right) - 1 = - \left( \frac{-1.75}{0.76} \right) - 1 = 1.30$$

Finalmente, utilice este valor y la Ecuación 1.23 para calcular el coeficiente de entrada:

$$C_e = \left( \frac{1}{1 + 1.30} \right)^{1/2} = 0.66$$

Las velocidades de diseño de la campana se enlistan en la Tabla 1.2. Se muestran tres clases de velocidades: (1) captura (definida en la Sección 2.1.1), (2) cara, y (3) ranura. Tal como se estableció en la Sección 1.2.1, la velocidad de captura es la velocidad del aire inducida por la campana para capturar los contaminantes emitidos a alguna distancia de la entrada de la campana. La velocidad de cara es la velocidad promedio del aire pasando a través de la entrada de la campana (cara). La velocidad de ranura es parámetro similar, la cual es la velocidad promedio del aire a través de las aberturas de las ranuras, cuyas áreas son solo una fracción del área de toda la cara de la campana. Consecuentemente, la velocidad de ranura es usualmente, mucho mayor que la velocidad de cara.[31]

Nótese que estas velocidades varían desde 50 hasta  $100 \text{ ft/min}$  (campanas de tanque y desengrasado) hasta  $2,000 \text{ ft/min}$ , la velocidad de ranura recomendada para campanas ranuradas con tiro lateral y tiro posterior. Como un punto de referencia, la velocidad del aire en operaciones industriales debido al solo mezclado térmico es de  $50 \text{ ft/min}$ . Así, las velocidades de diseño de la campana deben exceder este valor para que ocurra la captura efectiva.[32]

Otras dos velocidades son también discutidas en la literatura de higiene industrial, aunque no tienen tanta importancia en el diseño de la campana como las velocidades de captura, de cara o de ranura. Estas son la velocidad en el plenum y la velocidad de transporte. La primera es la velocidad de la corriente de gas a medida que pasa a través de la plenum (sección ahusada de la campana) entre la abertura de la campana y la conexión al conducto. Este plenum es un área de transición entre la abertura de la campana y el conducto. Consecuentemente, la velocidad en el plenum es mayor que la velocidad de cara de la campana, pero menor que la velocidad en el conducto de transporte. La velocidad de transporte -la velocidad del gas a través del conducto- varía de acuerdo a la composición del gas residual. Es un parámetro crucial para determinar el diámetro del conducto, la pérdida por presión estática y los tamaños del ventilador del sistema y del motor del ventilador. (Para más sobre velocidad de transporte, véase la Sección 1.3.3.)

### 1.3.2.2 Procedimiento de Diseño del Tamaño de la Campana

Al igual que con muchos dispositivos de control y auxiliares, hay varios enfoques para diseñar el tamaño de las campanas. Algunos de estos enfoques son bastante complejos, implicando una serie de cálculos complejos que producen correspondientemente, resultados correctos. Por ejemplo, un método de diseño del tamaño de campana en la literatura, implica primero determinar las dimensiones de la campana (largo y ancho para campanas rectangulares; diámetro para circulares). El siguiente paso es estimar la cantidad de área ( $ft^2$ ) de placa de metal requerida para fabricar una campana de estas dimensiones, vía curvas paramétricas. (No se proporcionan curvas para campanas no metálicas). Esta área de placa es un dato para una ecuación que incluye un

**Tabla 1.2:** Velocidades de Diseño de la Campana [2]

Operación/Tipo de Campana	Tipo de Velocidad	Rango de Velocidad( $ft/min$ )
Tanques, desengrasado	Captura	50-100
Horno de secado	Facial	75-125
Cabina de aspersión	Captura	100-200
Cabina de toldo	Captura	200-500
Esmerilado, limpieza abrasiva	Captura	500-2,000
Campana de ranura	Ranura	2,000

*pricing factor* (factor de precio) y el precio por libra del metal. El costo de la mano de obranecesaria para fabricar esta campana se estima de ecuaciones similares a las relaciones del área de la placa. Finalmente, los costos del metal y de mano de obra se suman para obtener el costo total de la campana fabricada.[33]

Este método si produce el costo de campana razonablemente correcto —o mejor dicho, produjo. Desafortunadamente, los datos de costo de mano de obra son obsoletos —temporada 1977— lo cual los hace no escalables. (La regla de dedo para el límite de tiempo para escalar costos es de cinco años). Aún si estos costos fueran actualizados, el procedimiento es difícil de usar, especialmente si los cálculos se hacen a mano.

Un método más simple para diseñar el tamaño—aún uno suficientemente exacto para propósitos de estimaciones de estudio—implica determinar una sola dimensión, el área de la cara de la campana ( $A_f$ ). Esta área, idéntica al área de la entrada de la campana, puede correlacionarse contra el costo de la campana fabricada para producir una ecuación de costo relativamente simple con una sola variable independiente. Para calcular  $A_f$ , se necesita la siguiente información:

- Tipo de campana
- Distancia de la cara de la campana desde la fuente ( $x$ )
- Velocidad de captura ( $u_c$ ), de cara ( $u_f$ ), o de ranura ( $u_s$ )
- Dimensiones de la fuente (para algunos tipos de campanas).

Como indican las ecuaciones en la Tabla 1.1, estos mismos parámetros son los que se utilizan para determinar la razón de flujo volumétrico ( $Q$ ) a través de la campana y el sistema de conductos. Con dispositivos de control y auxiliares de tamaño ya diseñado,  $Q$  está dada. Para campanas, sin embargo,  $Q$  usualmente debe ser calculada.

**Ejemplo:** Una campana de toldo circular está siendo utilizada para captura emisiones de un tanque de electrodeposición de cromo. La cara de la campana está 6 pies arriba del tanque, un recipiente circular de 8 pies de diámetro. La velocidad de captura para este ejemplo es de 200 *ft*/min. Suponiendo que los alrededores del tanque están a condiciones estándar, calcule la razón de flujo volumétrico requerida aspirada hacia dentro de la campana, el área de la cara de la campana y la velocidad de cara de la campana.

**Solución:** Obtenga la ecuación de la campana de toldo de la Tabla 1.1:

$$Q = 1.4 P x u_c \quad (1.24)$$

donde

- $P$  = perímetro del tanque (*ft*)
- $x$  = distancia a la campana encima del tanque (*ft*)
- $u_c$  = velocidad de captura (*ft*/min)

Debido a que el tanque es circular,  $P = B(8) = 25.1 \text{ ft}$ .

Por lo tanto:

$$Q = (1.4 \text{ ft}) (6 \text{ ft}) \left( 200 \frac{\text{ft}}{\text{min}} \right) = 42,200 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

Para este tipo de campana de toldo, el diámetro de la campana es 40% mayor que el diámetro del tanque (De aquí, el factor “1.4” en la Ecuación 1.24). Entonces:

$$A_f = \left( \frac{\pi}{4} \right) (1.4 [8])^2 = 98.5 \text{ ft}^2$$

Finalmente, la velocidad de cara de la campana ( $u_f$ ) sería:

$$u_f = \frac{Q}{A_f} = \frac{42,200}{98.5} = 428 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

En este ejemplo, nótese que la velocidad de cara de la campana es mayor que la velocidad de captura. Esto es lógico, dado el hecho de que el área de la entrada de la campana es menor que el área a través de la cual son aspirados los humos del tanque. La velocidad de cara para algunas campanas es aún mayor. Por ejemplo, para campanas ranuradas es al menos  $1,000 \text{ ft}/\text{min}$ . [34] De hecho, un proveedor diseña el tamaño de las aberturas en sus campanas ranuradas a modo de lograr una velocidad de ranura igual a la velocidad de transporte en el conducto. [35]

### 1.3.3 Procedimiento de Diseño del Sistema de Conductos.

El diseño del sistema de conductos puede ser una tarea extremadamente compleja. Determinar el número, colocación y dimensiones de los componentes del sistema de conductos—conductos rectos, codos, Tes, compuertas, etc.—puede ser tediosa y consumir tiempo. Sin embargo, para propósitos de realizar estimaciones de costo a nivel estudio del sistema de control, tales procedimientos de diseño involucrados no son necesarios. En su lugar, se puede concebir un método más simple de diseño del tamaño del sistema de conductos.

#### 1.3.3.1 Dos Enfoques de Diseño del Sistema de Conductos

Hay dos métodos comúnmente utilizados para diseñar el tamaño y establecer el precio del sistema de conductos. En el primero, el peso total del conducto es computado del número y dimensiones de los componentes varios. Enseguida, este peso es multiplicado por un solo precio (en  $\$/\text{lb}$ ) para obtener el costo del equipo del sistema de conductos. Para determinar el peso del sistema de conductos, uno necesita conocer el diámetro, longitud y espesor de pared de cada

componente en el sistema. Tal como se estableció anteriormente, la obtención de estos datos puede significar un esfuerzo considerable.

El segundo método es una variación del primero. En esta técnica, se diseña el tamaño y se establece precio de los componentes del sistema de conductos individualmente. El precio del conducto recto se obtiene típicamente como una función de la longitud, diámetro y espesor de pared, así como, por supuesto, del material de construcción. El precio de los codos, tes y otros accesorios se establece de acuerdo a todos estos factores, excepto la longitud. Otras variables, tal como la cantidad y tipo de aislante, también afectan al precio. Debido a que proporciona más detalles y precisión, el segundo método será utilizado en esta sección.

### 1.3.3.2 Parámetros de Diseño del Sistema de Conductos

De nuevo, las variables primarias para el diseño del tamaño del sistema de conductos son longitud, diámetro y espesor de pared. Otro parámetro es la cantidad de aislante requerido, si acaso.

**Longitud:** La longitud del sistema de conductos necesaria con un sistema de control de la contaminación del aire, depende de factores tales como la distancia de la fuente al dispositivo de control y el número requerido de cambios direccionales. Sin tener un conocimiento específico de la distribución de la fuente, es imposible determinar la longitud exactamente. Puede variar desde 20 a 2,000 pies o más. Es mejor dar el costo del conducto recto en base a \$/ft y dejar al lector que proporcione la longitud. Esta longitud debe ser parte de las especificaciones de la fuente de emisión a la cual se le instalan los conductos.

**Diámetro:** Tal como se discutió en la Sección 1.2.2., se prefiere la forma circular a la rectangular, ovalada u otras formas de conducto.

