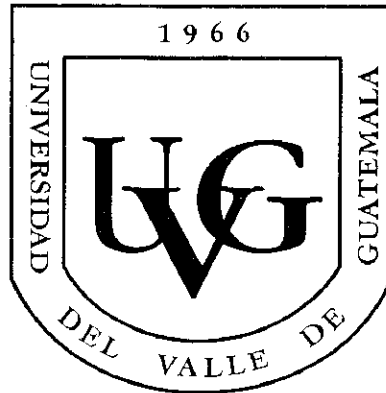


**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.**

Facultad de Ciencias y Humanidades.  
Departamento de Ingeniería Química.



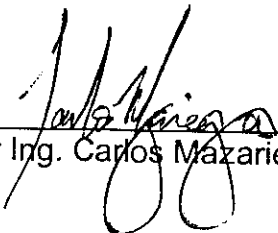
**Diseño de un sistema de colección  
de polvo para una planta de dentríficos.**

**Julio Roberto Mejicano Lazo.**

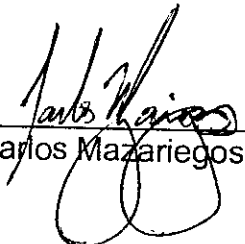
Trabajo de graduación presentado para optar al grado  
académico de Licenciado en Ingeniería Química.

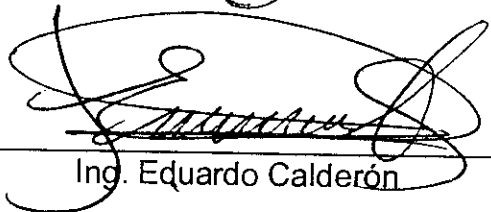
Guatemala, 2003.

Vo. Bo.

(f)   
Asesor Ing. Carlos Mazariegos

Tribunal:

(f)   
Ing. Carlos Mazariegos

(f)   
Ing. Eduardo Calderón

(f)   
Ing. Cristián Rossi

Fecha de aprobación: 04/06/2003

## RESUMEN

El trabajo de graduación consiste en el diseño de un sistema de colección de polvo para una planta específica de dentífricos. Se diseñaron dos sistemas separados, para recolectar independientemente los polvos generales de la planta y el polvo de una materia prima tóxica. Esto permitirá descartar adecuadamente el material tóxico, evitando contaminación ambiental.

Se inició el estudio con la evaluación de la planta de dentífricos. Se determinaron los puntos donde se emitían contaminantes en forma de polvo. Se estudió la operación que se realiza en cada uno de ellos, debido a que una de las principales fallas en los sistemas de colección de polvos es que interrumpen el trabajo, por lo que son desconectados.

Se determinó que se diseñarían dos sistemas de ventilación de extracción local. Estos sistemas remueven una baja cantidad de aire para extraer los contaminantes antes de llegar al área de respiración de los trabajadores.

El sistema de colección de polvo para las operaciones de la planta (no el de pesado de fluoruros) se diseñó para que tenga una alta eficiencia y para que no sea dañado por las características abrasivas de los polvos. También se diseñó con un sistema de limpieza que facilita su operación y que permite trabajarlo de manera continua.

Se determinó que el sistema de colección de polvo de fluoruros debe generar una presión de succión de 1.0 KPa, un flujo volumétrico de succión de  $1.18 \text{ m}^3/\text{seg}$  y tener un área de filtración (en el dispositivo de limpieza de aire) de  $58 \text{ m}^2$ . El sistema de colección de polvo del resto de la planta debe generar una presión de succión de 6.21 KPa, un flujo volumétrico de succión de  $7.33 \text{ m}^3/\text{seg}$  y tener un área de filtración de  $361 \text{ m}^2$ .

Se cotizó el sistema de colección de polvo. Se determinó que el colector seleccionado cumple con los requerimientos del sistema para pesado de fluoruros. Para el sistema general de la planta se recomendó un colector que cumple con el diseño, es de alta calidad, un precio bajo, y el tiempo de entrega es razonable.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Antecedentes	3
A. Propósito de la recolección de polvo	3
B. Mecanismos para la recolección de polvo	3
C. Funcionamiento de los colectores de polvo	4
D. Diseño del recolector de polvo	5
E. Equipos de recolección de polvo	5
1. Cámaras de gravedad	5
2. Separadores por choque	6
3. Separadores de ciclón	6
4. Separadores mecánicos centrífugos	6
5. Depuradores de partículas	7
6. Filtros de tela	7
7. Filtros de lecho granular	9
8. Filtros de aire	9
9. Precipitadores eléctricos	9
F. Ventilación Industrial	10
1. Efectos a la salud	11
2. Estándares y códigos.	12
3. Pautas de investigación .	12
G. Criterios de selección para sistemas de extracción local y general	21
H. Diseño de un sistema de ventilación por extracción local	21
1. Capillas	22
2. Conductos	26
3. Cálculo de pérdida de presión en la capilla, en conductos y cálculo de la presión estática del sistema	27
4. Ventiladores	30
5. Motor	35
6. Filtro	37
7. Chimenea	37

III. Justificación	39
IV. Objetivos	40
A. Objetivos generales	40
B. Objetivos específicos	40
V. Problema a resolver	41
VI. Metodología	42
VII. Resultados	43
VIII. Discusión de resultados	47
IX. Conclusiones	54
X. Recomendaciones	56
XI. Bibliografía	57
IX. Apéndices	58
A. Diseño del sistema de conductos	58
B. Ecuaciones de flujo de aire para varios diseños de capillas	59
C. Pérdida debida a codos	60
D. Pérdidas debidas a acople de ramales a conducto principal	61
E. Pérdidas debidas a fricción en conductos	62
F. Características de materiales para filtros	63
G. Datos intermedios de los sistemas de ventilación por extracción local	64
H. Comparación de ofertas	69
I. Características del Sistema A, considerando que los puntos 8, 9 y 10 tienen capilla tipo ranura.	70
J. Cálculos del sistema de colección de polvos	71
K. Fotografías del área de fabricación	74
L. Símbolos	77

## INDICE DE TABLAS

	Página
1. Condiciones comunes y sus causas en ventilación	13
2. Caracterización del problema	14
3. Tipo de capilla en los puntos de captura del Sistema A	43
4. Requerimientos del Sistema A	43
5. Equipo recomendado para el Sistema A	44
6. Tipo de capilla para el Sistema B	44
7. Requerimientos del Sistema B	45
8. Equipo recomendado para el sistema B	45
9. Velocidad de captura para los materiales de la planta de dentífricos	64
10. Diseño y tamaño de las capillas del Sistema A	64
11. Flujos volumétricos y presiones requeridas en cada punto de captura (Sistema A)	65
12. Diámetro de los conductos en el Sistema A	65
13. Pérdidas debidas al acople del ramal con el conducto principal, para el Sistema A	66
14. Pérdidas debidas a fricción en conductos, para el Sistema A	66
15. Características del motor del ventilador para el Sistema A	67
16. Características de la capilla del Sistema B	67
17. Características del sistema B	67
18. Características del motor del ventilador para el Sistema B	68
19. Presión estática del sistema y flujo volumétrico necesario (escenario 2)	70
20. Características del ventilador necesario para el Sistema A (escenario 2)	70

## INDICE DE FIGURAS

	Página
1. Componentes de un sistema de extracción local	10
2. Presión estática en la capilla	17
3. Relación entre la velocidad de captura ( $V_c$ ) y la velocidad en ductos ( $V_d$ )	18
4. La distancia máxima de captura no debe ser más de 1.5 veces el diámetro del conducto	19
5. Regla de seis y tres	20
6. Ejemplo para un punto teórico de succión	25
7. Ejemplos de curvas de un ventilador	34
8. Plano de la ubicación de los puntos de captura y la distribución de conductos	46
9. Fotografía de botado de supersacos de abrasivo	74
10. Fotografía de dosificación de lauril sulfato de sodio	74
11. Fotografía de silo de Mezclador 1	75
12. Fotografía de silo de Mezclador 2	75
13. Fotografía de tolva de paila de Mezclador 3	76
14. Fotografía de tolva de paila de Mezclador 2	76

## I. INTRODUCCIÓN

La crema dental es uno de los productos básicos para la higiene personal. Los orígenes de los dentífricos modernos se remontan al siglo XIX, cuando en la fábrica creada por William Colgate se inventó su mundialmente famosa crema dental.

En una planta de fabricación de crema dental existe un área específica para formulación y el mezclado de los ingredientes. Algunas materias primas para el proceso de fabricación son polvos, por lo que las operaciones de pesado y dosificación liberan gran cantidad de polvo al ambiente. Este polvo implica tiempo perdido en limpieza, es un riesgo para la salud de los operadores y es riesgo de explosión.

Para disminuir la concentración de polvos en el ambiente es necesario instalar un sistema de colección de polvo. Dicho sistema incluye varios puntos de captura, un sistema de conductos, un colector de polvo y un ventilador de succión. Para que un sistema de colección de polvo sea eficiente, es necesario que los puntos de captura sean determinados correctamente, que su diseño facilite la captura del material y que la velocidad de succión sea igual o mayor a la velocidad de captura de los materiales.

El presente trabajo incluirá la determinación de la velocidad de captura, determinación de los puntos de captura dentro de la planta, el diseño de los puntos de captura (e.j. campana), los diseños de los sistemas de conductos, del colector de polvo y del ventilador de succión. Se diseñarán dos sistemas de colección de polvo independientes, para separar los polvos de fluoruros de otros tipos de polvos. Los polvos de fluoruros son polvos tóxicos, por lo que al separarlos se podrán tratar adecuadamente para descartarlos sin producir contaminación al medio ambiente.

Con este trabajo se diseñará un sistema de colección de polvo adecuado a las necesidades de la planta y se propondrán tres opciones para el proyecto, seleccionándose finalmente la mejor (basándose en calidad, precio y tiempo de entrega). Con la información que se obtenga del presente trabajo se podrá comprar e instalar un sistema que proteja la salud de los trabajadores y ayudará a la planta a cumplir con sus reglamentos corporativos de salud ocupacional. Este sistema también ayudará a disminuir el tiempo utilizado en limpieza del área.

Este trabajo es una útil herramienta para el diseño de sistemas de extracción local para otra aplicación. Aquí se muestra la secuencia de actividades y razonamientos necesarios para realizar el diseño del sistema.

## II. ANTECEDENTES

### A. Propósito de la recolección de polvo

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

- Control de la contaminación del aire.
- Reducción del mantenimiento de equipo.
- Eliminación de riesgos contra la seguridad.
- Mejoramiento de la calidad del producto.
- Recolección de un producto valioso.
- Recolección de productos en forma de polvos (Perry, 1999).

### B. Mecanismos para la recolección de polvo

Las operaciones básicas en la recolección de polvo por medio de cualquier dispositivo son:

- Separación de las partículas transportadas por el gas de la corriente gaseosa por deposición sobre una superficie de recolección.
- Retención del depósito sobre la superficie.
- Eliminación del depósito recolectado sobre la superficie para su recuperación o desecho.

Los principales mecanismos de la deposición de aerosoles que se aplican en los recolectores de polvo son:

- Deposición por gravedad.
- Intercepción en línea flujo.
- Deposición por inercia.
- Deposición por difusión.
- Deposición electrostática.

Otros mecanismos de deposición, además de los antes listados, se pueden poner en operación en determinadas circunstancias. Algunas partículas de polvo se

pueden recolectar en filtros, por medio de mallas, cuando el diámetro del poro es inferior al diámetro de la partícula. A excepción de los pequeños filtros de membrana, el empleo de mallas está probablemente limitado a los filtros de superficie, en los cuales la capa de polvo colectado es en sí el medio filtrante principal.

Se utiliza otro mecanismo en depuradores. Cuando el vapor de agua se difunde de una corriente de gas a una superficie fría y condensa, hay un flujo hidrodinámico neto del gas no condensable dirigido hacia la superficie. Este flujo, llamado flujo de Stefan, lleva partículas del aerosol a la superficie que condensa y puede mejorar substancialmente el funcionamiento de un depurador.

La mayoría de los equipos de colección de polvo utilizan más de uno de los mecanismos para la colección de polvo y en algunos casos el mecanismo puede cambiar cuando el colector funciona en una amplia gama de condiciones. Por lo tanto, los colectores de polvo son clasificados por tipo y no por los mecanismos subyacentes que pueden funcionar (Perry, 1999).

### **C. Funcionamiento de los colectores de polvo**

El desempeño de un colector de polvo se expresa comúnmente como la eficiencia  $h$ , que es la relación entre el peso del polvo recogido y el peso del polvo que entra al aparato. Sin embargo, la eficacia de la colección se relaciona exponencialmente con las características del polvo y el gas, por lo que es insensible a las condiciones del colector cuando se acerca a 1. Para eficiencias altas se utiliza generalmente el término  $1-h$ , el cociente del peso del polvo que escapa respecto de la entrada de polvo. En la colección de aerosoles radiactivos es común utilizar el término  $1/(1-h)$ , que se llama factor de descontaminación. El número NT de las unidades de transferencia es igual a  $\ln(1/(1-h))$  en el caso de eliminación de polvo. Debido a la forma exponencial de la relación entre la eficacia y las variables del proceso para la mayoría de los colectores de polvo, el uso del NT es particularmente conveniente para las correlaciones de los datos de funcionamiento del colector.

Puesto que el consumo de energía es una de las características más importantes de un colector, el cociente de NT al consumo de energía es un criterio útil. Otro es el cociente del NT a la inversión de capital (Perry, 1999).

#### **D. Diseño del recolector de polvo**

En el equipo de recolección de polvo, la mayor parte de los mecanismos de recolección, o todos, pueden operar en forma simultánea y su importancia relativa se determina mediante las características del gas y la partícula, la geometría del equipo y el patrón de flujo del fluido.

Los modelos mejor establecidos del rendimiento o comportamiento de recolectores son los de filtros fibrosos y los filtros granulares con lecho fijo, en los cuales las estructuras y los patrones del flujo del fluido están bien definidos.

El diseño de recolectores a escala industrial aún se encuentra basado esencialmente en métodos empíricos o semiempíricos, no obstante que está guiado, cada vez más, por conceptos obtenidos de la teoría. Los modelos teóricos existentes incorporan con frecuencia constantes, que se deben evaluar en forma experimental y que en realidad pueden compensar las deficiencias de los modelos (Perry, 1999).

#### **E. Equipos de recolección de polvo**

##### **1. Cámaras de gravedad**

La cámara de sedimentación o asentamiento por gravedad es, quizá, el equipo de recolección de polvo más simple y antiguo que se conoce y consta de una cámara en que la velocidad del gas se reduce para permitir que el polvo se asiente por acción de la gravedad. Su utilidad industrial está limitada a la separación de partículas con tamaños superiores a una malla 325 (43 $\mu$ m de diámetro). Para separar partículas más pequeñas, el tamaño necesario de cámara es, casi siempre, absurdo (Perry, 1999).

## 2. Separadores por choque

Estos separadores son del tipo de los separadores por inercia, en los que las partículas se separan del gas por choque y recolección en armazones colocados a través de la trayectoria de la corriente gaseosa. En general, los separadores por choque se diseñan para caídas de presión que varían entre 0.25 y 0.40 kPa, dependiendo del tipo y la aplicación; están limitados a la eliminación de polvos, con partículas con diámetros predominantes mayores de 10 a 20  $\mu\text{m}$ . La principal ventaja de estas unidades sobre los otros tipos de recolectores es que se adaptan mejor a los conductos o ductos existentes (Perry, 1999).