Por lo tanto:

$$A_d = \frac{\pi D_d^2}{4} \quad (1.25)$$

donde

$$\begin{aligned} A_d &= \text{área de sección transversal del conducto (ft}^2\text{)} \\ D_d &= \text{diámetro del conducto (ft)} \end{aligned}$$

El área de sección transversal del conducto es el cociente de la razón de flujo volumétrico ( $Q$ ) y de la velocidad de transporte en el conducto ( $u$ ):

$$A_d = \frac{Q}{u_t} \quad (1.26)$$

Combinando las Ecuaciones 1.25 y 1.26 y resolviendo para  $D_d$ :

$$D_d = 1.128 \left( \frac{Q}{u_t} \right)^{1/2} \quad (1.27)$$

Como  $Q$  es usualmente conocida, la variable clave en la Ecuación 1.27 es la velocidad de transporte en el conducto. Esta variable debe escogerse cuidadosamente. Si la  $u_t$  seleccionada es muy baja, el conducto estará sobre dimensionado y, más importante, la velocidad no será suficientemente alta para conducir la materia particulada en la corriente de gas residual al dispositivo de control. Sin embargo, si  $u_t$  es muy alta, la caída de presión estática (la cual es proporcional al cuadrado de  $u_t$ ), será excesiva, como lo será el correspondiente consumo de energía del ventilador.

**Tabla 1.3:** Velocidad de Transporte Mínima para Materiales Conducidos

Material(es) Conducido(s)	Velocidad de Transporte Mínima ( $u_t$ ft/min)
Gases: polvos ligeros, muy finos	2,000
Polvos y talcos finos y secos	3,000
Polvos industriales promedio	3,500
Polvos gruesos	4,000-4,500
Cargas de polvo pesado o húmedo	$\geq 4,500$

El costo es también una consideración cuando se determina el diámetro óptimo del conducto. El costo del equipo aumenta con aumento del diámetro del conducto. Sin embargo, el costo de energía del ventilador cambia inversamente con el diámetro. No obstante, para propósitos de estimaciones de estudio, el diámetro óptimo del conducto no tiene que determinarse. Es suficiente calcular el diámetro del conducto utilizando tan solo los valores de velocidad de transporte contenidos en esta sección.

La velocidad de transporte varía típicamente desde 2,000 a 6,000 *ft/min*, dependiendo de la composición del gas residual. La velocidad en el conducto más baja será adecuada para gas residual conteniendo contaminantes gaseosos o polvos ligeros muy finos; mientras que la velocidad

más alta sería necesaria para conducir una corriente con una gran cantidad de metales u otros materiales pesados o húmedos. Las siguientes velocidades pueden utilizarse como guía general[36]:

La Tabla 1.4 proporciona estos valores con velocidades en el conducto recomendadas para una variedad de materiales conducidos.

**Espesor de Pared:** El espesor de pared de un conducto depende de varios factores—presión interna, diámetro, material de fabricación y otros parámetros estructurales. No obstante, un conducto de un diámetro dado puede fabricarse de un rango de espesores de pared y viceversa. Por ejemplo, un conducto de 24 pulgadas de diámetro de acero inoxidable 304 “de costura longitudinal totalmente soldada” es fabricado con espesor de pared que varía desde calibre 22 a 14 (0.0313 a 0.0781 pulgadas). Este mismo rango de calibres es utilizado con diámetros de conducto variando desde 3 a 36 pulgadas.[37]

Nótese que el número del calibre disminuye con aumento en el espesor de pared. Esta medida, la cual es tradicionalmente usada en la industria de fabricación de metal, es más conveniente de usar que el espesor expresado en pulgadas, ya que éstas son usualmente números pequeños menores a 0.25. Más aún, el número del calibre varía de acuerdo al metal utilizado—acero al carbón (galvanizado o no galvanizado), acero inoxidable o aluminio. Los calibres para estos metales están dados en la Tabla 1.5 para un rango amplio de espesores nominales.

La medida del calibre no es usada con conductos de plástico, ya que el espesor de pared se expresa típicamente en pulgadas. En cualquier caso, el espesor de pared usualmente no necesita conocerse para estimar el costo del conducto, ya que este parámetro ha sido tomado en cuenta ya en las ecuaciones de costo. (Véase la Sección 1.4.)

**Aislante:** Tal como se discutió en la Sección 1.2.2., el aislante puede ser instalado ya sea en la superficie exterior del sistema de conductos o del sistema de conductos mismo puede fabricarse con el aislante interconstruido. En el primer caso, la cantidad de aislante requerido dependerá de varias variables de transferencia de calor, tales como: temperatura, velocidad, composición y otras propiedades del gas residual; la temperatura ambiente; el diámetro del conducto, el espesor de pared y la conductividad térmica, y la temperatura superficial (“piel”) deseada. La determinación de estas variables implica hacer una serie de cálculos complejos que, aunque bien establecidos, están más allá del alcance de este capítulo. Referencias estándares tales como el *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Manual del Ingeniero Químico de Perry) y *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (Diseño de Planta y Economía para Ingenieros Químicos), presentan estos cálculos, como lo hacen las bibliografías de transferencia de calor.[38, 39]

El segundo enfoque es seleccionar un sistema de conductos preconstruído. Como se mencionó anteriormente, puede equiparse con cualquier tipo y espesor de aislante. Sin embargo, 1,2 o 3 pulgadas es típico. (Los precios para éstas se presentan en la Sección 1.4.)

### 1.3.3.3 Caída de Presión en el Sistema de Conductos

Tal como se mencionó en la Sección 1.3.1, las pérdidas de energía en los sistemas de ventilación debido a la fricción, son calculados tradicionalmente como fracciones de la presión de velocidad  $VP$ . En la mayoría de los casos, la Ecuación 1.12 puede utilizarse para estimar estas pérdidas. Técnicamente, estas ecuaciones se aplican solamente a aquellas regiones en el sistema de ventilación donde no hay cambios en la presión de velocidad (v.g., donde el diámetro del conducto es constante). Estas regiones incluirían conductos rectos, campanas y accesorios tales como acoples y codos simples. Pero, con las «Tes», yes y otros accesorios de flujo dividido, la velocidad—y la presión de velocidad—no son constantes entre la entrada y salida del accesorio. La pérdida por fricción correspondiente ( $F_b$ ) es una función de ambas, las  $VP$ s corriente arriba (entrada) y en el ramal, como lo indica la siguiente ecuación:[40]

**Tabla 1.4:** Velocidad en el Conducto Mínima para Materiales Selectos [2]

Material	Velocidad de Transporte Mínima (ft/min)
Polvo de aluminio (grosso)	4,000
Rebabas de bronce	4,000
Polvo de taladrar hierro fundido	4,000
Polvo de arcilla	3,500
Polvo de carbón (pulverizado)	4,000
Polvo de cocoa	3,000
Polvo de algodón	3,000 - 5,000 <sup>1</sup>
Polvo de granos	2,500-3,000
Polvo de plomo	4,000
Polvo de caliza	3,500
Polvo de magnesio (grosso)	4,000
Rebabas de metal	4,000-5,000
Polvo de plástico (lijado)	3,000
Polvo de hule	2,500 (fino) – 4,000 (grosso)
Polvo de sílice	3,500 – 4,500
Polvo de jabón	3,000
Polvo de soapstone (piedra de jabón)	3,000
Pintura atomizada	2,000
Polvo de almidón	3,000
Polvo de piedra	3,500
Polvo de tabaco	3,500

<sup>1</sup> Las velocidades de transporte varía con operaciones de fundición.

$$F_b = VP_u (k_b - 1) + VP_b \quad F_b = VP_u (k_b - 1) + VP_b \quad (1.28)$$

donde

$$VP_u, VP_b = \text{presiones de velocidad corriente arriba y en el ramal, respectivamente (in. w.c.)}$$

$$k_b = \text{coeficiente de pérdida en el ramal}$$

Sin embargo, los accesorios de flujo dividido no son generalmente utilizados con sistemas de ventilación de control de la contaminación simples, excepto en aquellos casos donde una te puede necesitarse, digamos, para propósito de agregar aire de dilución.<sup>1</sup>

Tal como cualquier libro de texto de mecánica de fluidos podría atestiguar, la pérdida por fricción de un sistema de conductos es una función compleja de varias variables: diámetro y longitud del conducto, velocidad de transporte y viscosidad y densidad del gas. Específicamente, las Ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook son utilizadas típicamente para hacer esto cálculos, siendo utilizada ésta última para calcular el Número de Reynolds.[41] Tradicionalmente, la pérdida por fricción se ha obtenido de un nomograma o, más recientemente de programas de computadora. Un nomograma típico se encuentra en Burton. [42] También, para simplificar el cálculo, se han derivado ecuaciones empíricas para ciertas clases de sistemas de conductos disponibles comercialmente. Por ejemplo, para estimar la pérdida por fricción por 100 pies ( $F_d / 100 ft$ ) a condiciones estándar para sistemas de conductos galvanizados redondos, en espiral, teniendo 10 uniones por 100 pies, utilice la siguiente ecuación:[43]

**Tabla 1.5:** Espesor de Pared de Conductos de Acero y Aluminio [40]

Calibre	Espesor Nominal (pulgadas)			
	Acero al Carbon		Acero Inoxidable (304 or 316)	Aluminio 3003-H14 <sup>3</sup>
	Galvanizado <sup>1</sup>	No Galvnizado <sup>2</sup>		
28	0.0187	0.0149	0.0156	0.025
26	0.0217	0.0179	0.0188	0.032
24	0.0276	0.0239	0.0250	0.040
22	0.0336	0.0299	0.0313	0.050
20	0.0396	0.0359	0.0375	0.063
18	0.0516	0.0478	0.0500	0.080
16	0.0635	0.0598	0.0625	0.090
14	0.0785	0.0747	0.0781	--
12	0.1084	0.1046	0.1094	--
10	0.1382	0.1345	0.1406	--

<sup>1</sup> Para proporcionar resistencia y rigidez, el espesor nominal del aluminio es aproximadamente 150% del espesor nominal del acero al carbón galvanizado del mismo calibre.  
<sup>2</sup> Galvanizado y acero al carbón galvanizado pintable  
<sup>3</sup> Acero al carbón no galvanizado

$$\frac{F_d}{100 ft} = 0.136 \left( \frac{1}{D_d} \right)^{1.18} \left( \frac{u_t}{1,000} \right)^{1.8} \quad (1.29)$$

donde

$D_d$  = diámetro del conducto ( $ft$ ), y:  $0.25 \leq D_d \leq 5$

Claramente, esta ecuación proporciona la pérdida por fricción total, no el factor de pérdida ( $k$ ). Sin embargo, el lector puede calcular  $k$  para un diámetro ( $D_d$ ) y razón de flujo ( $Q$ ) dados, simplemente dividiendo los resultados de la Ecuación 1.29 por  $VP$  y multiplicándolos por 100.

Para estimar la pérdida por fricción para otros materiales de conductos, multiplique el valor de la Ecuación 1.29 por un factor de corrección por rugosidad, cuyos valores aproximados son:[44]

Los factores de pérdida para accesorios también han sido compilados, en base a datos experimentales. Principalmente de interés son aquellos para codos de  $90^\circ$ , indiscutiblemente el accesorio más comúnmente utilizado en sistemas de control de la contaminación del aire. Los valores “ $k_{90}$ ” para codos, varían de acuerdo al diámetro y al radio de curvatura, el cual se expresa como un múltiplo del diámetro del codo. Los rangos típicos de estos valores son como sigue:[45]

Como lo indican estos valores, a mayor radio de curvatura, menor la pérdida por fricción. Esto equivale a razonar, que a mayor el radio de curvatura, más gradualmente cambia de dirección la corriente de gas. Para un codo que tiene un ángulo menor a  $90^\circ$ , multiplique el valor de  $k_{90}$  anterior por un factor de ajuste ( $2/90$ ), de modo que:

**Tabla 1.6:** Factores de Corrección por Rugosidad para Varios Materiales de Conductos

Material	Factor de Corrección por Rugosidad
Galvanizado no en espiral	0.9
Fibra de vidrio (acabado liso)	0.8
Plástico <i>ABS</i> y <i>PVC</i>	0.8
Concreto	1.4
Conducto flexible corrugado	2.3

<sup>1</sup> Se necesitan conexiones de flujos divididos con sistemas de control más complejos para recolectar gases residuales de fuentes de emisión múltiples. Sin embargo, el diseño de tales sistemas de ventilación están fuera del alcance de esta sección.

**Tabla 1.7:** Rangos Típicos del Factor de Pérdida por Fricción ( $k_{90}$ )

Radio de Curvatura	Factor de pérdida por fricción ( $k_{90}$ )
0.50	0.80
1.00	0.35
1.25	0.30 - 0.55
1.50	0.27 - 0.39
2.00	0.24 - 0.27
2.50	0.22 - 0.24

$$k_{\theta} = \left( \frac{\theta}{90} \right) k_{90} \quad (1.30)$$

donde

$k_{\theta}$  = factor de pérdida para  $\theta > 90^\circ$

**Ejemplo:** Un dispositivo de control en una fábrica de cosméticos está conectado a una fuente por 250 pies de un conducto redondo en espiral. El trazo del conducto incluye tres codos de  $90^\circ$  y dos codos de  $45^\circ$ , cada uno con un radio de curvatura de 1.50. La razón de flujo volumétrica ( $Q$ ) del gas residual (el cual contiene polvo facial atrapado), es de  $15,000 \text{ ft}^3/\text{min}$  a condiciones estándar. Calcular la pérdida por fricción en el sistema del conducto.

**Solución:** Debido a que el material que está siendo conducido en el sistema del conducto (polvo facial), es ligero, una velocidad de transporte ( $u_t$ ) apropiada en este caso es de  $2,000 \text{ ft}/\text{min}$ . (Véase la Tabla 1.4 anterior). Una vez sustituidos este valor y la razón de flujo volumétrico en la Ecuación 1.27, obtenemos el diámetro del conducto ( $D_d$ ):

$$D_d = 1.128 \left( \frac{15,000}{2,000} \right)^{1/2} = 3.09 \text{ ft}$$

Enseguida, sustituya el diámetro y la velocidad en la Ecuación 1.29 para computar la pérdida por fricción (presión estática) del conducto recto,  $F_d$ :

$$F_d = 0.136 \left( \frac{1}{3.09} \right)^{1.18} \left( \frac{2,000}{1,000} \right)^{1.8} \left( \frac{250}{100} \right) = 0.313 \text{ in. w.c.}$$

El factor 250/100 en esta expresión ajusta la pérdida por fricción desde 100 pies (la base de la ecuación 10.29), hasta 250 pies (la longitud del sistema del conducto en este ejemplo). El resto

de la pérdida por fricción ocurre a través de cinco codos (tres de 90°, dos de 45°), cada uno con un radio de curvatura de 1.50. Estas pérdidas ( $F_c$ ) se computan vía la Ecuación 1.12:

$$F_c = k_\theta VP \quad (1.31)$$

donde

$$\begin{aligned} VP &= (2,000/4,016)^2 \text{ (Ecuación 1.11, rearrreglada)} \\ &= 0.248 \text{ in. w.c.} \end{aligned}$$

Para codos de 90°,  $k_\theta = k_{90} = 0.33$  (promedio del rango de la tabla), y:

$$F_c = 3 \times 0.33 (0.248) = 0.246 \text{ in. w.c.}$$

Para los codos de 45°,  $k_\theta = (45/90)k_{90} = 0.165$  (Ecuación 1.30), y:

$$F_c = 2 \times 0.165(0.248) = 0.0818 \text{ in. w.c.}$$

La pérdida por fricción total es, por lo tanto:

$$F = 0.313 + 0.246 + 0.0818 = 0.641 \text{ in. w.c.}$$

De este ejemplo se pueden hacer dos observaciones: (1) la pérdida de presión estática a través del conducto no es grande, aún con esta longitud (250 pies) y, (2) las pérdidas a través de los codos—las cuales totalizan 0.328 in. w.c.—son mayores que la pérdida en el conducto recto. Aunque puede ser tentador despreciar las pérdidas por los accesorios por cuestión de conveniencia, hacerlo así puede causar un subestimación importante de la pérdida de presión estática en el sistema de ventilación.

### 1.3.4 Procedimientos de Diseño de Chimeneas

Igual que con el sistema de conductos, el diseño de chimeneas implica un número de parámetros de la corriente, estructural y específicos del sitio [46,47] Estos incluyen:

**Variables del gas residual:** razón de flujo volumétrico de entrada, temperatura y composición;

**Datos específicos del sitio:** altura sobre el nivel del mar, fluctuaciones de temperatura ambiente,

datos topográficos y sísmicos, registros meteorológicos y elevaciones y distribución del edificio;

**Parámetros estructurales:** espesor de la pared de la chimenea y del forro, localización de la *breaching opening* (abertura de penetración), tipo de soportes, capacidad de carga de los cimientos, módulos de resistencia y frecuencia de la vibración natural.

Afortunadamente, para propósitos de estudio de estimaciones de costo, los únicos dos parámetros de diseño de la chimenea que necesitan determinarse son: (1) el diámetro de la chimenea y, (2) la altura de la chimenea. Las otras variables (v.g., el espesor de pared) son incorporadas en las correlaciones de costo del equipo. El diámetro de la chimenea es relativamente fácil de determinar, ya que depende fundamentalmente de las condiciones de la corriente residual. Es más difícil de determinar la altura de la chimenea, ya que está influenciada por varias variables específicas del sitio. No obstante, se ha desarrollado una guía amplia para permitir a quién realice la estimación, determinar una altura de chimenea aceptablemente correcta.

#### 1.3.4.1 Calculando el Diámetro de la Chimenea

Debido a que la mayoría de las chimeneas tienen secciones transversales circulares, el diámetro de la chimenea ( $D_s$ , *ft*) puede ser calculado vía la fórmula del diámetro del conducto (Ecuación 1.27):

$$D_s = 1.128 \left( \frac{Q_c}{u_c} \right)^{1/2} \quad (1.32)$$

donde

$$\begin{aligned} u_c &= \text{velocidad de salida de la chimenea (ft/min)} \\ Q_c &= \text{razón de flujo volumétrico de salida (ft}^3\text{/min reales)} \end{aligned}$$

Debe notarse que el diámetro de la chimenea en esta fórmula se mide en la salida de la chimenea y no en la entrada. Esto es porque, por razones estructurales, el diámetro en el fondo de la chimenea típicamente es mayor que el diámetro de la parte superior. Nótese también que la velocidad de salida de la chimenea no iguala necesariamente la velocidad de transporte del conducto. Finalmente,  $Q_c$  puede ser diferente de la razón de flujo volumétrico utilizada para diseñar el tamaño del sistema de conductos. Debido a que la chimenea siempre sigue al dispositivo de control, la razón de flujo de entrada al dispositivo puede no igualar la razón de flujo de entrada a la chimenea, en términos de  $\text{ft}^3\text{/min}$ , ya sean estándar o reales. Por ejemplo, en un incinerador térmico, la razón de flujo estándar del gas residual de salida es casi siempre mayor que la razón de flujo de entrada debido a la adición de combustible suplementario.

La velocidad de salida de la chimenea,  $u_c$ , afecta la altura de la pluma, la distancia que la pluma se eleva por encima de la parte superior de la chimenea una vez que sale. En una chimenea bien diseñada,  $u_c$  debe ser 1.5 veces la velocidad del viento. Típicamente, velocidades de salida de diseño de 3,000 a 4,000 *ft/min* son adecuadas.[48] Este rango corresponde a velocidades del viento de 34 a 45 millas/hr.

#### 1.3.4.2 Calculando la Altura de la Chimenea

La estimación de la altura de la chimenea es más difícil que calcular el diámetro de salida de la chimenea. La altura de la chimenea depende de varias variables: la altura de la fuente; la velocidad de salida de la chimenea; las temperaturas de la chimenea y ambiental; la altura, forma y arreglo de las estructuras cercanas y el terreno; y la composición del gas de salida de la chimenea. Algunas de estas variables se determinan en forma directa, mientras que otras (tales como las dimensiones y arreglo de las estructuras cercanas), son difíciles de determinar sin realizar modelos en el sitio y estudios de monitoreo.