## 3. Separadores de ciclón

El equipo de recolección de polvo que se emplea con mayor frecuencia es el ciclón, en el cual el gas cargado de polvo penetra tangencialmente en una cámara cilíndrica o cónica, en uno o más puntos, y sale de la misma a través de una abertura central. El ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga. En las condiciones de operación utilizadas comúnmente, la fuerza o aceleración centrífuga de separación varía de cinco veces la gravedad -en los ciclones de baja resistencia y diámetro muy grande- hasta 2500 veces la gravedad, en las unidades muy pequeñas de alta resistencia.

Los recolectores de ciclón son uno de los medios menos costosos para la recolección de polvo desde el punto de vista de la inversión y de la operación. Su limitación principal es que, a menos que se utilicen unidades muy pequeñas, la eficiencia de recolección es muy baja para partículas menores de  $5\mu\text{m}$ , especialmente para partículas menores de 2 a  $3\mu\text{m}$  (Perry, 1999).

## 4. Separadores mecánicos centrífugos

Hay varios colectores de tipo comercial en los cuales el campo centrífugo se crea por medio de un miembro rotatorio. En la unidad típica, el extractor o ventilador y el recolector de polvo se combinan en una sola unidad. Las hojas tienen una forma especial, para que dirijan el polvo separado hacia una ranura anular que conduce a la tolva de recolección, mientras que el gas limpio sigue por la espiral.

Aunque no se dispone de datos comparativos, la eficiencia de recolección de las unidades de este género es quizá comparable con la de un ciclón de gran caída de presión, que se compone de una sola unidad.

La principal ventaja de estas unidades reside en lo compacto de su estructura, que es una consideración de primordial importancia en el caso de instalaciones o fábricas de gran tamaño que requieren un buen número de colectores individuales (Perry, 1999).

## **5. Depuradores de partículas**

Los recolectores en húmedo, o depuradores, constituyen un tipo de dispositivos en los que un líquido (generalmente agua) se utiliza para ayudar a la recolección de polvos o neblinas. Los recolectores de película húmeda constituyen como es lógico, una categoría separada de dispositivos. Estas comprenden los recolectores por inercia, en los que una película de líquido fluye sobre las superficies interiores, evita el rearrastre de las partículas de polvo y arrastra el polvo depositado. Los ciclones de paredes húmedas son un ejemplo de este tipo de recolectores (Perry, 1999).

## **6. Filtros de tela**

Los filtros de tela, denominados casi siempre filtros de bolsas o casas de bolsas, son recolectores en los que el polvo se elimina de la corriente de gas, al pasar el gas cargado de polvo a través de una tela de cualquier tipo. Estos dispositivos son filtro de superficie, porque el polvo se recolecta en una capa sobre la superficie del medio filtrante y la capa de polvo en sí, se convierte en un medio filtrante eficaz. Los poros del medio (especialmente en las telas tejidas)

suelen ser de varios diámetros mayores al diámetro de las partículas de polvo; en consecuencia, la eficiencia de recolección es baja, hasta que se han recolectado las partículas suficientes para formar una precapa en los poros de la tela. Durante este período inicial, la deposición de las partículas se realiza mediante los mecanismos de deposición por inercia, intercepción en la línea de flujo, difusión y gravedad. Una vez que la capa de polvo se ha formado totalmente, es probable que el cribado sea el mecanismo básico de deposición.

Debido a su propia eficiencia elevada sobre los polvos y todos los intervalos de diámetro de partícula, los filtros de tela se han utilizado para la recolección de polvos finos y humos durante más de cien años. La principal limitación en la aplicación del filtro la imponen los límites de temperatura de las telas disponibles.

Los diseños actuales de filtros de tela son de tres tipos y dependen del método de limpieza utilizado:

- Limpieza por vibrador.
- Limpieza por flujo inverso.
- Limpieza por pulsos inversos.

El filtro limpiado con vibrador es la forma más primitiva de los filtros de bolsas. Los extremos inferiores abiertos de las bolsas están sujetos, en las aberturas, a la placa de tubos que separa la cámara inferior de entrada del gas sucio de la cámara superior de gas limpio. Los apoyos de las bolsas, de los que están suspendidas éstas, se encuentran conectados a un mecanismo vibrador. El gas sucio fluye hacia arriba y al interior de las bolsas de filtro, y el polvo se recolecta sobre las superficies internas de las bolsas. Cuando la caída de presión del gas se eleva hasta un límite superior seleccionado, como resultado de la acumulación de polvo, el flujo de gas se detiene y el vibrador actúa proporcionando a las bolsas un movimiento circular de vaivén. El polvo desprendido cae dentro de la tolva, colocada debajo de la placa de tubos. Si el filtro funciona en forma continua, debe construirse con compartimientos múltiples, para que los compartimientos individuales se puedan sacar en secuencia de la línea para limpiarlos, mientras los demás continúan en operación (Perry, 1999).

## **7. Filtros de lecho granular**

Estos filtros se pueden clasificar como filtros profundos, porque las partículas de polvo se depositan profundamente dentro de los gránulos del lecho. Los gránulos en sí representan blancos para la deposición de partículas por inercia, difusión, intercepción en la línea de flujo, gravedad y atracción electrostática, dependiendo de las características del polvo, del filtro y de las condiciones de operación. Los demás mecanismos de deposición tienen, en su mayor parte, poca importancia. A pesar de que físicamente es posible, en determinadas circunstancias, que una capa de polvo se forme en la cara de entrada del filtro, por lo general los límites prácticos de la caída de presión del gas se alcanzan mucho antes de que se pueda establecer una capa superficial de polvo (Perry, 1999).

## **8. Filtros de aire**

Los filtros de aire comprenden una variedad de dispositivos de filtración diseñados para la recolección de partículas con concentraciones bajas, por lo general, el polvo de la atmósfera. La diferencia que existe entre las dos categorías de equipos no está en los principios de operación, sino en las adaptaciones requeridas para manejar las diferentes cantidades de polvo.

La aplicación más frecuente de los filtros de aire es la limpieza del aire atmosférico para la ventilación de edificios, en la cual sólo se requiere de niveles moderadamente elevados de eficiencia de recolección (Perry, 1999).

## **9. Precipitadores eléctricos**

Cuando las partículas suspendidas en un gas se exponen a iones gaseosos dentro de un campo electrostático, adquieren una carga y se desplazan bajo la acción del campo. Los mecanismos funcionales de la precipitación eléctrica son los que se indican a continuación:

- a. Ionización del gas.
- b. Recolección de las partículas.
  - Generación de un campo electrostático para provocar la carga y el movimiento de las partículas de polvo.
  - Retención del gas para permitir el movimiento de las partículas hacia una superficie de recolección.
  - Prevención del rearrastre de las partículas recolectadas.
  - Separación de las partículas recolectadas del equipo (Perry, 1999).

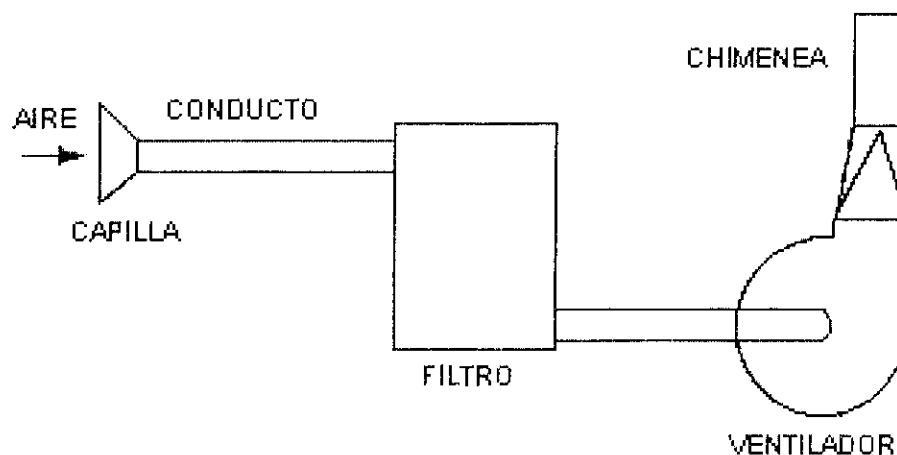
## F. Ventilación Industrial

La ventilación industrial implica generalmente el uso de una fuente de ventilación y de un extractor de aire para controlar emisiones, exposiciones y peligros químicos en el lugar de trabajo. Tradicionalmente, sistemas no industriales de ventilación, conocidos comúnmente como calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado (HVAC, *Heating, Ventilating and Air-Conditioning*) fueron construidos para controlar temperatura, humedad y olores (OSHA, 1994).

Hay cinco tipos básicos de sistemas de ventilación:

- Dilución y retiro por extracción general;
- Extracción local (*local exhaust*);
- Aire de reemplazo (o de maquillaje)
- HVAC (sobre todo para la comodidad)
- Sistemas de la recirculación.

**Figura 1:** Componentes de un sistema de extracción local



Los sistemas de ventilación implican generalmente una combinación de estos tipos de sistemas. Por ejemplo, un dispositivo de extracción local grande puede también servir como sistema de dilución y el sistema de HVAC puede servir como sistema de aire del maquillaje (Jorgensen, 1983).

## **1. Efectos a la salud.**

A continuación se tratará los efectos a la salud en instalaciones industriales.

### **a. Contaminantes del aire de interiores**

Incluyen, pero no se limitan, a partículas, al polen, agentes microbianos y a las toxinas orgánicas. Éstos pueden ser transportados por el sistema de la ventilación u originarse en las siguientes partes del sistema de la ventilación:

- filtros mojados;
- aislamiento mojado;
- torres de enfriamiento;
- humidificadores evaporativos.

La gente expuesta a estos agentes puede desarrollar muestras y síntomas relacionados con la fiebre del humidificador, pulmón del humidificador (*humidifier lung*), o pulmón del acondicionador de aire (*air conditioner lung*). En algunos casos, los contaminantes del aire de interiores causan condiciones clínicas identificables, tales como asma ocupacional, enfermedad reversible de la vías respiratorias (*reversible airway disease*) y pneumonitis hipersensible (OSHA, 1994).

### **b. Productos químicos orgánicos y reactivos volátiles**

Contribuyen a menudo a la contaminación del aire de interiores (por ejemplo, formaldehído). El sistema de ventilación de la fábrica puede transportar reactivos químicos del área de emisión a otras partes del edificio. En algunos casos, la fuente de contaminación puede ser el aire exterior. Utilizar aire exterior

para ventilación o maquillaje para los dispositivos de extracción, puede traer contaminantes al lugar de trabajo (OSHA, 1994).

## **2. Estándares y códigos.**

### **a. Regulaciones de la Administración de Seguridad Ocupacional y Salud, del Departamento de Trabajo Estadounidense (Occupational Safety and Health Administration, OSHA).**

Los criterios o los estándares para ventilación se incluyen en los códigos reguladores de OSHA para el área de trabajo o para protección del trabajador; muchos estándares de salud de OSHA incluyen requisitos de ventilación. En los estándares 29 CFR 1910.94 se tratan sistemas de extracción local (*local exhaust system*) (OSHA, 1994).

## **3. Pautas de investigación .**

### **a. Fases de la investigación .**

Las investigaciones de los sistemas de la ventilación en el lugar de trabajo se pueden iniciar por quejas del trabajador de posibles sobreexposiciones a contaminantes, riesgo de fuego o de explosión debido a niveles inflamables de gas o estar cerca del límite inferior explosivo, o por quejas de la calidad del aire. La segunda fase de la investigación implica examinar el sistema de ventilación y sus características de funcionamiento (OSHA, 1994).

### **b. Condiciones y causas de la mala ventilación.**

Las condiciones probables de fallas en la ventilación aparecen listadas a continuación. Los puntos específicos a considerar durante cualquier investigación de un sistema de ventilación incluyen la fuente de la emisión, comportamiento del aire y la implicación del empleado. Los puntos que se deben incluir en una revisión de la eficacia operacional se demuestran en la tabla 1 (OSHA, 1994).

**Tabla 1:** Condiciones comunes y sus causas en ventilación.

<b>Condición</b>	<b>Posible Causa</b>
Quejas del trabajador, inadecuado uso del sistema, alteración del sistema por los empleados.	<p>El sistema interfiere con el trabajo.</p> <p>El sistema no es suficiente para controlar los contaminantes.</p> <p>Es necesario mejorar los procedimientos de trabajo.</p> <p>El sistema interfiere con la productividad, lo que lleva a los trabajadores a no utilizar el sistema.</p> <p>El trabajador no está bien entrenado.</p> <p>El diseño del sistema es deficiente.</p>
Los ductos se tapan constantemente.	<p>Los ductos se tapan cuando la velocidad de transporte es inadecuada o cuando se condensa vapor en los ductos, humedece a otras partículas y propicia la acumulación de materiales.</p> <p>Estos problemas se deben a un diseño deficiente del sistema de ventilación, o a problemas con el ventilador.</p>
Velocidades de captura reducidas o exceso de emisiones al ambiente de trabajo.	<p>Generalmente la causa de estos problemas es un flujo reducido, o que el proceso haya cambiado.</p> <p>Ocurrirán flujos reducidos en las siguientes condiciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Conductos tapados o abollados.</li> <li>-Correas de ventilador safadas.</li> <li>-Puertas de acceso (al sistema de ventilación) abiertas.</li> <li>-Agujeros en los conductos o codos.</li> <li>-Acceso al conducto principal bloqueado.</li> <li>-Ventilador girando en sentido inverso.</li> <li>-Agregar ramales adicionales al sistema original.</li> <li>-Filtro de aire estorbando.</li> </ul>

**Tabla 2:** Caracterización del problema.

<b>Fuente de emisión</b>
<p>¿Dónde se localizan las fuentes de emisión?</p> <p>¿Qué fuentes de emisión contribuyen realmente a la exposición?</p> <p>Caracterización de contribuyentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Composición química</li> <li>-Temperatura</li> <li>-Flujo de emisión</li> <li>-Dirección de emisión</li> <li>-Velocidad de emisión</li> <li>-Patrón de emisión (continuo o intermitente)</li> <li>-Duración de los intervalos de emisión</li> <li>-Masa del material emitido</li> </ul>
<b>Comportamiento del aire</b>
<p>Temperatura del aire</p> <p>Movimiento del aire (dirección, velocidad)</p> <p>Turbulencia</p> <p>Condiciones de alimentación y retorno del flujo, incluyendo diferencias de presión entre el área y sus alrededores.</p> <p>Posibles fuentes de inyección de aire.</p> <p>Cambios de aire por hora.</p> <p>Influencia de los sistemas HVAC</p> <p>Efectos de la velocidad y dirección del viento</p> <p>Efectos del tiempo y de la estación.</p>
<b>Empleado</b>
<p>Interacción del trabajador con la fuente de emisión</p> <p>Niveles de exposición del trabajador.</p> <p>Localización del trabajador.</p> <p>Educación del trabajador, entrenamiento, cooperación.</p>

**c. Equipo básico de prueba:**

- 1) Velocímetros, anemómetros:
  - Anemómetro de paleta pivot.
  - Termal o anemómetro de alambre caliente.
- 2) Dispositivos para medir presión:
  - Tubo en forma de "U" o manómetros electrónicos
  - Tubo Pitot
  - Termal (instrumentos para medir la presión indirectamente)
- 3) Cintas métricas.
- 4) Equipo para medición de oxígeno.
- 5) Equipo para medición de monóxido de carbono o dióxido de carbono (Jorgensen, 1983).