Esta altura tiene dos componentes: la altura de la chimenea misma ( $H_s$ ) y la altura de elevación de la pluma ( $H_{pr}$ ). Juntos estos dos componentes componen la altura efectiva de la chimenea ( $H_e$ ). Esto es:

$$H_e = H_s + H_{pr} \quad (1.33)$$

Sin embargo, el costo de la chimenea es una función de solo  $H_s$ . (Vea la Sección 1.4.) Tal como se discutió anteriormente, la elevación de la pluma es una función de la velocidad de salida de la chimenea. También depende del diferencial de temperatura entre el gas de la chimenea y el aire ambiente. Específicamente, una diferencia de temperatura de 1°F corresponde a un aumento de aproximadamente 2.5-*ft.* en  $H_{pr}$ . [49]

Para aquellas fuentes sujetas a *State Implementation Plans - SIP* (Planes de Implementación Estatal), la altura de la chimenea ( $H_s$ ) debe determinarse de acuerdo a *good engineering practice - GEP* (buenas prácticas de ingeniería). Se define *GEP* como “la altura necesaria para asegurar que las emisiones de la chimenea no resulten en concentraciones excesivas de cualquier contaminante del aire en la vecindad inmediata a la fuente, como resultado de precipitaciones atmosféricas, remolinos o ventarrones que pudieran crearse por la fuente misma, las estructuras cercanas u obstáculos en los terrenos cercanos” [50]. A este respecto, la *GEP* establece el *maximum allowable stack height credit* (crédito máximo permisible de la altura de chimenea), para propósitos de calcular el impacto de la fuente emisora en la calidad del aire ambiental. Una fuente puede construir una chimenea a cualquier altura, pero solo cierta cantidad de la altura de la chimenea será permitida al determinar los impactos ambientales.[51]

Para chimeneas construidas después del 12 de enero de 1979, la altura *GEP* de chimenea debe ser la mayor de (1) 65 metros (213 pies); (2) la altura demostrada por un modelo fluido aprobado o por un estudio de campo que asegure que las emisiones de la chimenea no causan excesivas concentraciones de contaminantes por precipitaciones ambientales, ventarrones, efectos de remolinos, etc.; ó (3) la altura determinada por la siguiente ecuación:[52]

$$H_s = H_b + 1.5L \quad (1.34)$$

donde

- $H_s$  = altura *GEP* de chimenea, medida desde el nivel de la elevación del suelo en la base de la chimenea (*ft*)
- $H_b$  = altura de la(s) estructura(s) cercana(s), medida desde este nivel de elevación del suelo (*ft*)
- $L$  = la dimensión menor (altura o ancho proyectado de la(s) estructura(s) cercana(s))

#### 1.3.4.3 Calculando el Tiro de la Chimenea

Tal como se discutió previamente, el gas residual fluyendo a través de campanas y sistemas de conductos, pierde presión estática debido a la fricción. En el caso de las chimeneas, sin embargo, la corriente de gas realmente puede *ganar* presión estática, como resultado del tiro de la chimenea, el cual es el tiro creado por el diferencial de temperatura entre el gas de la chimenea y el aire ambiente. El tiro de la chimenea ( $SP_s$ , *in. w.c.*) puede calcularse como sigue:<sup>53</sup>

$$SP_s = 0.034 (H_s - H_{br}) p \times \left( \frac{1}{T_{amb}} - \frac{1}{T_{sa}} \right) \quad (1.35)$$

donde

- $H_{br}$  = altura de la penetración de la chimenea (conexión con el conducto de entrada), por arriba de la base de la chimenea (*ft*)
- $p$  = presión barométrica (*in. w.c.*)
- $T_{amb}$  = temperatura ambiente (ER)
- $T_{sa}$  = temperatura promedio del gas en la chimenea (ER)

**Ejemplo:** El gas residual de un incinerador térmico tiene una razón de flujo de salida y una temperatura de 21,700 *ft*<sup>3</sup>/min reales y 550°F, respectivamente. La velocidad máxima del viento en la vecindad es de 42 millas/hr, mientras que las temperaturas de salida de la chimenea y la ambiental son 450°F y 70°F, a su vez. La presión barométrica es 1 atm. (29.92 *in. Hg*). El incinerador está cerca de un edificio de ladrillo de 35-*ft* de alto, mientras que el “ancho proyectado”

de un edificio adyacente es 40 ft. Para que la chimenea disperse el gas del incinerador, calcule (1) la velocidad de salida, (2) el diámetro, (3) la altura, y (4) el tiro, requeridos.

**Solución:**

**Velocidad de salida:** De acuerdo a las instrucciones anteriores, la velocidad debe ser 1.5 veces la velocidad del viento, o:

$$u_c = 1.5 \times 42 \text{ mph} \times 88 \frac{\text{fpm}}{\text{mph}} = 5,540 \frac{\text{ft}}{\text{min}} \quad (1.36)$$

**Diámetro de la chimenea:** La razón de flujo volumétrico de salida se mide a la temperatura de salida de la chimenea, a saber 450°F. Sin embargo, la razón de flujo anterior fue medida a 550°F, la temperatura de salida del incinerador. Corrigiendo a la temperatura de salida de la chimenea, obtenemos:

$$Q_c = \frac{21,700 \times (450 + 460)}{(550 + 460)} = 19,600 \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \text{ reales} \right) \quad (1.37)$$

Sustituyendo estos valores en la Ecuación 1.32:

$$D_s = 1.128 \left( \frac{19,600}{5,540} \right)^{1/2} = 2.12 \text{ ft}$$

**Altura de la chimenea:** Como una primera aproximación, estime la altura *GEP* de la chimenea de la Ecuación 1.33, donde las variables  $H_b$  y  $L$  son 35 ft y 40 ft, respectivamente:

$$H_s = 35 + 1.5(40) = 95 \text{ ft.}$$

Claramente, esta  $H_s$  es menor que la altura *GEP* máxima (213 ft.), así que será utilizada en este ejemplo.

**Tiro de la chimenea:** Todos los datos necesarios para computar el tiro de la chimenea vía la Ecuación 1.35 son conocidas, excepto la altura de penetración de la chimenea,  $H_{br}$ . Sin embargo, se recomienda un mínimo de 5 ft. para este parámetro[54]. Este valor será usado en este cálculo. También, la temperatura promedio de la chimenea es:

$$T_{as} = \frac{(450 + 550)}{2} + 460 = 960^\circ R \quad (1.38)$$

Finalmente, la presión barométrica expresada en pulgadas de agua es:

$$p = 29.92 \text{ in. Hg} \times \frac{13.6 \text{ in. agua}}{\text{in. Hg}} = 407 \text{ in. w.c.} \quad (1.39)$$

Una vez sustituyendo, obtenemos:

$$SP_s = (0.034) (118 - 5) (407) \left[ \frac{1}{70 + 460} - \frac{1}{960} \right] = 1.32 \text{ in. w.c.}$$

## 1.4 Estimando la Inversión de Capital Total

Esta sección presenta la información necesaria para estimar la *total capital investment - TCI* (inversión de capital total) para campanas, sistema de conductos y chimeneas. El *TCI* incluye el *equipment cost - EC* (costo del equipo) para campanas, sistema de conductos o chimenea; impuestos, cargos por fletes; instrumentación (de ser aplicable); y los costos directos y de instalación. Todos los costos se presentan en dólares del segundo trimestre de 1993, y son de exactitud de estimación de “estudio” ( $\pm 30$  por ciento)<sup>2</sup>. Más aún, los costos son para instalaciones de establecimientos nuevos; no se incluyen costos de reconversión.

Los costos de equipo se presentan en la Sección 1.4.1, mientras que los costos de instalación se muestran en la Sección 1.4.2. En cada una de estas secciones, las tres categorías de equipo son cubiertas en subsecciones separadas.

### 1.4.1 Costos de Equipo

Varios proveedores proporcionaron costos (precios) para cada una de las tres categorías de equipos. Sus respuestas reflejaron un rango de tamaños, diseños y materiales de construcción. Estos precios han sido correlacionados contra algún parámetro de diseño fácil de determinar (diseño del tamaño), vía análisis por regresión de mínimos cuadrados. Cada una de estas correlaciones está relacionada con un cierto tipo de equipo (v.g., campanas de toldo circulares), dentro de un rango de tamaño especificado del parámetro en cuestión (v.g., 2 a 200  $ft^2$  de área de entrada). Por esta razón, una correlación de costo no debe extrapolarse fuera del rango especificado del parámetro.

Algunos de los precios proporcionados por los proveedores se relacionan a artículos

---

<sup>2</sup> Para más información acerca de la escalación de precios a dólares actuales, refiérase al reporte de la EPA “*Escalation Indexes for Air Pollution Control Costs*” y sus últimas ediciones los cuales se hallan en el sitio Internet de la EPA debajo de la página *OAQPS Technology Transfer Network (CTC Bulletin Board)*.

“*off-the-shelf*” (en existencia), mientras que otros costos son para equipo fabricado sobre pedido. Los proveedores tienden a especializarse ya sea en artículos en existencia o sobre pedido. La mayoría de las campanas y chimeneas son sobre pedido, fabricadas ya sea en la fábrica del proveedor o construidas en el sitio. Contrariamente, los componentes del sistema de conductos son usualmente artículos en existencia, aunque las piezas grandes tienen que hacerse sobre pedido. (Por supuesto, hay excepciones a esto). Finalmente, todos los precios dados en la siguiente sección son “L.A.B.” (libre a bordo) el proveedor, lo que significa que no incluyen fletes ni impuesto

#### 1.4.1.1 Costos de las Campanas

De todos, cuatro vendedores proporcionaron precios para las campanas.[55] Estos precios cubren los siguientes tipos de campanas:

- Toldo—circular
- Toldo—rectangular

**Table 1.8:** Parámetros para la Ecuación de Costo de la Campana [55]

Tipo de Campana	Material de Fabricación	Parámetro de la Ecuación		Rango de la Ecuación (A, ft <sup>2</sup> )
		a	b	
Toldo-circular	FRP <sup>1</sup>	128	0.577	2-200
Toldo-rectangular	FRP	306	0.506	2-200
Empuje-jale ( <i>push-pull</i> )	FRP	620	0.321	2-200
Succión lateral	FRP	497	0.336	2-200
Succión Transera (Ranurada)	PVC <sup>2</sup>	307	1.43	0.6-2.0 <sup>3</sup>
Succión Transera (Ranurada)	PVC <sup>4</sup>	797	0.504	1.1-2.1
Succión Transera (Ranurada)	PP <sup>5</sup>	653	0.717	1.1-2.1
Succión Transera (Ranurada)	FRP	956	0.519	1.1-2.1
Succión Transera (Ranurada)	Acero galvanizado	688	0.687	0.5-1.3

<sup>1</sup> Plástico reforzado con fibra de vidrio

<sup>2</sup> Cloruro de polivinilo

<sup>3</sup> Para cada campana ranurada, “el rango de la ecuación” denota el rango en el área de las aberturas de la ranura, la cual es mucho menor que el área total de la cara de la campana

<sup>4</sup> Cada campana está equipada con compuertas manuales de las ranuras y cuatro hileras de ranuras.

<sup>5</sup> Polipropileno

- Empuja-jala
- Tiro lateral
- Tiro posterior (ranurada)

Las descripciones y procedimientos de diseño para estas campanas están dadas en las Secciones 1.2.1 y 1.3.2, respectivamente. Tal como se explicó en la Sección 1.3.2, se ha encontrado que los costos de las campanas se correlacionan bien con el área de entrada o de cara de la campana ( $A_f, ft^2$ ). Además, la forma funcional que mejor ajusta la correlación (ecuación) costo-área de cara es la “función potencia”, o:

$$C_h = aA_f^b \quad (1.40)$$

donde

$$\begin{aligned} C_h &= \text{costo de la campana (\$)} \\ a, b &= \text{parámetros de la ecuación de regresión} \end{aligned}$$

Los valores de los parámetros de la ecuación varían de acuerdo al tipo de campana y al material de construcción. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1.8.

**Ejemplo:** Cual sería el costo de la campana de toldo para el tanque de electrodeposición del tamaño diseñado para el ejemplo en la Sección 1.2.2. Suponga que la campana es fabricada de *FRP*.

**Solución:** Recuerde que el área de cara ( $A_f$ ) calculada para la campana fue de  $98.5 ft^2$ . Debido a que ésta es una campana de toldo circular, los parámetros de la ecuación de la Tabla 1.8 son:  $a = 123$  y  $b = 0.575$ . (Note que esta área de campana cae dentro del rango de la ecuación de 2 a  $200 ft^2$ .) Sustituyendo estos parámetros en la Ecuación 1.40, obtenemos:

$$C_h = 123(98.5)^{0.575} = \$1,720.$$

#### 1.4.1.2 Costos del Sistema de Conductos

Varios proveedores proporcionaron precios de sistemas de conductos, también para un rango de tamaños, materiales y diseños.[56] Estos precios cubren las siguientes piezas de equipo:

Sistema de conductos rectos:

Circular

– Hoja de acero (carbón, galvanizada, con y sin aislante; inoxidable 304)

- Placa de acero (carbón, cubierta; inoxidable 304)
- Plástico (*FRP*; *PVC*)

Cuadrado

- Acero (carbón, aluminizado; con y sin aislante)

Codos (90°):

- Acero (carbón, galvanizado, con y sin aislante; inoxidable 304)
- Plástico (*FRP*; *PVC*)

Compuertas:

Mariposa

- Acero (carbón, galvanizado, con y sin aislante)
- Plástico (*FRP*; *PVC*, con y sin actuadores)

Persianas

- Acero (carbón, aluminizado, con y sin actuadores)

De guillotina

- Acero (carbón)
- *PVC*

Estos precios fueron correlacionados por regresión contra el diámetro de la pieza de equipo (conducto recto, codo o compuerta). Las correlaciones por regresión fueron de tres formas: función potencia (principalmente), exponencial y lineal. La Ecuación 1.40 representa la función potencia, mientras que las otras formas son:

$$\text{Exponencial: } C_i = ae^{bD} \quad (1.41)$$

$$\text{Lineal: } C_i = a + bD \quad (1.42)$$

donde

- $C_i$  = costo de la pieza de equipo en cuestión
- $a, b$  = parámetros de regresión
- $D$  = diámetro de equipo

Los parámetros de regresión se enlistan en las Tablas de la 1.9 a la 1.11, junto con la aplicabilidad de los rangos de tamaño para las correlaciones respectivas (Nota: Las correlaciones no deben extrapolarse fuera de estos rangos.) Los siguientes párrafos contienen información adicional acerca de datos de precio y correlaciones:

**Conductos rectos:** Tal como se indicó anteriormente, los proveedores proporcionaron precios para conductos rectos de placa de acero, hoja de acero (con ensamble en espiral o costura

**Tabla 1.9:** Parámetros para la Ecuación de Costo de un Conducto Recto [56]

Tipo de Conducto	Material del Aislante	Espesor Aislante (in.)	Tipo de Ecuación	Parámetro de Ecuación		Rango de la Ecuación (D, in.)
				$\frac{a}{b}$	$\frac{b}{a}$	
Circular-espiral <sup>1</sup>	Sheet-gal CS <sup>2</sup>	Ninguno	Función Potencia	0.322	1.22	3-84
Circular-espiral	Sheet-304 SS <sup>3</sup>	Ninguno	Función Potencia	1.56	1.00	3-84
Circular-espiral	Sheet-galv CS	1	Función Potencia	1.55	0.936	3-82
Circular-espiral	Sheet-galv CS	3	Función Potencia	2.56	0.937	3-82
Circular-longitudinal <sup>4</sup>	Sheet-galv CS	Ninguno	Función Potencia	2.03	0.784	6-84
Circular-longitudinal	Sheet-304 SS	Ninguno	Función Potencia	2.98	0.930	6-84
Circular-longitudinal	Plate-coat CS <sup>5</sup>	Ninguno	Función Potencia	2.49	1.15	6-84
Circular-longitudinal	Plate-304 SS <sup>6</sup>	Ninguno	Función Potencia	6.29	1.23	6-84
Cuadrado	Sheet-alum CS <sup>7</sup>	Ninguno	Lineal	0.254	2.21	18-48
Cuadrado	Sheet-alum CS	4	Lineal	21.1	5.81	18-48

<sup>1</sup> Conducto circular unido en espiral y soldado

<sup>2</sup> Hoja de acero al carbón galvanizado

<sup>3</sup> Hoja de acero inoxidable 304

<sup>4</sup> Conducto circular soldado a lo largo de la costura longitudinal

<sup>5</sup> Placa de acero al carbón con una capa de "shop paint" (pintura de taller)

<sup>6</sup> Placa de acero al carbón 304

<sup>7</sup> Hoja de acero al carbón aluminizado

longitudinal), y de plástico. La mayor diferencia entre los dos tipos de conductos de acero radica en el espesor de pared. El conducto de placa de acero tiene espesor de pared típicamente de 3/16 in. a 1/2 in., mientras que el conducto de hoja de acero varía usualmente de calibre 28 a calibre 10. Como lo muestra la Tabla 1.5, este rango corresponde a espesores de pared de 0.0149 in. a 0.1406 in., respectivamente, aunque los espesores exactos variarán con el tipo de acero utilizado (v.g., carbón vs. inoxidable). También, tal como se discutió en la Sección 1.3.3.2, cada diámetro de conducto puede ser fabricado con un rango de espesores de pared.

La mayoría de los proveedores de conductos de acero proporcionaron precios para un mínimo y un máximo de espesor de pared para un diámetro dado. Sin embargo, para simplificar las cosas para quienes realizan estimaciones de costos, estos precios "bajos" y "altos" fueron primero promediados, y entonces, los precios promedio fueron correlacionados por regresión contra los diámetros. Llegar a un valor promedio fue necesario porque los que realizan estimaciones de costo de estudio usualmente no tienen suficiente información disponible para predecir el espesor

de pared del conducto.

Los precios para ambos conductos de acero inoxidable aislados, circular y cuadrado, estuvieron entre los datos recibidos. El conducto de acero aislado, circular, es de construcción “de pared doble y ensamblado en espiral”, en el cual el aislante es instalado entre las paredes interior y exterior. Los costos fueron proporcionados para ambos espesores de aislante de fibra de vidrio, de 1 pulgada y de 3 pulgadas. Para el conducto cuadrado, los precios fueron dados para aislante de lana de vidrio de 4 pulgadas de espesor, aplicado a la superficie exterior del conducto. Los parámetros de correlación en la Tabla 1.9 reflejan estas especificaciones.

Se recibieron precios para ambos conductos, de acero al carbón (galvanizado, pintado o

**Tabla 1.10:** Parámetros para la Ecuación de Costo de Codos y Compuertas de Acero [56]

Accesorio de la Instalación de Conductos	Material	Tipo de Ecuación	Parámetro de la Ecuación		Rango de la Ecuación (D, in.)
			a	b	
Codos <sup>1</sup>	AC galv <sup>2</sup>	Exponencial	30.4	0.0594	6-84
Codos	Al 304	Exponencial	74.2	0.0668	6-60
Codos-aislados <sup>3</sup>	AC galv	Exponencial	53.4	0.0633	3-78
Codos-mariposa <sup>4</sup>	AC galv	Exponencial	23.0	0.0567	4-40
Compuertas-mariposa/aisladas <sup>5</sup>	AC galv	Exponencial	45.5	0.0597	4-40
Compuertas-persianas	AC alum <sup>7</sup>	Función	78.4	0.860	18-48
Compuertas-persianas c/ actuadores <sup>8</sup>	AC alum	Potencia	208.	0.791	18-48
Compuertas de guillotina	Acero al Carbón	Función	17.2	0.825	3-18
		Potencia			

<sup>1</sup> Codos de 90° de una sola pared, “armados”, sin aislante

<sup>2</sup> Hoja de acero al carbón galvanizado

<sup>3</sup> Codos de 90° de pared doble, armados, con 1 pulgada de aislante de fibra de vidrio

<sup>4</sup> Compuerta de mariposa manual de una sola pared del tipo “*opposed blade*” (“cuchilla opuesta”)

<sup>5</sup> Compuerta de mariposa manual de pared doble de “cuchilla opuesta”, con 1 pulgada de aislante de fibra de vidrio

<sup>6</sup> Compuertas de persianas selladas el 95-98%

<sup>7</sup> Hoja de acero al carbón “aluminizada”

<sup>8</sup> Compuertas de persianas con actuadores eléctricos (controles automáticos).

aluminizado) y de acero inoxidable 304. El conducto de acero al carbón es usado en situaciones donde el acero “medio” es aceptable, mientras que el conducto de acero inoxidable se requiere siempre que la corriente de gas contiene altas concentraciones de sustancias corrosivas.

Los proveedores también dieron precios (Tabla 1.11) para conductos de plástico (*FRP* y *PVC*). Sin embargo, para un diámetro dado, este conducto es fabricado en un solo espesor de pared, el cual varía desde aproximadamente 1/8 in. hasta 1/4 in. Consecuentemente, no se

**Tabla 1.11:** Parámetros para las Ecuaciones de Costo de Instalaciones de Conductos de Plástico [56]

Tipo de Conducto	Material	Tipo de Ecuación	Parámetro de la Ecuación		Rango de la Ecuación (D, in.)
			a	b	
Conducto recto	PVC <sup>1</sup>	Función Potencia	0.547	1.37	6-48
Conducto recto	FRP <sup>2</sup>	Exponencial	11.8	0.0542	4-60
Codos-90°	PVC	Función Potencia	3.02	1.49	6-48
Codos-90°	FRP	Exponencial	34.9	0.0841	4-36
Codos-mariposa	PVC	Función Potencia	10.6	1.25	4-48
Codos-mariposa	FRP	Función Potencia	35.9	0.708	4-36
Codos-mariposa c/ actuadores <sup>3</sup>	PVC	Exponencial	299.	0.0439	4-48
Compuertas de guillotina	PVC	Función Potencia	8.14	1.10	4-48

<sup>1</sup> Cloruro de polivinilo

<sup>2</sup> Plástico reforzado con fibra de vidrio

<sup>3</sup> Compuertas de mariposa con actuadores neumáticos (controles automáticos). Todas las demás compuertas listadas en esta tabla son controladas manualmente.

requiere que quién realice la estimación seleccione un espesor de pared cuando costee conductos de plástico.