**d. Documentación.**

Se debe documentar durante el período de investigación las características del sistema de ventilación. Se debe incluir: operación del equipo, las medidas físicas del sistema y las prácticas de uso (OSHA, 1994).

**e. Operación del equipo.**

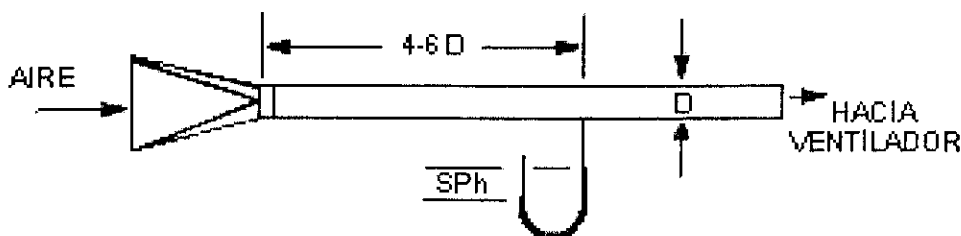
Antes de medir la velocidad o la presión, se debe observar y registrar el funcionamiento del equipo. Por ejemplo: ¿los filtros están saturados o limpios? ¿equipos o accesorios para variar el flujo (como variadores de flujo o *dampers*) están en uso? (OSHA, 1994).

**f. Mediciones.**

- 1) **Diámetros de los conductos.** Se miden para calcular áreas de conducto. El diámetro interior del conducto es la medida más importante, pero una medida exterior es a menudo suficiente para un conducto fabricado de hoja metálica.

- 2) **Dimensiones de la capilla y del conducto.** Se pueden estimar de planos, de dibujos y de especificaciones. Las medidas se pueden hacer con cinta métrica. Si el conducto se construye de secciones de 0.76 m ó 1.22 m (2.5 ó 4 pies), se puede contar el número de secciones (los codos y las "tes" se deben incluir en la longitud).
- 3) **Velocidades en la entrada de la capilla.** Pueden ser estimadas con velocímetros, tubos del humo y anemómetros (que son portátiles y confiables).
  - a) La velocidad mínima que se puede leer por un anemómetro es 0.25 m/seg (50 pies por minuto). La escala se debe leer siempre en posición vertical y solamente se deben utilizar los accesorios originales del equipo.
  - b) Los anemómetros no pueden ser utilizados si el conducto contiene el polvo o niebla, porque el aire debe pasar a través del instrumento para hacer la medición. Este instrumento requiere limpieza periódica y calibración por lo menos una vez al año.
  - c) La determinación del flujo en la entrada de la capilla consta de los siguientes pasos:
    - Marcar áreas imaginarias.
    - Medir la velocidad en el centro de cada área.
    - Calcular un promedio de la velocidades medidas.
  - d) El humo es útil para medir velocidad en la entrada porque es visible. Nada convence a la gerencia y los empleados más rápidamente de que no esté funcionando la ventilación correctamente, como mostrar el humo alejándose del sistema de ventilación o moviéndose hacia el área de respiración del trabajador.
- 4) **Presiones estáticas de la capilla (*Hood static pressures, SPh*).** Se deben medir cerca de 4 a 6 diámetros agua abajo en el conducto, en una sección recta. La medida se puede hacer con un tubo Pitot.

**Figura 2:** Presión estática en la capilla.



- Se puede utilizar un manómetro de carátula (galga), siendo el más simple, el que es en forma de "U".
- Los manómetros inclinados ofrecen mayor exactitud y sensibilidad a presiones bajas, que los manómetros con tubo en "U" (Jorgensen, 1983).

- 5) **Mediciones de velocidad en conductos.** Se pueden hacer directamente (con velocímetros y anemómetros) o indirectamente (los manómetros y los tubos Pitot) con la presión de velocidad del conducto.
- a) El flujo de aire en conductos de ventilación industriales es casi siempre turbulento, con una capa pequeña, con poco movimiento en la superficie del conducto.
  - b) Debido a que la velocidad varía con distancia al borde del conducto (perfil de velocidad), una sola medida puede no ser suficiente. Sin embargo, si la medida se toma en un tramo recto de un conducto cilíndrico, 4 a 6 diámetros aguas abajo y 2 a 3 diámetros antes de cualquier obstrucción o cambios de dirección, entonces la velocidad media se puede estimar como el 90% de la velocidad de la línea central (la presión media debida a la velocidad es el cerca de 81% de la presión de la velocidad de la línea central).

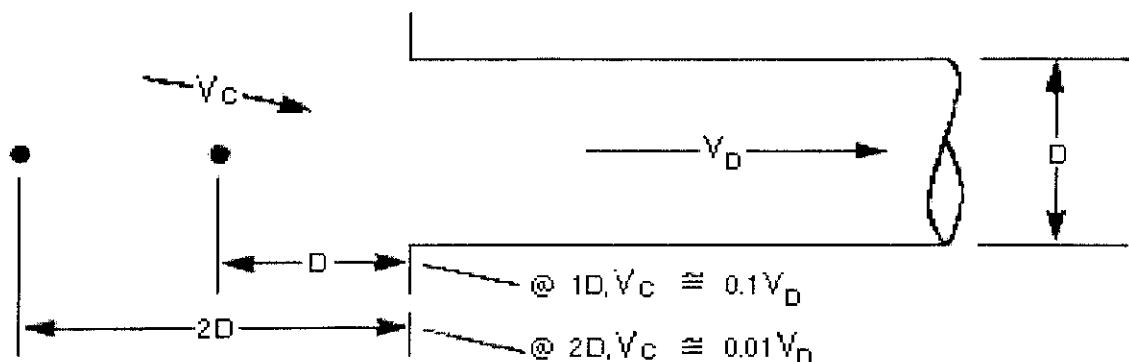
- c) Un método más exacto implica el tomar de seis a diez mediciones en dos o tres pasos, a través del conducto, a  $90^\circ$  ó  $60^\circ$  opuestos. Las medidas se hacen en el centro de círculos concéntricos de igual área.
- d) Las correcciones por densidad para el uso del instrumento se deben hacer de acuerdo con las instrucciones del fabricante del equipo utilizado (Jorgensen, 1983).

6) **Condiciones del ventilador y del filtro.** Se pueden hacer con un tubo Pitot y manómetro.

**g. Buenas prácticas de diseño e instalación.**

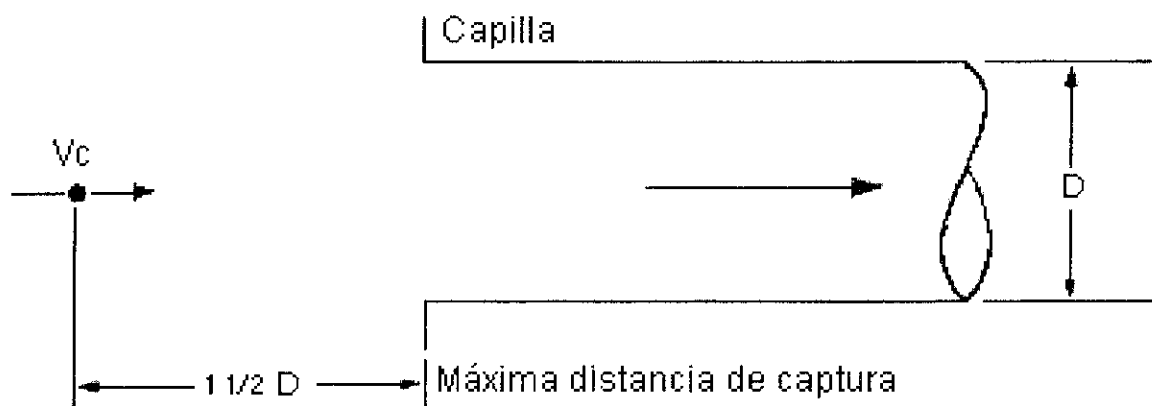
- 1) **Colocación de la capilla.** La capilla debe estar colocada cerca de la fuente de la emisión, para ser eficaz. La distancia máxima a la fuente de la emisión no debe exceder 1.5 veces el diámetro del conducto.
  - a) La relación aproximada de la velocidad de la captura ( $V_c$ ) con la velocidad en el ducto ( $V_d$ ), para una capilla ensanchada llana o estrecha simple se ilustra en la Figura 3. Por ejemplo, si una fuente de emisión está a un diámetro de la capilla y la velocidad del conducto ( $V_d$ ) = 15.23 m/seg (3000 fpm), la velocidad prevista de la captura ( $V_c$ ) es 1.52 m/seg (300 fpm). A dos diámetros de la abertura de la capilla, la velocidad de la captura disminuye por un factor de 10, a 0.15 m/seg (30 fpm).

**Figura 3:** Relación entre la velocidad de captura y la velocidad en ductos



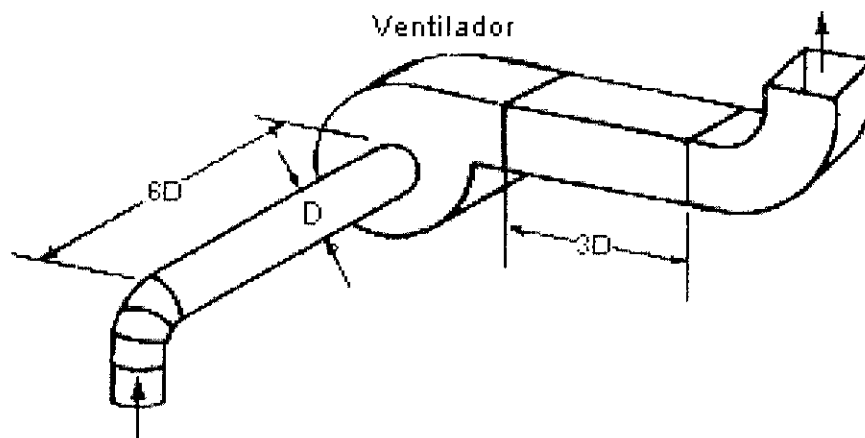
- b) La figura anterior demuestra una regla (*rule of thumb*), que se pueda utilizar con las capillas simples de captura. Si el diámetro del conducto (OSHA, 1994) es 0.15 m (6 pulgadas), la distancia máxima de la fuente de la emisión a la capilla no debe exceder 0.23 m (9 pulgadas). La velocidad mínima de captura no debe ser menor de 0.25 m/seg (50 fpm).

**Figura 4:** La distancia máxima de captura no debe ser más de 1.5 veces el diámetro del conducto.



- 2) **Pérdida de efecto del sistema.** Ocurre en el ventilador, y puede ser evitada utilizando canalización adecuada.
- a) El uso de la regla de seis y tres asegura un mejor diseño, previendo de una pérdida mínima mediante un tramo recto con longitud de seis diámetros, en la entrada de ventilador y una pérdida mínima mediante un tramo recto de tres diámetros de conducto en la salida del ventilador

**Figura 5:** Regla de seis y tres



b) La pérdida de efecto del sistema es significativa si algunos codos están conectados con la entrada o salida del ventilador. Por cada 2.5 diámetros de conducto recto entre la entrada al ventilador y un codo, la pérdida de flujo volumétrico será del 20%.

3) **Planos y especificaciones del sistema de ventilación.** Siguen generalmente formas y símbolos estándar

- a) Las secciones del plano incluyen eléctrico, tubería, estructural, o los dibujos mecánicos. Los planos vienen en varios formatos: planta, elevación, alzado, de sección o isométrico.
- b) Las elevaciones y alzados (vistas delanteras y laterales) dan la mayoría del detalle. Un dibujo isométrico es uno que ilustra el sistema en tres dimensiones. Un dibujo seccional proporciona el detalle del conducto o del componente, mostrando una sección representativa del componente.
- c) Los planos se trazan generalmente a la escala (ACGIH, 1998).

## **G. Criterios de selección para sistemas de extracción local y general**

Los sistemas de extracción general son apropiados cuando:

- Las fuentes de emisión contienen materiales poco dañinos (lo dañino del material se relaciona con la toxicidad, la concentración y la susceptibilidad individual).
- Las fuentes de la emisión son, sobre todo, vapores o gases.
- Las emisiones ocurren uniformemente.
- Las emisiones se dispersan extensamente.
- Prevalecen condiciones climáticas moderadas.
- Se deben reducir las concentraciones de vapores en el recinto.
- Se deben controlar las fuentes portátiles o móviles de la emisión.

Los sistemas de extracción local son apropiados cuando:

- Las fuentes de la emisión contienen los materiales muy peligrosos.
- Los materiales emitidos son partículas de diámetros grandes.
- Las emisiones varían en el tiempo.
- Las fuentes de emisión son puntos específicos bien definidos.
- Los empleados trabajan en la vecindad de la fuente de la emisión.
- Las condiciones climáticas en donde está ubicada la planta son severas.
- Debe reducirse al mínimo el volumen de aire desalojado o extraído (OSHA, 1994).

## **H. Diseño de un sistema de ventilación por extracción local**

Los sistemas de ventilación mediante extracción local típicos se componen de cinco partes: ventilador, capilla, conductos, filtros de aire y chimenea. Los sistemas de extracción local se diseñan para capturar un contaminante en la fuente de emisión o cerca de ella, antes de que el contaminante tenga ocasión de dispersarse en el aire del lugar de trabajo.

Al diseñar un sistema nuevo de ventilación por extracción local, o al modificar uno existente, se deben tomar en cuenta muchos factores: tipo y diseño de la capilla, tamaño y disposición de los conductos, tipo de ventilador, tamaño y localización del motor (Jorgensen, 1983).

La velocidad de captura es la velocidad de aire necesaria para superar corrientes de aire y capturar al contaminante y hacerlo fluir en la capilla. La velocidad de la captura depende del contaminante y no de la geometría de diseño de la capilla. La velocidad de captura se debe aplicar en un punto entre la fuente de la generación del contaminante y el área de respiración del personal.

## 1. Capillas

Las capillas de captura (e.j. campana) reciben los contaminantes generados en una fuente de la emisión. La capilla convierte la presión estática del conducto en presión debida a la velocidad y a caída de presión por la entrada a la capilla.

La capacidad de una capilla de convertir la presión estática a presión de la velocidad es dada por el coeficiente de la entrada ( $C_e$ ), como sigue:

$$C_e = Q_{ideal}/Q_{actual} = \sqrt{VP/SPh}$$

donde,

$Q_{ideal}$ = Flujo volumétrico ideal

$Q_{actual}$ = Flujo volumétrico actual

VP= Presión debida a la velocidad

SPh= Presión estática de la capilla

Para reducir al mínimo el flujo de aire requerido para la extracción, la operación debe ser encerrada tanto como sea posible. Ya sea con cortinas, deflectores laterales o un recinto cerrado. Esto ayuda a contener el material y a reducir al mínimo el efecto de las corrientes de aire en el sitio (ACGIH, 1998).

Al usar una capilla de captura, la capilla se debe situar tan cerca de la fuente de emisión del contaminante como sea posible. La reducción de la cantidad de contaminantes generados o lanzados en el proceso reduce los requerimientos de ventilación.

La capilla se debe diseñar para alcanzar una buena distribución de aire en las aberturas de la misma, de modo que todo el aire que circule por la capilla ayude a controlar contaminantes. Se deben evitar los diseños que requieren que las

velocidades en algunas aberturas sean muy altas y que ocasionen en otras piezas de la capilla velocidades mínimas.

El propósito de la mayoría de los sistemas de ventilación es prevenir que los empleados inhalen contaminantes. Por esta razón, la capilla se debe ubicar para que los contaminantes no circulen a través de la zona de respiración de los empleados. Esto es especialmente importante donde los trabajadores se inclinan para ejecutar una operación, tal como en un tanque destapado o un banco de soldadura.