**Codos:** También fueron presentados los precios para codos de 90° de hoja de acero y de plástico. Los codos de hoja de acero fueron codos en forma triangular (seccionados), fabricados de cinco piezas de metal soldadas juntas. Igual que el conducto derecho, los codos de acero fueron cotizados para dos espesores de pared: “mínimo” y “máximo”. Estos precios fueron promediados antes de ser correlacionados por regresión contra el diámetro del codo. Los precios también fueron dados para codos de acero al carbón galvanizado (con y sin aislante de fibra de vidrio de 1 pulgada) y para codos de acero inoxidable 304. Los parámetros de correlación para codos de acero están listados en la Tabla 1.10.

También fueron dados los costos para ambos codos de 90°, de PVC y de FRP. Las «eles» de PVC fueron fabricadas de tres secciones (“inglete de tres piezas”), mientras que los codos de FRP fueron accesorios moldeados de una sola pieza. Igual que con el conducto recto de plástico, cada codo de un diámetro dado fue fabricado en un solo espesor de pared. La Tabla 1.11 contiene los parámetros de correlación para codos de plástico.

**Compuertas:** Se obtuvieron precios para tres tipos de compuertas: de mariposa, de persianas y de guillotina. Las compuertas de mariposa de acero al carbón galvanizado fueron cotizadas con y sin aislante de fibra de vidrio de 1 pulgada, mientras que los precios para compuertas de persianas de acero al carbón aluminizado fueron basados en control ya sea manual o automático (vía actuadores eléctricos). Similarmente, las compuertas de mariposa de PVC fueron manuales o equipadas con actuadores neumáticos. Ambas compuertas de guillotina, de acero al carbón y de PVC fueron manuales. Los parámetros de correlación para las compuertas de acero y de plástico se muestran en las Tablas 1.10 y 1.11, a la vez.

**Ejemplo:** Un filtro de tela manejando  $16,500 \text{ ft}^3/\text{min}$  de gas residual a  $200^\circ\text{F}$ , cargado con polvo de cocoa no corrosivo, está localizado 95 pies a un lado de, y 25 pies arriba de la fuente de emisión (un horno de secado). Se requerirán un conducto recto con cuatro codos de  $90^\circ$  (todos fabricados de hoja de acero al carbón galvanizado, ensamblados en espiral) y una compuerta de mariposa (también de AC galvanizado), para conducir el gas desde la fuente hasta el dispositivo de control. Suponga que el sistema del conducto contiene aislante de 1 pulgada de espesor para prevenir condensación. Estime el costo de estas piezas.

**Solución:** Primero, determine el diámetro del conducto recto, de los codos y de la compuerta. De la Tabla 1.4, la velocidad de transporte mínima ( $u_t$ ) para polvo de cocoa es de  $3,000 \text{ ft}/\text{min}$ . Sustituyendo este valor y la razón de flujo volumétrico de gas en la Ecuación 1.27, obtenemos:

$$D_d = 1.128 \left( \frac{16,500}{3,000} \right)^{1/2} = 2.65 \text{ ft} = 31.7 \text{ in.}$$

Enseguida, obtenga los costos de las piezas del sistema del conducto como sigue:

**Sistema de Conductos Rectos:** De la Tabla 1.9, seleccione los parámetros de la ecuación para conducto circular galvanizado ensamblado en espiral (1 pulgada de aislante) y sustitúyalos y el diámetro en el tipo de ecuación apropiado (función potencia, Ecuación 1.40).

$$\text{Costo del conducto recto} \left( \frac{\$}{\text{ft}} \right) = 1.55 (31.7)^{0.936} = \frac{\$39.4}{\text{ft}}$$

sin embargo, se requieren un total de  $115 \text{ ft}$  ( $95 + 20$ ) de conducto, así:

$$\text{Costo del conducto recto} = \frac{\$39.4}{\text{ft}} \times 115 \text{ ft} = \$4,531$$

**Codos:** Los parámetros de correlación de la Tabla 1.10 para codos aislados de acero al carbón

galvanizado son 53.4 (a) y 0.0633 (b). Sin embargo, la forma de la correlación por regresión es exponencial (Ecuación 1.47). Así:

$$\text{Costo del codo (\$)} = 53.4 e^{0.0633 (31.7)} = \$397 \text{ c / u.}$$

para cuatro codos, el costo es:  $\$397 \times 4 = \$1,588$ .

**Compuerta:** también de la Tabla 1.10, seleccione los parámetros de correlación para “compuertas-mariposa/aisladas” de acero al carbón galvanizado y sustituya en la Ecuación 1.47:

$$\text{Costo de la compuerta (\$)} = 45.5 e^{0.0597 (31.7)} = \$302$$

después de sumar los tres costos anteriores, obtenemos:

$$\text{Costo total del sistema del conducto} = \$6,421 \approx \$6,420$$

#### 1.4.1.3 Costos de la Chimenea

Los precios para chimeneas cortas de acero y de PVC fueron obtenidos de cuatro proveedores.[57] Los costos de la chimenea de acero fueron para las fabricadas de acero al carbón e inoxidable 304, de ambas, placa y hoja de metal. Igual que con el sistema de conductos, la diferencia entre hoja de metal y placa radica en el espesor. Para estas chimeneas, el espesor de la hoja de metal varía de calibre 18 a 16 (0.05 a 0.06 pulgadas aproximadamente). Los espesores de la placa de metal fueron considerablemente mayores: 0.25 a 0.75 pulgadas, un hecho que las hace más resistentes al viento y a otras cargas que las chimeneas fabricadas de hoja de acero. Esto es especialmente cierto para chimeneas altas. El principal inconveniente es que las chimeneas de placa de acero son más costosas que las fabricadas de hoja de acero.

Otra característica que aumenta el costo es el aislante. Como lo muestran los parámetros de correlación (Tabla 2.12), las chimeneas aisladas cuestan hasta tres veces más por pie que las no aisladas. Con o sin aislante, una típica chimenea corta (15 *ft.*), de acero, consiste de los siguientes componentes:[58]

- Conducto de costura longitudinal (sección de 12 pies)
- Accesorio reductor (3 pies)
- Bandeja de escurrimiento
- Plato de soporte (1/4 de pulgada, soldado a la chimenea)
- Parte superior cuadrangular (para conectarla a la descarga del ventilador)
- Anillo (para sujetar los cables tensores)

Las chimeneas más altas pueden requerir componentes adicionales, tales como escaleras y plataformas, cables tensores y luces de advertencia para las aeronaves. (Véase la Sección 1.2.3.). La Tabla 1.12 enlista los parámetros y rangos aplicables a las correlaciones de costos de las chimeneas. Las correlaciones cubren chimeneas cortas de PVC y chimeneas más altas fabricadas de placa de acero (tipo al carbón e inoxidable 304) y de hoja de acero (aislada y sin aislar). Excepto por tres diseños de hoja de acero de pared doble, estas chimeneas son de construcción de una sola pared. Nótese que todas las correlaciones son funciones potencia. También nótese que las ecuaciones se aplican a varios rangos de altura de chimenea. En todas menos una de estas ecuaciones, el costo se expresa en  $\$/ft$  de altura de chimenea. La excepción es la ecuación de costo para chimenea de hoja de acero al carbón, aislada, de altura variando de 30 a 75 pies. En esta ecuación el costo está expresado en \$.

Esta última ecuación de costo es diferente en otro respecto. Las otras seis ecuaciones en la Tabla 1.12, correlacionan el costo de chimenea ( $\$/ft$ ) con el diámetro de chimenea ( $D_s$ , in.). Sin embargo, estas siete ecuaciones correlacionan el costo de chimenea con el área superficial de chimenea ( $S_s, ft^2$ ), una variable que incorpora ambos, el diámetro de la chimenea y la altura de la chimenea ( $H_{s,ft}$ ). El área superficial se calcula vía la siguiente ecuación:

**Tabla 1.12:** Parámetros para las Ecuaciones de Costo de Chimeneas [54]

Material	Parámetros de la Ecuación <sup>1</sup>		Rango de la Ecuación	
	<i>a</i>	<i>b</i>	$D_s$ (in) <sup>2</sup>	$H^3$ (ft) <sup>3</sup>
PVC <sup>4</sup>	0.393	1.61	12-36	≤10
Placa de AC recubierta <sup>5</sup>	3.74	1.16	6-84	20-100
Placa AI 304 <sup>6</sup>	12.0	1.20	6-84	20-100
Hoja AC galvanizada <sup>7</sup>	2.41	1.15	8-36	≤75
Hoja AI 304 <sup>8</sup>	4.90	1.18	8-36	≤75
Hoja AC aislada/DP <sup>9</sup>	143.	0.402	18-48	≤15
Hoja AC no aislada/DP <sup>10</sup>	10.0	1.03	18-48	≤15
Hoja AC aislada/DP <sup>11</sup>	142.	0.794	24-48	30-75

<sup>1</sup> Todos los costos son funciones potencia. (Vea la Ecuación 2.44) Excepto donde se indique, los costos se expresan en términos de  $\$/ft$  de altura de chimenea.

<sup>2</sup> Rango de diámetro de chimenea al cual se aplica cada ecuación.

<sup>3</sup> Rango de altura de chimenea al cual se aplica cada ecuación.

<sup>4</sup> Cloruro de polivinilo.

<sup>5</sup> Placa de acero al carbón con una cubierta de "shop paint" ("pintura de taller")

<sup>6</sup> Placa de acero inoxidable 304.

<sup>7</sup> Hoja de acero al carbón, galvanizada.

<sup>8</sup> Hoja de acero inoxidable 304.

<sup>9</sup> Hoja de acero al carbón aluminizado cubierta con 4 pulgadas de aislante de fibra de vidrio (construcción de doble pared).

<sup>10</sup> Hoja de acero al carbón aluminizada no aislada (construcción de doble pared).