Los diseños estándares de capillas pueden no ser adecuados para contener los materiales altamente tóxicos. La capilla se debe diseñar para ocasionar una interferencia mínima en la ejecución del trabajo. Colocar puertas de acceso en un recinto al que es necesario entrar y salir constantemente puede significar que las puertas se dejen abiertas. Ubicar las capillas de la captura muy cerca del proceso a menudo causa interferencia en la ejecución del trabajo, por lo que la capilla puede ser quitada. Las capillas nunca deben aumentar la probabilidad de lesión al interferir con la libertad de operación del trabajador.

Dos falsas ideas que son comunes al tratar capillas de captura son:

-“Las capillas capturan aire a una distancia significativamente lejana de la entrada a la capilla, por lo tanto, pueden controlar contaminantes emitidos lejos de la capilla”. Es fácil confundir la capacidad de un ventilador de soplar aire con su capacidad de succionar aire dentro de una capilla. Las capillas deben estar cerca de la fuente de emisión de contaminantes para ser eficaces.

- “Los materiales más pesados que el aire tienden a asentarse en el piso, por lo tanto se pueden recoger por una capilla localizada allí”. Una cantidad pequeña de contaminante en el aire (1000 ppm significa 1000 partes de contaminante por cada 999000 partes de aire) tiene una densidad que resulta cercana a la del aire, y corrientes de aire dispersarán al azar el material en toda la habitación.

Al diseñar una capilla:

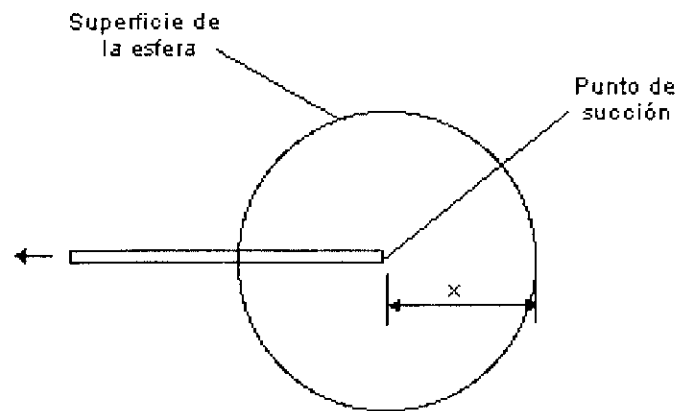
- a. Se debe elegir el tipo de capilla dependiendo del contaminante y del proceso.
- b. Se debe diseñar la capilla para que esté tan cerca del punto de generación de contaminación como sea posible.

- c. Las capillas en recintos cerrados, dentro de los cuales está el punto de generación (como las campanas de extracción de laboratorios), facilitan la captura del polvo o gas y requieren extraer menos volumen de aire.
- d. Se debe determinar el volumen de aire que es necesario extraer. Esta información es crítica al dimensionar el conducto, el ventilador y su motor; también sirve para determinar si se puede agregar otro conducto a un sistema existente.
- e. La velocidad en la capilla o flujo de aire requerido para alcanzar la velocidad de captura se puede determinar utilizando las ecuaciones de la siguiente sección.
- f. Se necesita potencia adicional del motor del ventilador para compensar las pérdidas debidas a fricción.
- g. Se requiere flujo de aire extra para compensar las fugas del sistema (ACGIH, 1998).

### **Cálculos**

Dentro de los límites, el aire se moverá hacia el punto de succión desde todas las direcciones. La geometría de la capilla limita las direcciones de donde se succionará aire. Para una capilla en un recinto cerrado, la velocidad en la apertura será el flujo volumétrico (Q) dividido entre el área (A).

**Figura 6:** Ejemplo para un punto teórico de succión, la velocidad de captura pasa a través de una superficie imaginaria de una esfera, cuyo centro es el punto de succión.



El área de una esfera es  $4\pi X^2$ .

Utilizando  $V=Q/A$ , donde  $V$  es velocidad. La velocidad del aire en la superficie de la esfera, a una distancia  $X$  del punto de succión, está dada por:

$$V_x = Q/A = Q/(4\pi X^2)$$

donde:

$Q$ = Flujo de aire en el punto de succión, en unidades de flujo volumétrico entre tiempo (e.j. metros cúbicos por segundo).

$V_x$ = Velocidad del aire a una distancia  $X$  de la capilla, en unidades de distancia entre tiempo (e.j. metros por segundo).

$A$ = Área de la esfera, en unidades de distancia o longitud al cuadrado (e.j. metros cuadrados).

$X$ = Radio de la esfera, en unidades de longitud (e.j. metros).

Para determinar el flujo de aire volumétrico necesario para proveer la velocidad de captura a una distancia  $X$  de la capilla, se substituye  $V_x = V_c$ , donde  $V_c$  es la velocidad de captura del contaminante.

$$Q = V_c(4\pi X^2)$$

Nótese en la ecuación anterior que el flujo volumétrico a una distancia  $X$  del punto de succión es función únicamente de la distancia. Las decisiones que se tomen durante el diseño afectan la habilidad del sistema para alcanzar la velocidad de captura a la distancia requerida del punto de extracción.

Por ejemplo: podemos utilizar esta aproximación para mostrar las diferencias entre un punto de succión que es la abertura de una manguera (designado  $Q_p$ , por punto de succión) y el flujo a través de una capilla con diseño de ranura (*flanged slotted hood*),  $Q_{sh}$ , con una relación ancho a largo menor a 0.20. Simplificando las ecuaciones se puede ver que para obtener la velocidad de captura deseada se necesita un flujo cinco veces mayor en la manguera que en la capilla de ranuras.

$$Q_p = V_c(4\pi X^2)$$

$$Q_{sh} = V_c(2.61LX) \quad \text{Asumiendo } L = X$$

$$Q_p / Q_{sh} = 4\pi / 2.61 = 4.8$$

$$Q_p = 4.8 Q_{sh}$$

Este análisis muestra que existe una oportunidad para reducir el flujo volumétrico que se debe extraer al utilizar diferentes diseños de capillas (Jorgensen, 1983).

## 2. Conductos

El aire fluye turbulento a través de conductos a velocidades de 10.16 m/seg a 30.43 m/seg (2000 a 6000 fpm). Para polvo industrial se recomienda una velocidad de 17.78 m/seg (3500 fpm) Los conductos pueden estar fabricados de lámina

galvanizada, fibra de vidrio, plástico y concreto. Las pérdidas por fricción varían dependiendo del tipo de la canalización, la longitud del conducto, la velocidad del aire, área del conducto, la densidad del aire y el diámetro del conducto.

- a. El sistema de conductos para transportar contaminantes debe tener área transversal redonda, no cuadrada o rectangular.
- b. El diámetro del conducto debe aumentar en la sección cercana al ventilador.
- c. Los ángulos de acople y de codos no deben ser rectos.
- d. El sistema puede diseñarse con compuertas (*dampers*) en cada ramal, para asegurarse de proveer la succión necesaria en cada punto de uso.
- e. Al agregar un punto de uso nuevo a un sistema existente, se deben calcular pérdidas por fricción para asegurar que el sistema pueda proveer la velocidad de captura necesaria. Una velocidad en ductos de 17.78 m/seg (3500 fpm) previene que el contaminante se acumule en el mismo (ACGIH, 1998).

### 3. Cálculo de pérdida de presión en la capilla, en conductos y cálculo de la presión estática del sistema

Los cálculos siguientes se pueden utilizar para determinar los requerimientos de presión estática para modificar un sistema existente o para el diseño de uno nuevo.

- a. Determinar la velocidad real en la apertura (*face velocity*) dividiendo el flujo volumétrico entre el área (A) de la apertura del conducto o capilla elegido. Luego determinar la presión de velocidad (*pressure velocity*), VP, con:

$$VP = (V/4005)^2$$

donde la velocidad,  $V = Q/A$

**Nota:** al utilizar la ecuación anterior se debe convertir V a pies por minuto, VP se obtendrá en pulgadas de agua y luego se deberá convertir a kPa.

- b. Determinar la caída de presión estática en la capilla y en el conducto, con las siguientes ecuaciones:

$$SPh = h_e + VP_d = h_s + h_d + \sum e_q \cdot VP_d$$

$$SPh = (F_s)(VP_s) + (F_d)(VP_d) + \sum e_q \cdot VP_d$$

donde,

$h_e$  = caída de presión en la entrada de la capilla =  $h_s + h_d$ , en unidades de presión (kPa)

$h_s$  = caída de presión en la entrada a la ranura o abertura =  $(F_s)(VP_s)$ , (kPa)

$h_d$  = caída de presión en la entrada al conducto =  $(F_d)(VP_d)$ , (kPa)

$F_s$  = coeficiente de pérdida por ranura

$F_d$  = coeficiente de pérdida por entrada a conducto

$VP_s$  = presión de velocidad de ranura o abertura, (kPa)

$e_q$  = coeficiente de pérdida.

$VP_d$  = velocidad de presión en el conducto, (kPa).

Si la velocidad en la apertura para una capilla es menor a 5.08 m/seg (1000 fpm), "hs" será despreciable y la pérdida se deberá únicamente a "hd". Si la velocidad en la apertura es mayor a 5.08 m/seg, se deben considerar "hs y hd".

- c. Multiplicar la longitud del sistema de conductos por el coeficiente de pérdida ( $e_q$ ) que aparece en las tablas.
- d. Determinar el número y tipo de acoples en cada segmento de conducto. Multiplicar el número de acoples por el factor de pérdida para ese tipo de acoples.
- e. Sumar los resultados de los pasos c y d y multiplicarlos por la VP del conducto. Este dato es la pérdida en kPa, para el segmento X del conducto.

- f. Sumar el resultado del paso e con la caída de presión estática. Si hay pérdidas adicionales (kPa), tales como un dispositivo de limpieza del aire, se deben sumar.
- g. Sumar 0.249 kPa (1"wg) de caída de presión a través de un *damper*. Esto incluye la energía que se necesita, en forma de caída de presión, para mover el flujo volumétrico de aire a través del conducto.
- h. Repetir los pasos a – g para cada capilla y conexión.
- i. Empezando del punto del sistema más lejano al ventilador, sume los flujos y presiones estáticas de cada ramal y conducto principal.
- j. La VP se convierte en presión estática cuando el aire es desacelerado. Sumar SP al total.
- k. Determinar en dónde será necesario colocar *dampers*.
- l. Agregar la presión estática debida al dispositivo de limpieza.
- m. Ahora se tiene la SP y el flujo de aire para elegir el ventilador.
- n. Algunas veces la velocidad en el conducto principal excede la de los ramales que se unen a él. Si es muy grande esta diferencia, se requiere presión estática adicional para aumentar la velocidad del flujo de aire de los ramales. Esta corrección se hace utilizando la presión de velocidad resultante de los flujos que entran a la unión.

Este cálculo se hace de la siguiente manera:

$$VPr = ((Q1 + Q2)^2)/(4005(A1+A2))$$

donde,

VPr = presión de velocidad resultante de la combinación de los ramales.

$Q_1$  = flujo volumétrico del ramal 1.

$Q_2$  = flujo volumétrico del ramal 2.

$A_1$  = área del conducto del ramal 1.

$A_2$  = área del conducto del ramal 2.

Este procedimiento calcula el acumulado de la energía requerida, en forma de presión estática, para mover el flujo de aire determinado a través del conducto.

La ecuación de la velocidad de captura muestra que ésta es función del volumen de aire extraído y del tamaño de la apertura, no de la velocidad específica en la apertura (Jorgensen, 1983).

#### **4. Ventiladores**

La selección de los ventiladores implica no sólo encontrar un ventilador que cumpla con los requisitos de flujo y presión, sino con todos los aspectos de la instalación, incluyendo las características de la corriente del aire, temperatura de funcionamiento y el montaje.

Los dos tipos más comunes de ventiladores son ventiladores axiales y ventiladores centrífugos. Los ventiladores centrífugos se utilizan para la ventilación industrial de polvo.

Los tipos específicos de ventiladores axiales son los siguientes:

- Los ventiladores de propulsor se utilizan para mover aire contra presiones estáticas bajas y se utilizan comúnmente para la ventilación general, no para los sistemas de ventilación por extracción local.
- Los ventiladores de tubo axial contienen las láminas del estrecho o tipo propulsor en una cubierta corta y cilíndrica. Estos ventiladores mueven el aire contra presiones moderadas.

Los tipos de ventiladores centrífugos son los siguientes:

- Aspas delanteras curvas (comúnmente llamados las jaulas de la ardilla): tienen láminas que se curvan en la dirección de la rotación. Se utilizan en presiones

estáticas bajas a moderadas, tales como los encontrados en calefacción y aire acondicionado. Este tipo de ventilador no se recomienda para extracción de polvo o partículas.

- Aspas radiales: tienen láminas rectas o en dirección radial del cubo. Estos ventiladores se utilizan para una gran variedad de aplicaciones, que manejen aire limpio o sucio.
- Aspas posteriores inclinadas o curvas: las láminas son inclinadas en sentido contrario a la dirección de la rotación del ventilador. Esta forma de la lámina es más eficiente, pero conduce a la acumulación material, por lo que este tipo de ventilador se debe utilizar solamente para el aire con poco polvo o para aire limpio.

Para ciertas aplicaciones los materiales de construcción usados en ventiladores deben ser considerados. Para extraer gases ácidos, se recomienda que las láminas del ventilador sean de fibra de vidrio, pues son resistentes a la corrosión. Para extraer vapores inflamables, se deben utilizar materiales que no produzcan chispa, generalmente cobre amarillo.

Para determinar si el ventilador existente es adecuado manejar el volumen de aire creciente debido a una capilla adicional, calcular la nueva presión estática para el cambio en el sistema y compararla con la presión estática del ventilador disponible, en la curva del ventilador. La presión estática del ventilador puede ser determinada después de calcular la presión total del ventilador usando las ecuaciones siguientes (ACGIH, 1998).

### **Cálculos**

La presión total del ventilador (FTP) es el aumento en la presión total a través del ventilador. Puede ser expresada por la ecuación:

$$FTP = TP(\text{salida}) - TP(\text{entrada})$$

o

$$FTP = (SP(\text{salida}) + VP(\text{salida})) - (SP(\text{entrada}) + VP(\text{entrada}))$$

donde,

TP(salida)= presión total a la salida del ventilador

TP(entrada)=presión total a la entrada del ventilador

SP(salida)= presión estática a la salida del ventilador.

SP(entrada)= presión estática a la entrada del ventilador.

VP(salida)= presión debida a la velocidad, a la salida del ventilador.

VP(entrada)= presión debida a la velocidad, a la entrada del ventilador.

La presión estática del ventilador (FSP) se puede calcular de la siguiente manera:

$$FSP = FTP - VP(salida)$$

o

$$FSP = TP(salida) - TP(entrada) - VP(salida)$$

La relación entre la presión y caudal desarrollado por un ventilador (la curva del ventilador) se demuestra en la figura siguiente. El fabricante del ventilador define la curva basado en características de diseño y de prueba. Los ventiladores centrifugos se seleccionan generalmente para que operen al principio de la parte escarpada de la curva, donde está la más alta la eficacia y los cambios pequeños de la presión no crean cambios grandes del índice de corriente. La curva de un ventilador específico puede ser cambiada solamente cambiando su velocidad. El aumento en flujo es proporcional al aumento en velocidad. Los requisitos de energía varían mientras que el cubo de la velocidad cambia. Cada ventilador tiene una velocidad máxima de seguridad determinada por su diseño, que se muestra generalmente en las especificaciones del ventilador.