<sup>11</sup> Los costos para estas chimeneas se expresan en \$, y se correlacionan con el área superficial de la chimenea ( $S_s, ft^2$ ).

$$S_s = \left( \frac{\pi}{12} \right) D_s H_s \quad (1.43)$$

donde

1/12 = factor de conversión del diámetro de chimenea ( $D_s$ )

**Ejemplo:** Estime el costo de la chimenea del tamaño diseñado en el ejemplo de la Sección 1.3.4.3.

**Solución:** Recuerde que las dimensiones de la chimenea eran:  $H_s = 95 \text{ ft}$  y  $D_s = 2.12 \text{ ft} = 25.4 \text{ in}$ . Ambas dimensiones caen dentro de los rangos de las correlaciones de costo para chimeneas de placa de acero. Debido a que el ejemplo previo no indicó si el gas residual era o no corrosivo, estimaremos los precios para ambas chimeneas, de acero al carbón y de placa de acero inoxidable 304.

Una vez sustituyendo los parámetros de la ecuación y las dimensiones de la chimenea en la Ecuación 1.40, obtenemos:

$$\text{Precio (acero al carbón)} = 3.74 (25.4)^{1.16} \left( \frac{\$}{\text{ft}} \right) \times 95 \text{ ft} = \$15,100$$

$$\text{Precio (inoxidable 304)} = 12.0 (25.4)^{1.20} \left( \frac{\$}{\text{ft}} \right) \times 95 \text{ ft} = \$55,300$$

Nótese que el precio de la chimenea de acero inoxidable es casi cuatro veces el de la chimenea de acero al carbón. En vista de esta diferencia, quién realiza la estimación necesita obtener más información de las propiedades de la corriente de gas residual, para que el/ella pueda seleccionar el material de fabricación de la chimenea más conveniente. Claramente, sería un uso muy pobre de los fondos instalar una chimenea de acero inoxidable donde no sea necesaria.

## 1.4.2 Impuestos, Fletes y Costos de Instrumentación

Los cargos por impuestos (sobre venta, etc.) y por fletes, se aplican a las campanas, sistemas de conductos y chimeneas, tal como se aplican a los dispositivos de control que soportan estos auxiliares. Tal como se discutió en la Sección 1, Capítulo 2, estos costos varían, respectivamente, de acuerdo a la localización de los sistemas de ventilación y a la distancia del sitio al proveedor. 3% (impuestos) y 5% (fletes) son valores típicos del costo total de equipo.

Contrario a los dispositivos de control, los sistemas de ventilación generalmente no tienen

instrumentación. La excepción sería un actuador eléctrico o mecánico de una compuerta de mariposa o de persianas. En tal caso, sin embargo, el costo del instrumento (actuador y auxiliares), sería incluido en el precio de la compuerta. Así, no se incluye el costo de instrumentación suplementaria.

### 1.4.3 Costo de Equipo Comprado

Con sistemas de ventilación, el *purchased equipment cost*,  $PEC_t$  (costo de equipo comprado), es la suma de los costos de equipo, impuestos y fletes. Incorporando los valores típicos listados en la Sección 1.4.2, obtenemos:

$$PEC_t = EC_t + 0.03(EC_t) + 0.05(EC_t) = 1.08(EC_t) \quad (1.44)$$

donde

$EC_t$  = costo total de la(s) campana(s), sistema de conductos y chimenea(s)

### 1.4.4 Costos de Instalación

Cuando se hace una estimación de costo para un sistema de control de la contaminación del aire de acuerdo al procedimiento de este manual, quién realiza la estimación determina primero el costo del dispositivo de control, luego estima los costos de tales auxiliares como la campana, el sistema del conducto, la chimenea, el ventilador y motor y otras piezas. A estos costos, el/ella agrega los costos de la instrumentación, impuestos y fletes, para obtener el  $PEC$ . Finalmente, quién realiza la estimación multiplica el  $PEC$  por el factor de instalación apropiado al dispositivo de control (v.g., 2.20 para absorbedores de gas), para obtener la inversión de capital total. En estos casos, el factor de instalación incorpora todos los costos directos e indirectos necesarios para instalar y arrancar el equipo del sistema de control, incluyendo, por supuesto, la campana, el sistema del conducto y la chimenea (Véase las Secciones de la 3 a la 6 para más información acerca de estos factores.)

Por esta razón, usualmente es necesario estimar el costo de instalación del sistema de ventilación separadamente. Sin embargo, puede haber ocasiones donde una campana, una chimenea o un sistema de conductos tenga que instalarse solo, ya sea como equipo de reemplazo o para aumentar el sistema de ventilación existente. En esos casos, quién realiza la estimación puede querer estimar el costo de instalar esta pieza.

Como pudiera imaginarse, estos costos de instalación varían considerablemente, de acuerdo a la localización geográfica, tamaño y distribución del establecimiento, diseño del equipo y otras variables diversas. No obstante, algunos de los proveedores (y un colega revisor [59]), proporcionaron factores para campanas y sistemas de conductos, los cuales, cuando se multiplican por sus costos de equipo comprado respectivos, producirán costos de instalación aproximados.

Estos son:

- Campanas: 50 a 100%
- Sistema de conductos: 25 a 50%

Si uno o ambos de estos últimos factores es utilizado, la inversión de capital total ( $TCI$ ) de la campana y/o del sistema de conductos, sería:

$$TCI = (1 + IF_{h/d}) \times PEC_{h/d}$$

donde

$$\begin{aligned} IF_{h/d} &= \text{factor de instalación de la campana}(h)/\text{sistema de conductos}(d) \\ PEC_{h/d} &= \text{costo de equipo comprado de la campana}(h)/\text{sistema de conductos}(d) \end{aligned}$$

## 1.5 Estimando el Costo Total Anual

### 1.5.1 Costos Directos Anuales

Los sistemas de ventilación incurren en pocos, si algunos, costos directos anuales, ya que funcionan para soportar a los dispositivos de control. No hay costos de mano de obra de operación o de supervisión, de materiales de operación ni de tratamiento/disposición asignados a sistemas de ventilación. Los costos de mantenimiento también serían mínimos, excepto por gastos menores tales como pintura, reparación del aislante o calibración de los controles automáticos de la compuerta. Los únicos costos de servicios serían la electricidad adicional necesaria para que la corriente del gas residual venza a la presión estática en la campana, sistema de conductos y en la chimenea.<sup>3</sup> El costo de la electricidad adicional ( $C_c$ , \$/año) puede calcularse como sigue:

$$C_c = (1.175 \times 10^{-4}) \frac{p_c Q F_d \theta}{\epsilon} \quad (1.46)$$

donde

$$p_c = \text{precio de la electricidad (\$/kwh)}$$

---

<sup>3</sup> Técnicamente, este costo directo anual debe ser asignado al ventilador del sistema de extracción, no a la campana, sistema de conductos, y chimenea. La ecuación de potencia de ventilador será incluida en la sección del Manual que aborde el tema de ventiladores. Sin embargo, como no se ha escrito esta sección todavía, se ha proporcionado esta ecuación como una conveniencia temporal a los usuarios del Manual.

- $Q$  = razón de flujo de gas ( $ft^3/min$  reales)  
 $F$  = caída de presión estática a través del sistema de ventilación ( $in. w.c.$ )  
 $\theta$  = factor de operación (hr/año)  
 $\epsilon$  = eficiencia combinada ventilador/motor

**Ejemplo:** En el ejemplo anterior del sistema de ventilación de la fábrica de cosméticos (Sección 1.3.3.3), ¿cual sería el costo de la electricidad consumida por el ventilador necesario para conducir el gas a través del sistema de conductos? Suponga un precio de la electricidad de \$0.075/kwh, una eficiencia combinada ventilador/motor de 0.6 y un factor de operación de 8,000-hr/año.

**Solución:** Recuerde que la caída de presión y la razón de flujo de gas para este ejemplo eran 0.313  $in. w.c.$  y 15,000  $ft^3/min$  reales, respectivamente. Una vez sustituyendo estos valores y los otros parámetros en la ecuación 10.40, obtenemos:

$$C_c = (1.175 \times 10^{-4}) (0.075) (15,000) (0.313) (8,000)/0.6 = \$552/\text{año}.$$

## 1.5.2 Costos Indirectos Anuales

Los costos indirectos anuales para un sistema de ventilación incluyen a los costos de

**Tabla 1.13:** Ecuaciones de Cálculo para Costos Indirectos Anuales

Costo Indirecto Anual	Ecuación de Cálculo
Impuestos prediales	0.01 x TCI
Seguro	0.01 x TCI
General y Administrativos	0.02 x TCI
Recuperación de Capital	CFR x TCI

impuestos prediales, seguros, generales y administrativos ( $G\&A$ ) y de recuperación de capital. (No se consideran *overhead* (otros gastos)—un quinto costo indirecto anual—porque se ha tomado como un factor de la suma los costos de mano de obra de operación, supervisión y mantenimiento y de los materiales de mantenimiento, el cual es despreciable). Cuando un sistema de ventilación es parte de un sistema de control, estos costos se incluyen en el costo indirecto anual del sistema de control. Sin embargo, si se ha diseñado el tamaño y costado el equipo de ventilación separadamente, estos costos pueden computarse de la inversión de capital total ( $TCI$ ), vía factores estándar, como sigue:

El término “*CRF*” en la ecuación de recuperación de capital es el *capital recovery factor* (factor de recuperación de capital), el cual es una función de la vida económica del sistema de ventilación y de la tasa de interés cargada a la inversión de capital total (Véase la Sección 1, Capítulo 2 de este Manual para más discusión del *CRF* y de la fórmula usada para computarlo).