Las curvas del sistema mostradas representan la relación entre presión y caudal para la combinación de los ramales, de los conductos principales, de los "dampers", de los colectores y de la chimenea del sistema de extracción local. Solamente se requiere un punto para trazar esta curva, que está siempre en la forma  $P=kQ^2$ . Al agregar o suprimir un ramal al sistema, o al bloquearse un filtro o al cambiar la posición de un "damper", la curva del sistema cambia.

El flujo de aire real a través de un sistema es determinado siempre por la intersección la curva del ventilador y la curva del sistema. (Véase la Figura 5)

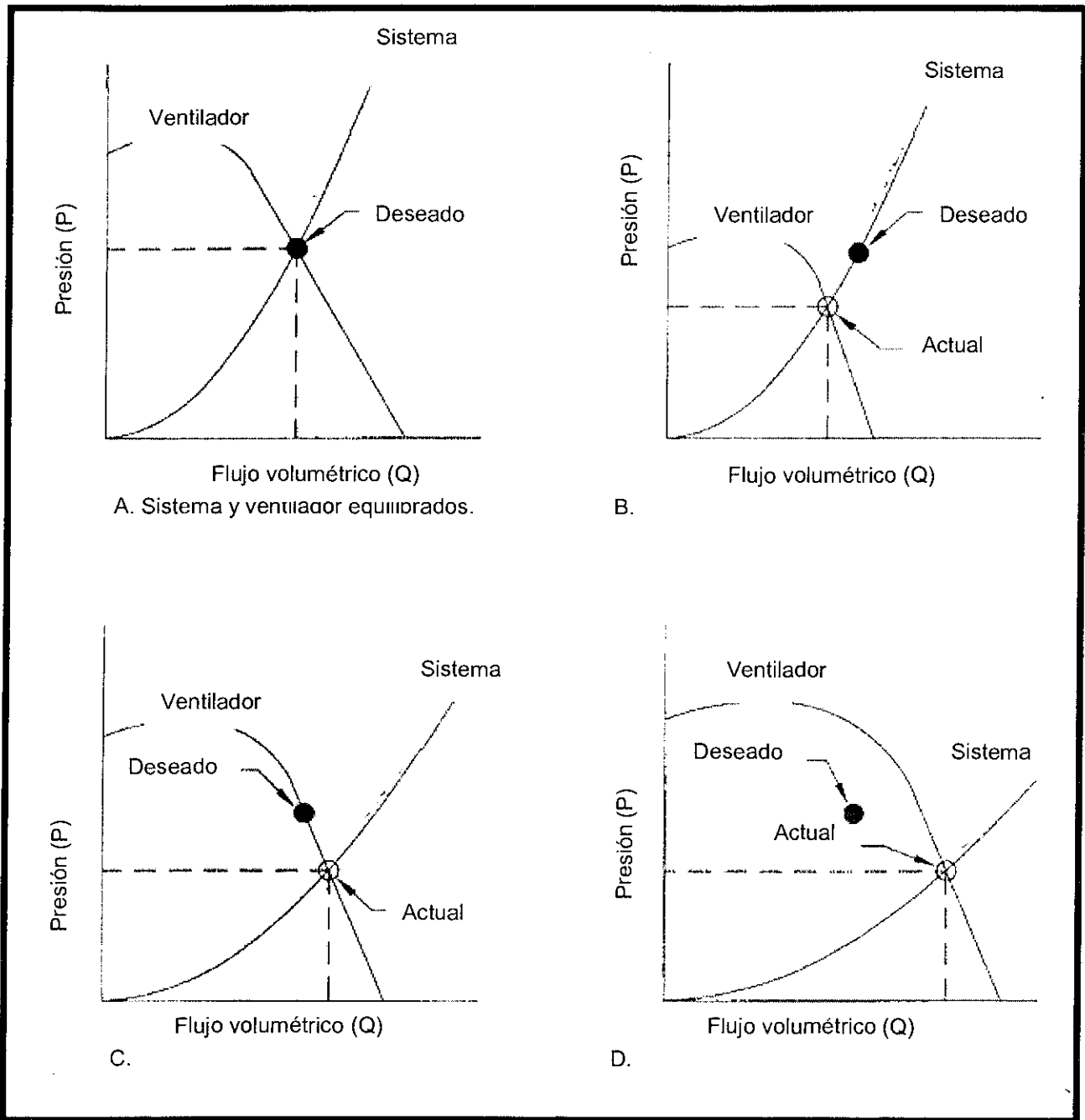
En la Figura 7A, el ventilador es equilibrado con el sistema y se alcanza el flujo deseado.

En la figura 7B, el ventilador está subdimensionado para la aplicación. Es necesario cambiarlo o aumentar su velocidad (si lo permite el tamaño del motor y la velocidad máxima de seguridad).

En la figura 7C el flujo total es adecuado, pero la presión es muy baja. En este caso, el ramal del sistema de extracción local más cercano al ventilador puede operar con un flujo excesivo de aire, pero los ramales más lejanos al ventilador no son capaces de succionar suficiente aire. El sistema necesita ser balanceado, cerrando "dampers" en el ramal más cercano al ventilador. Esto crea más resistencia en el sistema y mueve la curva al punto deseado de operación.

En la figura 7D existe el mismo desbalance que en C, aunque el ventilador está sobredimensionado. Se puede balancear el sistema como se hizo en C, pero, el flujo de aire puede ser superior al diseñado. El flujo de aire se puede dejar superior al diseñado o se puede disminuir al bajar la velocidad del ventilador o cerrando parcialmente el *dampers* de la tubería principal. El segundo método provocará un mayor consumo energético (ACGIH, 1998).

**Figura 7:** Ejemplos de curvas de un ventilador.



## 5. Motor

Todos los ventiladores deben ser impulsados por un motor. En unidades pequeñas, el ventilador incluye el motor. En unidades grandes, el ventilador y el motor son empacados por separado; el motor y el ventilador pueden estar unidos directamente o por una faja.

Al conectar el motor directamente al ventilador se logra un ensamblaje más compacto y asegura una velocidad constante del ventilador. La velocidad del ventilador se ve limitada por la velocidad del motor.

Conectar el motor al ventilador mediante una faja ofrece mayor flexibilidad, debido a que se puede cambiar la razón de las poleas.

Para seleccionar un motor o verificar si un motor es adecuado, se hace principalmente viendo que cumpla con los requerimientos del ventilador. Los fabricantes de ventiladores y de motores proveen especificaciones y clasificaciones para facilitar la selección.

Al diseñar un sistema nuevo, el sobredimensionar un motor ofrece la oportunidad de aumentar la capacidad del sistema si se necesita agregar más puntos de uso (ACGIH, 1998).

### Cálculos

Para dimensionar un motor se debe conocer la potencia requerida por:

$$ahp = (FTP * Q * d)/f$$

$$bhp = ahp/ME \quad \text{ó} \quad bhp = (FTP * Q * d)/(f * ME)$$

$$shp = bhp * Fdl$$

donde:

ahp = caballo de fuerza de aire (*air horsepower*) = Es la cantidad mínima de poder necesario para mover un volumen de aire en contra de la presión total del ventilador.

bhp = caballo de fuerza de freno (*brake horsepower*) = Es la potencia necesaria para operar el ventilador para que pueda entregar el volumen de aire contra la presión total del ventilador.

shp = bhp más cualquier pérdida de la impulsión, entre el ventilador y el eje del motor.

rhp = caballo de fuerza nominal (*rated horsepower*) = caballos de fuerza indicados en la placa del motor.

Nota: En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza kilowatt en vez de caballos de fuerza. En SI no hay equivalencia definida para caballo de fuerza de aire ni para caballo de fuerza de freno.

f es un factor en el denominador, en unidades métricas es 102.2 (en unidades inglesas el equivalente es a 6356).

F<sub>dl</sub> se refiere a pérdidas de la impulsión, donde está F aproximadamente:

- = 1.10 para la polea en los motores grandes
- = 1.30 para la polea en los motores pequeños (< 1.5 KW)
- = 1.05 para las impulsiones directas.

El proveedor del sistema debe proporcionar la pérdida por impulsión real del sistema.

Se debe utilizar un motor con un 33% adicional de potencia, respecto del shp determinado (Jorgensen, 1983).

## 6. Filtros

El diseño de los filtros de aire depende del grado de limpieza requerido. El mantenimiento regular de los filtros de aire aumenta su eficacia y reduce al mínimo la exposición del trabajador.

Los sistemas de filtración de aire remueven los contaminantes de la corriente de aire o gas. Están disponibles en una gran variedad de diseños, para cumplir con los distintos requerimientos de limpieza de aire. Para partículas contaminantes, los dispositivos de limpieza de aire están divididos en dos grupos: filtros de aire y colectores de polvo.

- Los filtros de aire están diseñados para remover concentraciones bajas de polvo del aire. Por ejemplo, para remover el polvo del aire atmosférico utilizado en sistemas de acondicionamiento de aire.
- Los colectores de polvo están diseñados para usos más pesados, como remover contaminantes de corrientes de gas provenientes de sistemas de extracción local en procesos industriales (vid. p. 55).

Los equipos de colección de polvo están disponibles en una gran variedad de tipos y capacidades. El criterio de selección debe incluir la eficiencia del equipo, costo inicial, costo de operación y mantenimiento, espacio y materiales de construcción (ACGIH, 1998).

## 7. Chimenea

Las chimeneas dispersan el aire del extractor en el ambiente. La cantidad de retorno al área de trabajo depende del volumen de aire extraído, de la velocidad y dirección del viento, de la temperatura, de la localización de los extractores, etc. Al instalar una chimenea se debe:

- Proporcionar la altura de chimenea amplia (un mínimo de 3 metros sobre el techo o tomas de aire adyacentes).
- Poner la chimenea viento abajo de tomas de aire.

- Proporcionar una velocidad de chimenea mínima de 1.4 veces la velocidad del viento.
- Colocar la chimenea tan lejos de las entradas como sea posible (se recomiendan 15 m).
- Colocar la chimenea por lo menos 3 m más alto que las azoteas, para evitar la recirculación (OSHA, 1994).

### III. JUSTIFICACIÓN

Para una planta de dentífricos, los ingredientes sólidos en polvo que se utilizan para la fabricación de la crema dental son constituyentes de gran importancia. Durante las operaciones de pesado y dosificación de estos ingredientes se libera gran cantidad de polvo al ambiente. Estas operaciones son llevadas a cabo manualmente, por lo que el polvo en el ambiente presenta riesgo para la salud de los operadores y riesgo de explosión.

El polvo que se libera al ambiente también representa un problema para la higiene del área. Luego de un período de tiempo, dichos polvos se depositan en las paredes, suelos y superficies de las áreas. Esto complica la limpieza del área y representa un riesgo potencial de contaminación y explosión.

En la actualidad la fábrica de dentífricos no cumple con los requerimientos corporativos de salud ocupacional en el área de fabricación, debido a la cantidad de polvos en el ambiente. Diseñar un sistema de recolección de polvos y recomendar un proveedor simplificaría a la empresa la instalación de dicho sistema y le permitiría cumplir con los requerimientos corporativos.

Un sistema de recolección de polvos también disminuiría el riesgo para la salud de los operadores. Además, disminuiría considerablemente el tiempo empleado por los operadores en la limpieza, lo que significaría menos tiempo de producción perdido en actividades no productivas.

El diseño del sistema de recolección de polvos también servirá para recolectar de manera separada los polvos de los fluoruros. Estas sustancias son tóxicas para las personas, por lo que recolectarlas separadamente permitirá tratarlas adecuadamente y evita que se descarten incorrectamente, por estar mezclados con otros desechos.

## IV. OBJETIVOS

### A) Objetivo General

Diseñar un sistema de colección de polvo para las operaciones manuales de pesaje y dosificación, en el área de fabricación de una planta de dentífricos.

### B) Objetivos Específicos

1. Determinar los caudales en los puntos de emisión de contaminantes, para alcanzar la velocidad de captura.
2. Determinar los requerimientos de presión en los conductos del sistema de recolección de polvos.
3. Determinar el tipo y diseño de los puntos de captura (e.j. campana) y su localización en la planta.
4. Diseñar el circuito de conductos y su diámetro, el tamaño del colector de polvo y la capacidad del ventilador de succión.
5. Evaluar distintas opciones en términos de capacidad e inversión inicial en equipos del sistema de colección de polvo.

## V. PROBLEMA A RESOLVER

Entre los constituyentes indispensables de la crema dental se encuentran materias primas en forma de polvos. Durante las operaciones manuales de pesado y dosificación de estos ingredientes, se libera gran cantidad de polvo al ambiente. Actualmente la planta no cuenta con sistema de colección de polvo. La generación de polvo es un riesgo para la salud de los operadores y riesgo de explosión.

Por ello es necesario diseñar un sistema de colección de polvo, que permita retirar los contaminantes del área de trabajo eficientemente y que permita recuperar estos contaminantes para descartarlos adecuadamente, sin contaminar el ambiente.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Análisis previo del proceso actual

1. Observar directamente las operaciones realizadas en el área de pesado y en el área de mezclado de la planta.
2. Determinar los puntos donde es necesario que exista colección de polvo, para evitar que sean respirados por lo operadores y que contaminen el ambiente de trabajo.

### B. Diseño del sistema de colección de polvo

1. Determinar qué tipo de colector de polvo se utilizará en esta aplicación.
2. Elegir qué tipo (diseño) de capilla es mejor para cada punto de captura, para optimizar el sistema de colección de polvos.
3. Calcular los flujos de aire y las presiones necesarias en cada punto de captura, para obtener la velocidad de captura deseada y una velocidad adecuada en los conductos.
4. Determinar el diámetro adecuado de los conductos para cada punto de uso.
5. Diseñar la distribución del sistema de conductos en la distribución de la planta.
6. Elegir qué tipo de ventilador se utilizará para lograr extraer los contaminantes del lugar de trabajo.
7. Determinar la forma de colección de polvo utilizada en el sistema.
8. Dimensionar el motor del ventilador.

### C. Recomendación de equipo.

1. Cotizar equipos comerciales que cumplan con los requerimientos de diseño
2. Hacer una recomendación a la planta.

## VII. RESULTADOS

Se diseñaron dos sistemas para la colección de polvo. El Sistema A sirve para los abrasivos y otros materiales utilizados. El Sistema B sirve para el área de pesaje de fluoruros.

**Tabla 3:** Tipo de capilla en los puntos de captura del Sistema A.

No.	Descripción	Tipo de capilla	Dimensiones de la entrada (alto x ancho, en metros)
1	Silo nuevo No. 1	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.8 x 2.4
2	Silo nuevo No. 2	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.8 x 2.4
3	Botado de supersacos de abrasivo	Ranura ( <i>flanged slot</i> )*	0.04 x 0.20
4	Dosificación de lauril sulfato de sodio	Ranura ( <i>flanged slot</i> )*	0.05 x 0.25
5	Silo de mezclador 2	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.8 x 1.2
6	Silo de mezclador 3	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.65 x 0.81
7	Silo de mezclador 1	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.65 x 0.81
8	Paila mezclador 1	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.38 x 0.38
9	Paila mezclador 2	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.38 x 0.38
10	Paila mezclador 3	Caseta ( <i>booth</i> )*	0.38 x 0.38

\* En el Apéndice B (vid. p. 51) se muestra una ilustración de este tipo de casilla.

**Tabla 4:** Requerimientos del Sistema A.

Descripción	Valor
Tipo de ventilación	Ventilación por Extracción Local
Presión total de succión requerida	6.214 KPa
Flujo volumétrico requerido	7.33 metros cúbicos por segundo
Puntos de uso	10
Potencia del motor	71 KW
Material del medio filtrante	Polipropileno con poro menor a 100 $\mu$ m
Área de filtración	361 metros cuadrados
Tipo de rodete	Álabes inclinados hacia atrás

**Tabla 5:** Equipo recomendado para el Sistema A.

Empresa	Compañía 1
Colector	Wheelabrator air pollution control, tipo <i>jet pulse</i> .
Caudal de aire	7.55 metros cúbicos por segundo
Area / unidad filtrante	15.71
No. de mangas de filtrado	260
Temperatura máxima de manejo	366.15 K
Material de las bolsas	Polipropileno punzonado
Válvula de descarga	Rotoesclusa motorizada (motor 0.745 KW SEW)
Area filtrante (metros cuadrados)	379
Material de construcción	Acero ASTM A-36
Sistema de limpieza	Válvulas solenoides con temporizadores
Ventilador centrífugo	Chicago Blower 5500 SW, tamaño 4014
Motor del ventilador	48.47 KW, 1800 RPM, 230-460 VAC, 3 Fases y 60
Presión estática del ventilador	6.47 KPa
Peso total de los equipos	10600 kg
Tiempo de entrega	9 - 10 semanas
Condiciones de entrega	<i>Ex - Works Cali - Colombia</i>
Garantía	12 meses a partir de la fecha de operación. 18 meses
Precio de Colector de polvos	Q266,000.00
Precio de rotoesclusa	Q12,500.00
Precio de ventilador	Q45,000.00
Precio de motor del ventilador	Q19,000.00
Costo de transporte	Q23,000.00
Precio Total	<b>Q365,500.00</b>

**Tabla 6:** Tipo de capilla para el Sistema B.

No.	Descripción	Tipo de capilla	Dimensiones (alto x ancho, en metros)
1	Cuarto de pesaje	Caseta (booth)*	0.9 x 1.2

\*En el Apéndice B (vid. p. 51) se muestra una ilustración de este tipo de capillas.

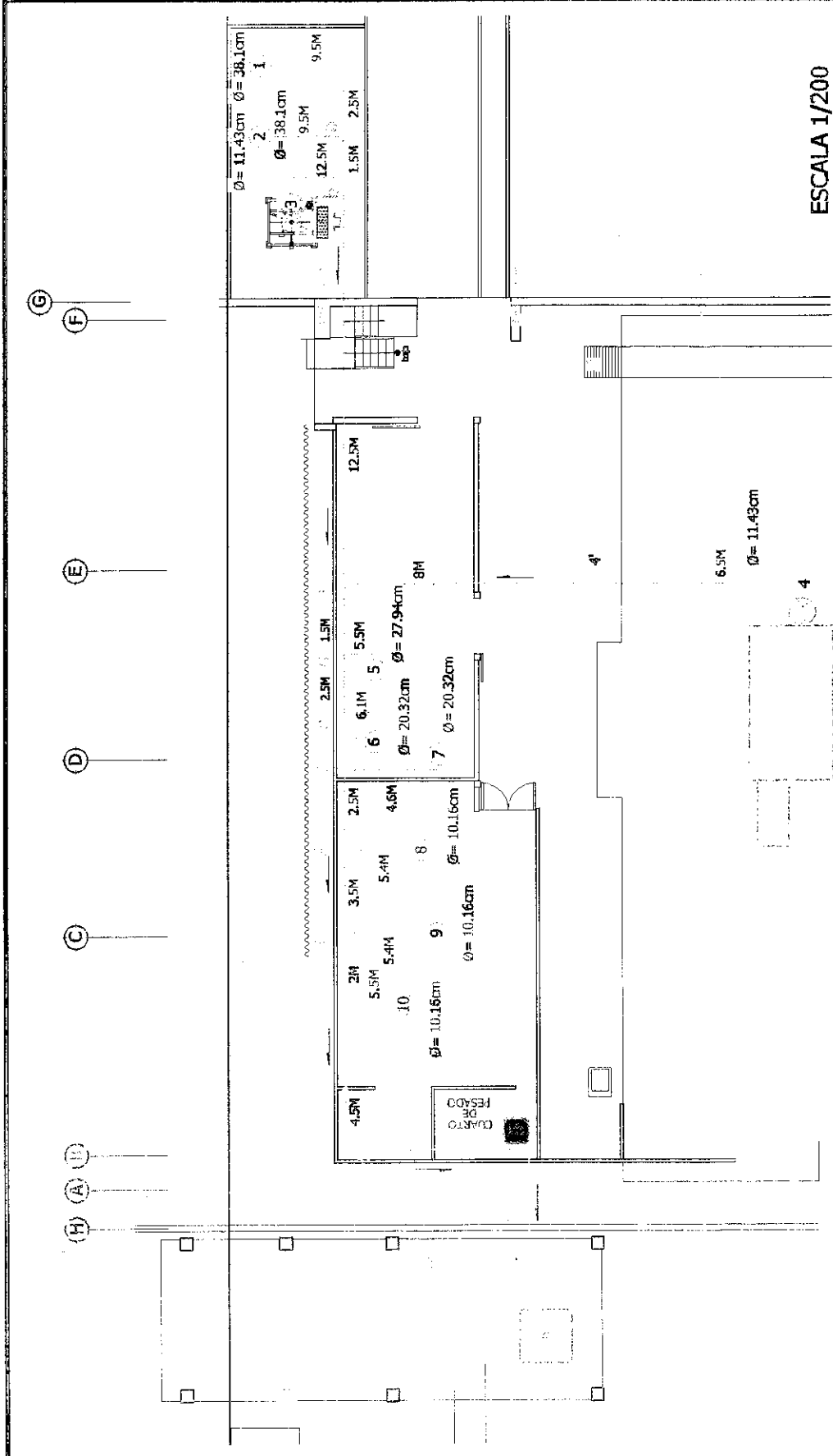
**Tabla 7:** Requerimientos del Sistema B.

Descripción	Valor
Tipo de ventilación	Ventilación por Extracción Local
Presión total de succión	1.00 KPa
Flujo volumétrico requerido	1.18 metros cúbicos por segundo
Puntos de uso	1
Potencia del motor	1.85 KW
Area de filtración	58 metros cuadrados
Tipo de rodete	Álabes inclinados hacia atrás

**Tabla 8:** Equipo recomendado para el Sistema B.

Empresa	Compañía 4
Modelo	LFI-4RFT-30
Caudal de aire	0.48 - 1.03 metros cúbicos por segundo
Unidad filtrante	Pre-Filtro de alta eficiencia, Filtro HEPA con capacidad nominal de 99.99% y filtro HEPA adicional en la descarga 99.99%
Material de construcción	Acero Inoxidable 316 L
Requerimientos eléctricos	115 ó 220V 50/60 Hz, 10 Amp.
Tiempo de entrega	3 - 4 semanas
Condiciones de entrega	Frontera con Guatemala
Garantía	12 meses a partir de la fecha de entrega.
Precio de la unidad	Q106,200.00
Precio de unidad para ajustar altura	Q10,800.00
Precio Total	<b>Q117,000.00</b>

**Figura 8:** Plano de la ubicación de los puntos de captura y distribución de conductos (vid. p. 46).



ESCALA 1/200

SISTEMA A  
SISTEMA B

PUNTOS DE CAPTURA DEL SISTEMA A

- |  |                        |
|--|------------------------|
| 1. Silo nuevo No.1                         | 6. Silo de mezclador 3 |
| 2. Silo nuevo No. 2                        | 7. Silo de mezclador 1 |
| 3. Botado de supersacos de abrasivo        | 8. Paila mezclador 1   |
| 4. Dosificación de Lauril Sulfato de sodio | 9. Paila mezclador 2   |
| 5. Silo de mezclador 2                     | 10. Paila mezclador 3  |

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

CONTENIDO  
FIGURA No. 6  
PLANO DE LA UBICACIÓN DE LOS  
PUNTOS DE CAPTURA Y LA DISTRIBUCIÓN  
DE CONDUCTOS

NOMBRE: L. LOPEZ RIVERA

CÓDIGO: 10-1391

SISTEMA A, PARTO No 2 Y 3

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo se presenta el diseño de dos sistemas de colección de polvo para una planta de dentífricos. Es necesario contar con dos sistemas separados para no mezclar fluoruros con otros componentes (vid. p. 32).

El propósito de la recolección de polvo es controlar la contaminación del aire, reducción de mantenimiento del equipo y la eliminación de riesgos contra la seguridad y la salud.(Perry, 1999) Con la instalación y correcta operación de los sistemas propuestos (vid. pp. 37 y 38) se cumplirán estos propósitos.

El primer paso en el proceso de diseño es revisar las operaciones de pesado y dosificación en la planta de dentífricos. También se revisaron las características de los materiales que generan polvo durante estas operaciones. Se determinó que se debe instalar un sistema de ventilación industrial. Se compararon los cinco tipos de sistemas (vid. p. 4). Se descartó un sistema de HVAC debido a que este tipo de ventilación se utiliza para la comodidad en el área de trabajo (para mantener condiciones de temperatura, humedad y flujo de aire), no permite extraer contaminantes del lugar de trabajo. No se puede utilizar sistemas de recirculación ni tampoco de reemplazo de aire debido a que no se elimina el riesgo para la salud de los trabajadores ni tampoco se mejora la limpieza del área. El sistema de extracción general es apropiado para aplicaciones donde los contaminantes son poco dañinos, preferiblemente gases, las fuentes de emisión son móviles y las emisiones son uniformes (OSHA, 1994). Debido a que esas características no coinciden con la operación en la planta de dentífricos no se consideró este tipo de sistemas. Se eligió un sistema de ventilación por extracción local debido a que:

- Los contaminantes son peligrosos.
- Las emisiones varían con el tiempo (en la planta se utiliza operación tipo lote o batch).
- Las fuentes de emisión están bien definidas.
- Los operadores trabajan en la vecindad de los puntos de emisión y reducir el aire extraído representa un gran ahorro en energía.

El diseño debe partir del tipo de contaminantes y características de las fuentes de emisión. La característica más importante de los materiales para el diseño del sistema de ventilación es la velocidad de captura. Se encontró que la velocidad de captura recomendada es de 1.02 m/s, pero, al comparar con otras fábricas de dentífricos se encontró que la velocidad de captura recomendada era de 1.1 m/s (vid. p. 48) para asegurar la captura de los distintos materiales. En este trabajo se utilizó esta última velocidad, por ser la más estricta y asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Al diseñar estos sistemas se consideró el tipo de operación que se realiza en cada punto de emisión de contaminantes. Se tomó en cuenta la posición del operador (para determinar el área de respiración y evitar que los contaminantes lleguen a ella). Se le dio mucha importancia a la forma en que se realiza la operación, pues una de las principales causas por las que los operadores no utilizan los sistemas de ventilación o los bloquean, es porque interfieren con el trabajo o con la productividad (OSHA, 1994).

Se buscó que el diseño de la capilla permitiera capturar a los contaminantes de manera eficiente (vid. p. 52). Se optó por dos tipos de capillas (vid. pp. 36 y 37): 1. Ranura ensanchada (*flanged slot*); 2. Caseta (*booth*). Estos diseños permiten capturar a los contaminantes retirando una baja cantidad de aire, además de ser adecuados para las operaciones realizadas. En cada punto de uso se dimensionó la capilla para adecuarla a las necesidades de captura (vid. p. 56). Se buscó utilizar las capillas tipo caseta en todos los puntos donde fuera posible, debido a que retiran una menor cantidad de aire (porque rodean o envuelven al punto de emisión).

Para comparar la eficiencia de las capillas de tipo caseta con las de ranura ensanchada se diseñaron dos veces las capillas de los puntos No. 8, 9 y 10, una vez con cada tipo de capilla (vid. p. 61). Se obtuvo que al utilizar capillas de ranura ensanchada se requería un flujo volumétrico 105% y una presión 179% mayor que si se utiliza capilla tipo caseta. Al utilizar estos datos para calcular la potencia del motor del ventilador requerido, se observó que con ranura ensanchada se hubiera necesitado 34 KW (equivalente a un 48%) más de potencia que con diseño de caseta (vid. pp. 38, 56 y 61). En el Sistema A se utilizó capilla tipo ranura en los puntos No. 3 y 4 (vid. p. 36) debido a que la operación no permite utilizar caseta, además el área de respiración del operador está relativamente cerca del punto de emisión.

Para verificar el diseño de las capillas se utilizó la sugerencia de OSHA (1994) de verificar mediante la regla de 1.5 diámetros. Esta regla indica que el punto de captura no debe estar a más de 1.5 veces el diámetro de la cara o apertura de la capilla y es aplicable a capillas simples de captura. Esta regla se cumple para todas las capillas de caseta (*booth*), debido a que los puntos de emisión de contaminantes son envueltos por la capilla. Sin embargo, esta regla no se aplica para las capillas en forma de ranura ensanchada (*flanged slot*), debido a que no son capillas simples de captura.

Los sistemas de conductos fueron diseñados para cumplir con la velocidad mínima requerida. Esta velocidad mínima sirve para garantizar que no existirá acumulación del polvo por sedimentación en los conductos (al bloquearse los conductos el sistema se vuelve ineficiente para extraer polvo). Todos los conductos son circulares para evitar acumulación de productos. El material recomendado para los conductos es PVC o aluminio, por tratarse de materiales que no reaccionaran con los contaminantes transportados y porque no ocasionarán corrosión galvánica a las tuberías de acero inoxidable utilizadas en el proceso de los dentífricos. Además estos materiales son considerados sanitarios, por lo que no ocasionarán contaminación en los procesos. En la Figura 8 (vid. p. 39) se ve la disposición de los conductos en la planta. Esta disposición estuvo condicionada por la existencia de soportes de tuberías definidos (*rack*) para los servicios. Los conductos se diseñan de forma que la tubería de mayor diámetro quede cerca del ventilador, para evitar que exista mucha diferencia de velocidad entre el conducto principal y los ramales. Esto también sirve para evitar que la fricción debida al conducto aumente la presión estática del sistema y lógicamente los requerimientos de potencia del motor.

Los sistemas de conductos contribuyen con la presión estática de succión del sistema. Un 20% del total del requerimiento del sistema A se debe a los conductos (vid. p. 36). Una parte de la pérdida se debe a la fricción y otra parte a los acoples de los ramales con el conducto principal. En el Sistema A, el conducto del punto No. 4 al ramal principal es la causa mayor de pérdida debido a fricción (vid. p. 58). Esto se debe a que el punto de captura No. 4 se encuentra lejos del resto del sistema (vid. p. 39). En el diseño se consideró acoples en ángulos de 30° (vid. p. 57) debido a que se recomienda que este ángulo sea igual o menor a 30° (vid. p. 50). Si el acople fuera a 90° la pérdida por acople aumentaría 455% (vid. p. 58).

Al calcular la presión estática requerida en cada punto se sugiere considerar una compuerta de control (*damper*) en cada ramal (Jorgensen, 1983). En el presente diseño se consideró sólo un *damper* para todo el sistema. La existencia de un *damper* en cada ramal eleva considerablemente el costo del sistema, pues implica 0.249 kPa de SP por cada ramal. Lo que ocasiona un aumento de 36% de presión estática de todo el sistema y un requerimiento de 36% más de potencia del motor (por ser directamente proporcionales, vid. p. 20). Usualmente en la industria no se coloca un *damper* en cada ramal de un sistema de extracción local.