Para un sistema de ventilación, la vida económica varía de al menos 5 a 10 años a 15 a 20 años o más. [60,61] En general, el equipo de ventilación debe durar tanto como el sistema de control que soporta. Tal como se discutió en la Sección 1, Capítulo 2, la tasa de interés usada en el cálculo del *CFR* debe ser “una tasa de retorno marginal (real), antes del impuesto”, que sea apropiada para el inversionista. Sin embargo, para esos análisis de costos relacionadas con las regulaciones gubernamentales, debe usarse una tasa de interés (descuento) “social” apropiada. Para estos tipos de análisis, la *Office of Management and Budget - OMB* (Oficina de Administración y Presupuesto), ordena que se use una tasa anual de interés real de 7%. [62] (Esta reemplaza la tasa de 10% que la *OMB* había ordenado previamente)

### 1.5.3 Costo Total Anual

El *total annual cost - TAC* (costo total anual) se calcula sumando los *direct costs - DC* (costos directos) (*DC*) e *indirect costs - IC* (costos indirectos) anuales:

$$TAC = DC + IC \quad (1.47)$$

## 1.6 Reconocimientos

Varias firmas e individuos proporcionaron información técnica y de costos muy útil para este capítulo. El más importante de estos fue Todd N. Stine de United McGill Corporation (Raleigh, NC), quién proporcionó precios actuales para una variedad de piezas de sistemas de conductos, así como un catálogo exhaustivo de productos y un manual de ingeniería de diseño. Además, el Sr. Stine pacientemente contestó las muchas preguntas del autor, proporcionando datos adicionales cuando se le requirió. Samir Karandikar de EPCON Industrial Systems (The Woodlands, TX) y Gregory P. Michaels de Piping Technology & Products (Houston, TX), también fueron de mucha ayuda al proporcionar datos y responder a las preguntas.

El autor quisiera también agradecer a las siguientes firmas por sus valiosas contribuciones:

- Air Plastics, Inc. (Mason, OH)
- General Resource Corporation (Hopkins, MN)
- Harrington Industrial Plastics, Inc. (Chino, CA)

- Intellect Systems & Marketing, Inc. (Bohemia, NY)
- Wer-Coy Metal Fabrication Co. (Warren, MI)

Además, varios individuos revisaron el borrador del capítulo y proporcionaron valiosas sugerencias, información adicional o ambas. Los colegas revisores de la *EPA*, todos localizados en Research Triangle Park, NC, fueron:

- James C. Berry (*OAQPS/ESD*)
- Peter A. Eckhoff (*OAQPS/TSD*)
- Norman Kaplan (*ORD/AEERL*)
- James H. Maysilles (*OAQPS/ESD*)
- Larry Sorrels (*OAQPS/ESD*)

Finalmente, Howard Goodfellow de Goodfellow Consultants, Inc. (Mississauga, Ontario, Canada), también revisó esta sección y proporcionó comentarios útiles.

## Referencias

- [1] Goodfellow, H.D. “Ancillary Equipment for Local Exhaust Ventilation Systems”. In: *Air Pollution Engineering Manual*. New York, NY: Van Nostrand Reinhold/Air and Waste Management Association. 1992, pp. 155-205.
- [2] Burton, D. Jeff. *Industrial Ventilation Work Book*. Salt Lake City: DJBA, Inc. 1989.
- [3] *The Measurement Solution: Using a Temporary Total Enclosure for Capture Efficiency Testing*. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency. August 1991 (EPA-450/4-91-020), pp. 3,11.
- [4] *The Measurement Solution*, pp. 11-29.
- [5] Heinsohn, Robert Jennings. *Industrial Ventilation: Engineering Principles*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [6] Telephone conversation between William M. Vatauvuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC) and Todd N. Stine, United McGill Company

- (Raleigh, NC), May 24, 1993.
- [7] *Thermoplastic Duct (PVC) Construction Manual, 2nd Edition 1994*. Vienna, VA: Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association, Inc. (SMACNA). May 1987, pp. 61-85.
- [8] *Thermoplastic Duct Construction Manual*, p. 64.
- [9] Burton, p. 6-7.
- [10] *Dust Control System Accessories Price List*. Huntington Park, CA: Murphy-Rodgers, Inc. July 1992.
- [11] *Price and Data Catalog: Standard Ductwork Components*. Warren, MI: Wer-Coy Metal Fabrication Co. 1992-93.
- [12] Letters from Samir Karandikar, EPCON Industrial Systems (Woodlands, TX) to William M. Vatavuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). May 21 and June 9, 1993.
- [13] "Double Wall Insulated Duct and Fittings." In: *Sheet Metal Division Catalog*. Groveport, OH: United McGill Corporation. 1990.
- [14] "Single-Wall Round and Flat Oval Duct and Fittings." In: *Sheet Metal Division Catalog*. Groveport, OH: United McGill Corporation. 1990.
- [15] *HVAC Duct Construction Standards: Metal and Flexible*. Vienna, VA: Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association, Inc. (SMACNA). 1985, pp. 2-15 to 2-17.
- [16] Wherry, T.C. and Peebles, Jerry R., "Process Control". In: *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Sixth Edition. New York, NY: McGraw-Hill, Inc. 1984.
- [17] Product catalog. Rio, WI: Gaskets, Inc. 1994.
- [18] *HVAC Duct Construction Standards*, pp. 4-2 to 4-3.
- [19] *HVAC Duct Construction Standards*, pp. 4-2 to 4-7.
- [20] Letter from Howard D. Goodfellow, Goodfellow Consultants (Mississauga, Ontario, Canada) to William M. Vatavuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). February 23, 1994.

- [21] *Guide for Steel Stack Design and Construction*. Vienna, VA: Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association, Inc. (SMACNA). 1983.
- [22] Goodfellow, pp. 192-193.
- [23] Goodfellow, p. 193.
- [24] Peters, Max S. and Timmerhaus, Klaus D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Third Edition. New York: McGraw-Hill, Inc., 1980, pp. 508-510.
- [25] Burton, pp. 2-10 to 2-11.
- [26] Burton, p. 2-11.
- [27] Burton, pp. 4-5 to 4-8.
- [28] Burton, p. 5-12.
- [29] Burton, pp. 5-15 to 5-16.
- [30] Burton, p. 5-5.
- [31] Burton, pp. G-2, G-5.
- [32] Burton, p. 5-18.
- [33] Vatavuk, William M. and Neveril, Robert B., "Estimating Costs of Air-Pollution Control Systems, Part III: Estimating the Size and Cost of Pollutant Capture Hoods," *Chemical Engineering*, December 1, 1980, pp. 111 to 115.
- [34] Telephone conversation between William M. Vatavuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC) and Dennis Woll, Air Plastics, Inc. (OH), August 10, 1993.
- [35] Telephone conversation between William M. Vatavuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC) and Pat Caputo, Intellect Systems & Marketing, Inc. (Bohemia, NY), October 22, 1993.
- [36] Burton, "Chart 9".
- [37] Letter from Todd N. Stine, United McGill Corporation (Raleigh, NC) to William M. Vatavuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). June 10,

1993.

- [38] Green, Don W. and Maloney, James O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Sixth Edition. New York, NY: McGraw-Hill, Inc. 1984.
- [39] Peters, Max S. and Timmerhaus, Klaus D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Fourth Edition. New York, NY: McGraw-Hill, Inc. 1991.
- [40] *Engineering Design Reference Manual for Supply Air Handling Systems*. Groveport, OH: United McGill Corporation. 1992, pp. 34.
- [41] *Engineering Design Reference Manual*, p. 8.
- [42] Burton, "Chart 5".
- [43] *Engineering Design Reference Manual*, p.7.
- [44] Burton, p. 6-6.
- [45] Burton, "Chart 13".
- [46] Goodfellow, p. 193.
- [47] *Guide for Steel Stack Design and Construction*, pp. 39 to 50.
- [48] Goodfellow, p. 193.
- [49] Carlton-Jones, Dennis and Schneider, H.B., "Tall Chimneys," *Chemical Engineering*, October 14, 1968, p. 167.
- [50] *Guideline for Determination of Good Engineering Practice: Stack Height (Technical Support Document for Stack Height Regulations) (Revised)*. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency. June 1985 (NTIS PB-85-225241), p.1.
- [51] *Guideline for Determination of Good Engineering Practice*, pp. 50-51.
- [52] *Guideline for Determination of Good Engineering Practice*, pp. 1-2.
- [53] Goodfellow, p. 194.
- [54] *Guide for Steel Stack Design and Construction*, p. 4.

- [55] Hood cost data request responses from four hood vendors to William M. Vatauvuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). June-July 1993.
- [56] Ductwork cost data request responses from six vendors to William M. Vatauvuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). May-July 1993.
- [57] Stack cost data request responses from four vendors to William M. Vatauvuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). May-July 1993.
- [58] *Op. cit.*, Stine-Vatauvuk letter, June 10, 1993.
- [59] Goodfellow-Vatauvuk letter.
- [60] Goodfellow-Vatauvuk letter.
- [61] Telephone conversation between William M. Vatauvuk, U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC) and Todd N. Stine, United McGill Company (Raleigh, NC), December 10, 1993.
- [62] Darman, Richard. *Guidelines and Discount Rates for Benefit-Cost Analysis of Federal Programs (OMB Circular No. A-94 Revised)*. Washington, DC: Office of Management and Budget. October 29, 1992.

## TECHNICAL REPORT DATA

(Please read Instructions on reverse before completing)

1. REPORT NO. <b>452/B-02-002</b>	2.	3. RECIPIENT'S ACCESSION NO.
4. TITLE AND SUBTITLE  <b>Manual de Costos de Control de Contaminacion del Aire de la EPA</b>	5. REPORT DATE <b>July, 2002</b>	
	6. PERFORMING ORGANIZATION CODE	
7. AUTHOR(S) <b>Daniel Charles Mussatti</b>	8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO.	
9. PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS <b>U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Standards and Strategies Division Innovative Strategies and Economics Group Research Triangle Park, NC 27711</b>	10. PROGRAM ELEMENT NO.	
	11. CONTRACT/GRANT NO.	
12. SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS  <b>Director Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711</b>	13. TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED <b>Final</b>	
	14. SPONSORING AGENCY CODE <b>EPA/200/04</b>	
15. SUPPLEMENTARY NOTES <b>Updates and revises EPA 453/b-96-001, OAQPS Control Cost Manual, fifth edition (in English only)</b>		
16. ABSTRACT <b>In Spanish, this document provides a detailed methodology for the proper sizing and costing of numerous air pollution control devices for planning and permitting purposes. Includes costing for volatile organic compounds (VOCs); particulate matter (PM); oxides of nitrogen (NOx); SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, and other acid gases; and hazardous air pollutants (HAPs).</b>		
17. KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS		
a. DESCRIPTORS	b. IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS	c. COSATI Field/Group
<b>Economics Cost Engineering cost Sizing Estimation Design</b>	<b>Air Pollution control Incinerators Absorbers Adsorbers Filters Condensers Electrostatic Precipitators Scrubbers</b>	
18. DISTRIBUTION STATEMENT  <b>Release Unlimited</b>	19. SECURITY CLASS ( <i>Report</i> ) <b>Unclassified</b>	21. NO. OF PAGES <b>1,400</b>
	20. SECURITY CLASS ( <i>Page</i> ) <b>Unclassified</b>	22. PRICE