Si un sistema tiene velocidades en conducto muy altas en las cercanías del ventilador, ocasionará un desbalance en el sistema. Los ramales cercanos al ventilador tendrán mayor flujo que los ramales lejanos al ventilador. El objetivo de colocar *dampers* en cada ramal es poder balancear el sistema si esto ocurre. En este trabajo se diseñó el sistema de conductos para que la velocidad fuera cercana a 1066 m/s (vid. p. 58). Se diseñó el sistema para que la velocidad en el conducto principal fuera similar a la velocidad en los ramales, y así evitar que el sistema pierda su balance. Por esta razón no es necesario poner *dampers* en cada ramal.

Para la limpieza de la corriente de aire en el Sistema A se seleccionó un equipo de recolección de polvo, tipo filtro de tela. No se utilizó cámara de gravedad, separadores por choque, separadores de ciclón, separadores centrífugos, depuradores de aire o depuradores eléctricos debido a que el flujo de aire es relativamente bajo. Además, se busca que el mecanismo de limpieza de aire sea altamente eficiente (para evitar contaminación ambiental). Se eligió un sistema de limpieza tipo filtro de tela (de mangas). Se eligió un medio filtrante (vid. pp. 36 y 55) que se adapte a las características del contaminante recolectado (principalmente abrasivos). El área de filtración (vid. pp. 36 y 37) permite determinar el número de mangas que se necesitaran para la aplicación. El área filtrante efectiva de cada manga depende de las especificaciones del fabricante.

Para no interrumpir la operación del colector de polvo se consideró que el sistema incluyera un dispositivo de limpieza tipo limpieza por pulsos inversos (Jorgensen, 1983), que se active al detectar una presión diferencial mayor a 0.99 kPa. Se permite esta caída de presión para permitir la formación de torta del contaminante

sobre el medio filtrante y así mejorar la eficiencia de filtración (ACGIH, 1998). La ventaja de este tipo de limpieza es que no interrumpe la operación del equipo (el impulso se da por secciones de mangas) y permite que los contaminantes caigan a la tolva del colector de polvo. El equipo sugerido (vid. p. 37) cuenta con esclusa mecánica para facilitar la limpieza. También cuenta con control automático de presión diferencial, para activar el sistema de impulsos inversos. Este sistema de limpieza permitirá ahorrar tiempo a los trabajadores, puesto que gastarán menos tiempo en limpieza del área y la recolección del polvo en el sistema será rápida.

Al seleccionar el tipo de ventilador para crear la succión necesaria (presión y flujo volumétrico) se eligió un ventilador centrífugo. No se puede utilizar un ventilador axial para esta aplicación debido a que se utilizan para mover aire en contra de presiones bajas. Mientras que los ventiladores centrífugos se utilizan ampliamente para ventilación industrial (ACGIH, 1998). Dentro de los tipos de ventiladores centrífugos se eligió uno de aspas inclinadas hacia atrás. Este tipo de ventiladores consumen más energía que un ventilador aerodinámico, pero, tendrán una mayor vida operando dentro de una atmósfera erosiva (COIN).

El ventilador y el dispositivo de limpieza de aire estarán ubicados en una estructura fuera de la planta. Esto permitirá liberar el aire extraído fuera del lugar de trabajo, para evitar la posibilidad de retornar contaminantes (en caso de mal funcionamiento del medio filtrante). Esta disposición (*layout*) también permite que el ventilador opere en un área donde no se mantiene personal, para evitar contaminación de ruido en el área de trabajo.

El sistema está diseñado para los puntos de uso actuales y para dos futuros puntos de uso. Al empezar a utilizarse los dos puntos nuevos de uso se dejarían de utilizar dos puntos actuales (en el sistema A, los puntos No. 1 y 2 sustituirían a los puntos 5 y 7, vid. p. 36). De esta forma se garantiza la flexibilidad del sistema para los cambios y para poder incluir otro punto de uso, si el crecimiento de la planta lo necesita. Antes de instalar cualquier punto de uso no considerado en el diseño actual se debe hacer una revisión de la capacidad instalada (vid. p. 37) y de los requerimientos del nuevo punto de uso. El sistema A se diseñó de esta forma debido a que otra falla usual en los sistemas de ventilación es que los sistemas no son suficientes para controlar las emisiones contaminantes (OSHA, 1994).

Debido a que las operaciones realizadas en los distintos puntos de emisión de contaminantes del Sistema A son independientes y pueden ser realizadas de forma simultánea, es necesario que todos los puntos de captura funcionen todo el tiempo. No es posible apagar los puntos de captura que no se estén utilizando debido a que provocaría un desbalance en el sistema.

Al completar el diseño de los sistemas se resumieron los requerimientos de cada sistema (vid. pp. 36 y 38) y las especificaciones de cada punto de uso. Luego se solicitó a diferentes compañías que cotizaran el sistema. Se seleccionaron estas tres compañías debido a que presentaron certificaciones que confirman la calidad de sus productos (certificaciones AMCA y constancias de otros proyectos similares). Se compararon las propuestas de cada compañía (vid. p. 60). El tiempo de entrega fue similar para las tres compañías, siendo ligeramente menor el de la Compañía 1. Esta misma empresa fue quien presentó más certificaciones de calidad de sus productos, así como un listado de proyectos similares en los que ha participado (incluyendo varios con la misma compañía de dentífricos). La garantía de los equipos es la misma con las tres empresas, 12 meses a partir de la fecha de arranque o 18 meses a partir de la fecha de entrega. El costo total del proyecto es menor con Compañía 1 que con las otras empresas. Basado en los aspectos anteriores (calidad, tiempo de entrega, precio y garantía) se escogió el producto ofrecido por Compañía 1.

Al solicitar a las tres compañías que cotizaran, ellas realizaron una revisión del diseño del colector de polvo y del ventilador (para determinar el modelo que se ajusta a las necesidades del Sistema A). Se encontró que los motores propuestos para el ventilador son de menor potencia que el diseñado. Sin embargo, sus propuestas cumplen con los caudales y presiones especificados en el diseño. Las diferencias se deben a que los fabricantes cuentan con las curvas de sus ventiladores, para determinar la potencia del motor. Estas curvas cambian dependiendo del ventilador. Se observó en las cotizaciones que la Compañía 1 y la Compañía 3 tienen valores similares de caudal y presión estática para sus sistemas, sin embargo la potencia de los motores es muy diferente (vid. p. 60). Esto confirma que el motor debe ser seleccionado específicamente para cada ventilador y que las fórmulas recomendadas por ACGIH son solamente una aproximación.

El sistema B por ser sólo de un punto de captura no necesita considerar pérdidas de presión debidas a acople de ramales. Los requisitos que debe cumplir este sistema están en la tabla 7 (vid. p. 38). El equipo comercial recomendado para el sistema B tiene un flujo volumétrico menor al diseñado. Esto se debe a que la boca (o cara de la caseta) es de menores dimensiones. Al ser de menores dimensiones se requiere menor caudal para alcanzar la velocidad de captura necesaria. Este sistema ofrecido por la Compañía 4 cuenta con una unidad para ajustar la altura del equipo.

El sistema cotizado por la Compañía 4 tiene variador de velocidad, y con ello se logra alcanzar la velocidad de captura de los materiales. Al alcanzar la velocidad de captura se asegura que se cumpla con los demás parámetros de diseño. Debido a que este sistema es compacto y la unidad incluye todo el equipo, no existen largos sistemas de conductos.

El sistema local de extracción de la Compañía 4, utiliza filtros HEPA como dispositivo de limpieza de aire. Cuenta con prefiltro, filtro a la entrada y filtro a la salida, lo que garantiza que se capturen los contaminantes presentes en el aire. Adicionalmente la descarga de aire se hace al exterior, para asegurar que no se liberen contaminantes en el lugar de trabajo, además se evitan corrientes de aire que pueden afectar la succión de aire.

Este sistema se recomienda porque cumple con los parámetros de diseño, las superficies son de material sanitario (acero inoxidable 316 L), es eficiente en extracción de aire y su costo es relativamente bajo. El equipo cuenta con alarmas sonoras y visuales que advierten cuando no se alcanza la velocidad requerida, lo que indica al operador que no se está alcanzando la velocidad de captura. Los filtros serán descartados de acuerdo a los procedimientos de la empresa o de Guatemala (se cumplirán los más estrictos) para asegurar que no se produzca contaminación.

Como se ve en la Tabla 5 y en la Tabla 8 (vid. pp. 37 y 38) se obtuvo el costo del equipo principal del sistema de colección de polvo (no se incluye equipo auxiliar). Para el Sistema A se propusieron tres opciones y finalmente se seleccionó la propuesta con menor precio. El precio fue un factor muy importante para tomar una decisión, pero, se consideró que el sistema cumpliera con los requerimientos del diseño.

## IX. CONCLUSIONES

1. Se deben instalar dos sistemas de ventilación para disminuir los riesgos de salud para los empleados. La instalación de dos sistemas separados permitirá separar los fluoruros del resto de contaminantes, para descartarlos adecuadamente y sin causar contaminación.
2. Se debe utilizar un sistema de ventilación por extracción local para extraer los contaminantes del lugar de trabajo eficientemente, retirando bajas cantidades de aire y capturando los contaminantes para evitar contaminación al ambiente.
3. Se determinó que el mejor tipo de capilla para los puntos de captura es la de tipo caseta, debido a que disminuye el flujo volumétrico y la presión estática de succión. Donde no fue posible utilizarla, se eligió el tipo ranura ensanchada, debido a que se adaptaba a la aplicación.
4. El rango de diámetros de los conductos, para el sistema A, va de 10.16 cm a 38.10 cm y el diámetro del conducto principal va de 38.10 cm a 71.20 cm. Estos diámetros evitan que exista sedimentación de los contaminantes transportados y permite que las velocidades del sistema estén balanceadas.
5. Los acoples de los ramales al sistema principal se diseñaron con un ángulo de entrada de 30° para disminuir la caída de presión.
6. Se debe instalar un damper de control en todo sistema, debido a que si se instala un damper en cada ramal, aumenta el requerimiento de presión estática en un 36% y aumenta la el requerimiento de potencia del motor en 36%.
7. Se determinó que se debe utilizar un ventilador centrífugo de aspas inclinadas hacia atrás, con un motor de 71 KW, debido a que puede generar altas presiones de succión y es adecuado para aplicaciones de colección de polvo.
8. Se debe utilizar el equipo cotizado por la Compañía 1 para el Sistema A, debido a que es el mejor en términos de calidad, tiempo de entrega, precio y garantía.

9. Los costos estimados de los equipos principales seleccionados para los sistemas de ventilación general de la planta y para fluoruros son Q 365,500.00 y Q 117,000.00 respectivamente.

## X. RECOMENDACIONES

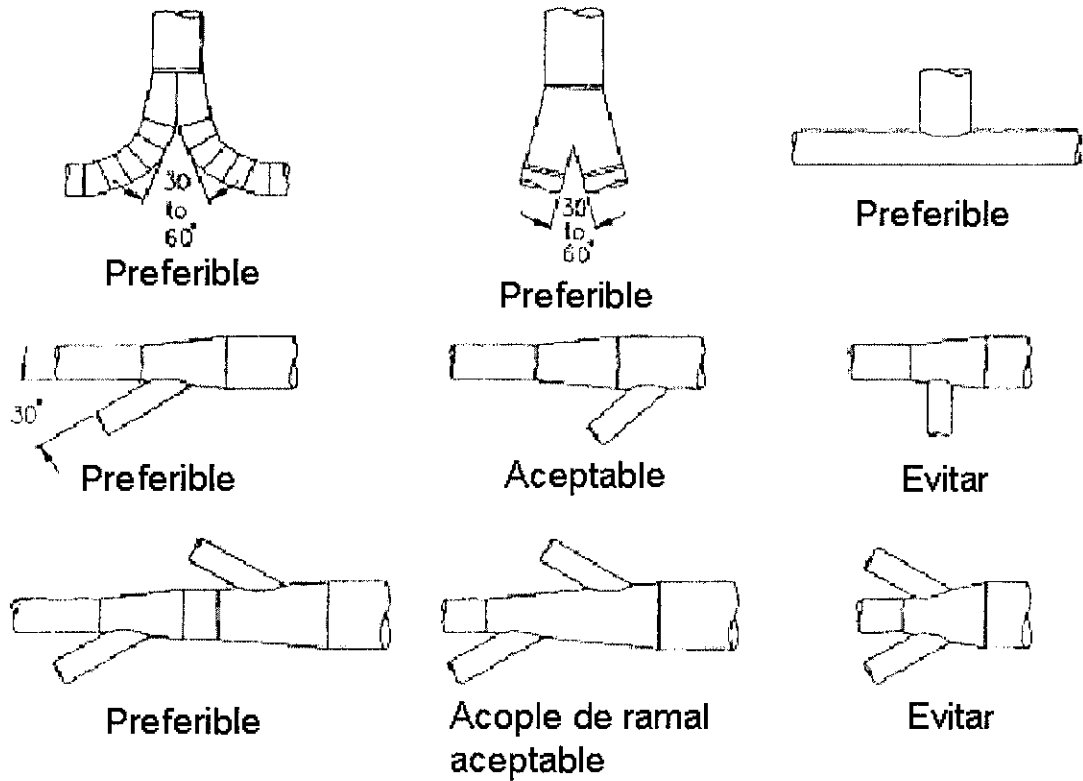
- A. Se recomienda instalar un sistema de extracción local para capturar los vapores orgánicos de los aceites esenciales utilizados como materia prima en la planta de dentífricos. Los puntos de emisión de vapores orgánicos son distintos de los puntos de emisión de polvo. Este sistema deberá ser independiente de los sistemas de colección de polvo y podrá operarse paralelamente a ellos.
- B. Para disminuir el costo del sistema de limpieza de polvo se recomienda evaluar la posibilidad de comprar sólo el pleno (*plenum*) a la Compañía 1, y fabricar localmente la parte inferior del la unidad (la tolva de captación de polvo).
- C. Se recomienda que al instalar el sistema de extracción, se dé entrenamiento a los operadores para asegurar la correcta operación, control, mantenimiento y limpieza del equipo. También se deben proporcionar procedimientos para la operación y mantenimiento del equipo, para asegurar un correcto desempeño durante la puesta en marcha y en la operación normal del equipo.
- D. Al instalar el equipo se deben hacer mediciones de velocidad de aire en los puntos de emisión y de caídas de presión, para asegurar que se esté alcanzando la velocidad de captura de los materiales. También se deben programar y realizar revisiones periódicas y llevar registro de las mismas. Esto servirá para verificar el desempeño del sistema.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH). 1998. *Industrial Ventilation, A Manual for Recommended Practice*. 23 ed. Section 3,5 ACGIH. USA.
2. American Industrial Hygiene Association (AIHA). 1999. *Engineering Reference Manual*. 2 ed. AIHA Press. USA. pp 37-56.
3. Burgess, W. A. et al. 1989. *Ventilation and Control of the Work Environment*. New York. Wiley Interscience.
4. COIN. 2000. *Selección de ventiladores*. Curso 100. Colombia.
5. Jorgensen, R. et al. 1983. *Fan Engineering*. 8th ed. Buffalo, NY. Buffalo Forge Co. pp 61-103, 471-480.
6. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1987. *Guidance for Indoor Air Quality Investigations*. Cincinnati.
7. Perry, R. y D. Green. 1999. *Chemical Engineering Handbook*. McGraw Hill. Capítulo 17. USA.
8. U.S. Department of Labor Occupational Safety & Health Administration (OSHA). *29 CFR 1910.94*. Sección III: Capítulo 3. USA.

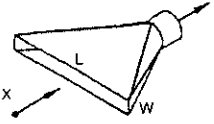
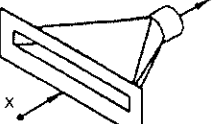
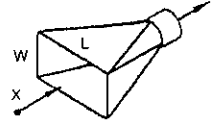
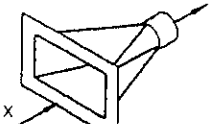
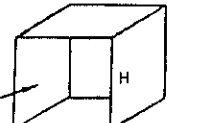
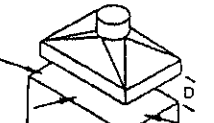
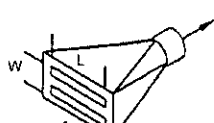
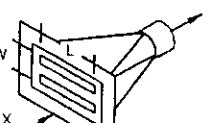
## IX. APÉNDICES

### Apéndice A: Diseño del sistema de conductos

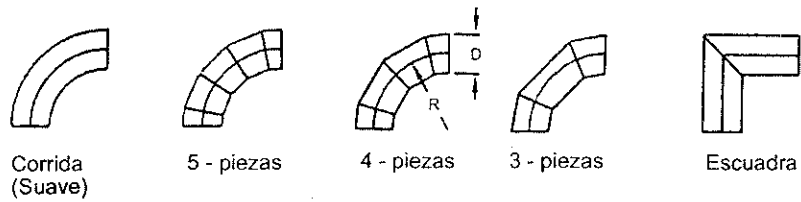


Los ramales deben entrar a una expansión gradual y en un ángulo 30° o menos. Puede ser de 45° si es necesario.

**Apéndice B:** Ecuaciones de flujo de aire para varios diseños de capillas.

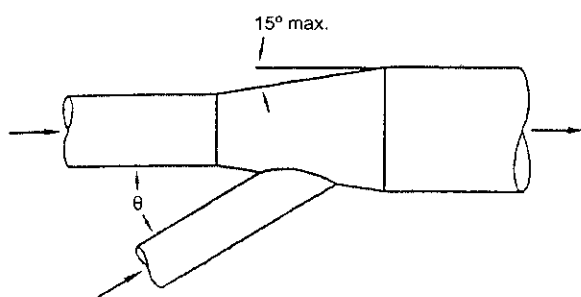
Tipo de	Descripción	Razón ancho/largo (W/L)	Flujo de Aire
	Ranura (Slot)	0.2 o menos	$Q = 3.7 LVX$
	Ranura ensanchada (flanged slot)	0.2 o menos	$Q = 2.6 LVX$
	Apertura simple	0.2 o mayor y redondo	$Q = V (10X^3 + A)$
	Apertura ensanchada (flanged opening)	0.2 o mayor y redondo	$Q = 0.75 V (10X^3 + A)$
	Caseta (booth)	Depende del lugar de trabajo	$Q = VA = VWH$
	Pabellón (canopy)	Depende del lugar de trabajo	$Q = 1.4 PVD$ P = perímetro D = altura sobre el área de trabajo
	Ranuras múltiples	0.2 o mayor	$Q = V (10X^3 + A)$
	Ranuras múltiples ensanchadas (flanged multiple slot opening)	0.2 o mayor	$Q = 0.75 V (10X^3 + A)$

**Apéndice C: Caída de presión debida a codos.**



	R/D					
	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50
Continuo	0.71	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12
5 piezas	---	0.46	0.33	0.24	0.19	0.17*
4 piezas	---	0.50	0.37	0.27	0.24	0.23*
3 piezas	0.90	0.54	0.42	0.34	0.33	0.33*

**Apéndice D:** Pérdidas debidas a acople de ramales a conducto principal.



Ángulo (grados)	Fracción de Pérdida de SP en el ramal
10	0.06
15	0.09
20	0.12
25	0.15
30	0.18
35	0.21
40	0.25
45	0.28
50	0.32
60	0.44
90	1.00

Nota: La pérdida por el acople de ramal se asume que ocurre en el ramal y así es calculado.

**Apéndice E: Pérdidas debidas a fricción en conductos.**

Hierro negro, aluminio, acero Inoxidable, ductos de PVC

Diámetro (cm)	Diámetro (pulgadas)	Pérdida por fricción, No. VP por 30 cm (1 ft)					
		305 m/min (1000 fpm)	610 m/min (2000 fpm)	915 m/min (3000 fpm)	1219 m/min (4000 fpm)	1524 m/min (5000 fpm)	1829 m/min (6000 fpm)
1.27	0.5	0.6757	0.7963	0.7533	0.7242	0.7024	0.6851
2.54	1	0.3801	0.3457	0.327	0.3143	0.3049	0.2974
3.81	1.5	0.2333	0.2121	0.2007	0.1929	0.1871	0.1825
5.08	2	0.1650	0.1500	0.1419	0.1364	0.1323	0.1291
6.35	2.5	0.1261	0.1147	0.1085	0.1043	0.1012	0.0987
7.62	3	0.1013	0.0921	0.0871	0.0837	0.0812	0.0792
8.89	3.5	0.0841	0.0765	0.0724	0.0696	0.0675	0.0658
10.16	4	0.0718	0.0651	0.0616	0.0592	0.0574	0.0560
11.43	4.5	0.0621	0.0565	0.0535	0.0514	0.0499	0.0486
12.70	5	0.0547	0.0498	0.0471	0.0453	0.0439	0.0428
13.97	5.5	0.0488	0.0444	0.042	0.0404	0.0392	0.0382
15.24	6	0.044	0.04	0.0378	0.0364	0.0353	0.0344
17.78	7	0.0365	0.0332	0.0314	0.0302	0.0293	0.0286
20.32	8	0.0311	0.0283	0.0267	0.0257	0.0249	0.0243
22.86	9	0.027	0.0245	0.0232	0.0223	0.0216	0.0211
25.40	10	0.0238	0.0216	0.0204	0.0197	0.0191	0.0186
27.94	11	0.0212	0.0193	0.0182	0.0175	0.0170	0.0166
30.48	12	0.0191	0.0174	0.0164	0.0158	0.0153	0.0149
33.02	13	0.0173	0.0158	0.0149	0.0143	0.0139	0.0136
35.56	14	0.0158	0.0144	0.0136	0.0131	0.0127	0.0124
38.10	15	0.0146	0.0133	0.0125	0.0121	0.0117	0.0114
40.64	16	0.0135	0.0123	0.0116	0.0112	0.0108	0.0106
43.18	17	0.0125	0.0114	0.0108	0.0104	0.0101	0.0098
45.72	18	0.0117	0.0106	0.0101	0.0097	0.0094	0.0092
48.26	19	0.011	0.0100	0.0094	0.0091	0.0088	0.0086
50.80	20	0.0103	0.0094	0.0089	0.0085	0.0083	0.0081
53.34	21	0.0097	0.0088	0.0084	0.0080	0.0078	0.0076
55.88	22	0.0092	0.0084	0.0079	0.0076	0.0074	0.0072
58.42	23	0.0087	0.0079	0.0075	0.0072	0.0070	0.0068
60.96	24	0.0083	0.0075	0.0071	0.0068	0.0066	0.0065
63.50	25	0.0079	0.0072	0.0068	0.0065	0.0063	0.0062
66.04	26	0.0075	0.0068	0.0065	0.0062	0.0060	0.0059
68.58	27	0.0072	0.0065	0.0062	0.0059	0.0058	0.0056
71.12	28	0.0069	0.0063	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054
73.66	29	0.0066	0.006	0.0057	0.0055	0.0053	0.0052
76.20	30	0.0063	0.0058	0.0054	0.0052	0.0051	0.005
78.74	31	0.0061	0.0055	0.0052	0.0050	0.0049	0.0048
81.28	32	0.0059	0.0053	0.0050	0.0048	0.0047	0.0048

Apéndice F: Características de materiales para filtros.

Nombre Genérico	Ejemplo de Nombres Comerciales de la Tela	Temp. Máx. °C		Resistencia a acciones físicas				Resistencia a Químicos					
		Continuo	Intermitente	Calor Seco	Calor Húmedo	Abrasión	Agitación	Flexing	Ácido Mineral	Ácido Orgánico	Alcalis	Oxidantes	Solventes
Algodón	Algodón	82	---	B	B	R	B	B	M	B	R	R	E
Poliéster	Dacron; Fortrel; Vicrón; Codel;	135	---	B	R	B	E	E	B	B	R	B	E
Acrílico	Orlon; Acrilan; Creslan; Dralon; Zefran	135	140	B	B	B	B	E	B	B	R	B	E
Modacrílico	Dinel; Verel	71	---	R	R	R	M-R	B	B	B	B	B	B
Nylon	Nylon; Nylon; Nomex	107	---	B	B	E	E	E	M	R	B	R	E
Polipropileno	Vectra; Reevon;	93	121	B	R	E	E	E	E	E	E	B	B
Tefón	Herculon	260	287	E	E	M-R	B	B	E	E	E	E	E
Fluorocarbono	Tefón TFEM;	232	---	E	E	M-R	B	B	E	E	E	E	E
Vinyan	Tefón FEPO	176	---	R	R	R	B	B	E	E	B	B	M
Vidrio	Vinyon; ClewylM	126	315	E	E	M	M	R	E	E	R	E	E
Lana	Vidrio	101	121	R	R	B	R	B	R	R	M	M	R

E = Excelente  
 B = Bueno  
 R = Regular  
 M = Malo

**Apéndice G:** Datos intermedios de los sistemas de ventilación por extracción local**Tabla 9:** Velocidad de captura para los materiales de la planta de dentífricos.

Vc	1.1 m/s
----	---------

**Tabla 10:** Diseño y tamaño de las capillas del Sistema A.

No.	Descripción	Tipo de capilla	Dimensiones de la entrada (alto x ancho, en metros)
1	Silo nuevo No. 1	Caseta (booth)	0.8 x 2.4
2	Silo nuevo No. 2	Caseta (booth)	0.8 x 2.4
3	Botado de supersacos de abrasivo	Ranura (flanged slot)	0.04 x 0.20
4	Dosificación de lauril sulfato de sodio	Ranura (flanged slot)	0.05 x 0.25
5	Silo de mezclador 2	Caseta (booth)	0.8 x 1.2
6	Silo de mezclador 3	Caseta (booth)	0.65 x 0.81
7	Silo de mezclador 1	Caseta (booth)	0.65 x 0.81
8	Paila mezclador 1	Caseta (booth)	0.38 x 0.38
9	Paila mezclador 2	Caseta (booth)	0.38 x 0.38
10	Paila mezclador 3	Caseta (booth)	0.38 x 0.38

**Tabla 11:** Flujos volumétricos y presiones requeridas en cada punto de captura (Sistema A).

No.	Descripción	Flujo volumétrico (Q), en metros cúbicos por segundo	Presión estática (SP), en KPa
1	Silo nuevo No. 1	2.11	0.25
2	Silo nuevo No. 2	2.11	0.25
3	Botado de supersacos de abrasivo	0.18	0.77
4	Dosificación de lauril sulfato de sodio	0.22	0.54
5	Silo de mezclador 2	1.06	0.24
6	Silo de mezclador 3	0.58	0.25
7	Silo de mezclador 1	0.58	0.28
8	Paila mezclador 1	0.16	0.38
9	Paila mezclador 2	0.16	0.38
10	Paila mezclador 3	0.16	0.38
	<b>Total</b>	<b>7.32</b>	<b>3.73</b>

**Tabla 12:** Diámetro de los conductos en el Sistema A.

No.	Descripción	Diámetro del conducto (cm)
1	Silo nuevo No. 1	38.1
2	Silo nuevo No. 2	38.1
3	Botado de supersacos de abrasivo	11.43
4	Dosificación de lauril sulfato de sodio	11.43
5	Silo de mezclador 2	27.94
6	Silo de mezclador 3	20.32
7	Silo de mezclador 1	20.32
8	Paila mezclador 1	10.16
9	Paila mezclador 2	10.16
10	Paila mezclador 3	10.16
	Conducto principal	38.10 - 71.20

Nota: para ver ubicación en la planta y diámetro del ramo principal, ver figura

**Tabla 13:** Pérdidas debidas al acople del ramal con el conducto principal para el Sistema A.

No.	Descripción	Pérdida debida a acople (KPa)
1	Slo nuevo No. 1	
2	Slo nuevo No. 2	0.05
3	Botado de supersacos	0.14
4	Dosificación de lauril sulfato de sodio	0.10
5	Slo de mezclador 2	0.04
6	Slo de mezclador 3	0.05
7	Slo de mezclador 1	0.05
8	Paila mezclador 1	0.07
9	Paila mezclador 2	0.07
10	Paila mezclador 3	0.07
	<b>Total</b>	<b>0.63</b>

Nota: el acople se da en un ángulo de 30°.

**Tabla 14:** Pérdidas debidas a fricción en conductos, para el Sistema A.

Tramo	Diámetro (cm)	Velocidad en conducto (m/seg)	Coefficiente de pérdida por 0.30 cm	Longitud del tramo (m)	VPd (KPa)	Pérdida (KPa)
0 - a	38.1	18.5	0.0122	2.50	0.206537201	0.02065372
a - b	45.7	25.7	0.0094	1.50	0.395655602	0.01816532
b - c	50.8	21.7	0.0084	12.50	0.283677601	0.0970476
c - d	53.3	20.7	0.008	1.50	0.256305201	0.01007802
d - e	58.4	21.2	0.0072	2.50	0.268747201	0.01567692
e - f	61.0	21.4	0.0068	1.50	0.276212401	0.00920708
f - g	66.0	19.9	0.0062	2.50	0.238886401	0.01219316
g - h	68.6	18.9	0.006	3.51	0.216490801	0.0149304
h - l	68.6	19.4	0.006	2.01	0.225200201	0.00895824
i - final	71.1	18.4	0.0058	12.01	0.204048801	0.0472796
4' - c	11.4	21.2	0.051	7.99	0.271235601	0.360818
<b>Total</b>						<b>0.626</b>

Nota: la pérdida debida a fricción en cada ramal está incluida en el cálculo de SP para ese ramal.

**Tabla 15:** Características del motor del ventilador para el Sistema A.

FTP	6.21 KPa
Flujo volumétrico	7.31 metros cúbicos por segundo
Ahp	37.8 KW (50.69 hp)
Bhp	50.40 KW (67.59 hp)
Shp	52.92 KW (70.97 hp)
Potencia nominal	70.10 KW (94 hp)

**Tabla 16:** Características de la capilla del Sistema B.

No.	Descripción	Tipo de capilla	Dimensiones de la entrada (alto x ancho, en metros)
1	Cuarto de pesaje	Caseta (booth)	0.9 x 1.2

**Tabla 17:** Características del Sistema B.

No.	Descripción	Presión (KPa)	Flujo volumétrico	Diámetro
1	Cuarto de pesaje	1.00 KPa	1.18 metros cúbicos por segundo.	27.94 cm

**Tabla 18:** Características del motor del ventilador para el Sistema B.

FTP	1.00 KPa
Flujo volumétrico	1.18 metros cúbicos por segundo
ahp	1.0 KW (1.33 hp)
bhp	1.2 KW (1.67 hp)
shp	1.3 KW (1.8 hp)
Potencia nominal	1.9 KW (2.5 hp)

**Apéndice H: Comparación de ofertas.**

Empresa	Compañía 1	Compañía 2	Compañía 3
Colector	Wheelevator air pollution control, tipo <i>jet pulse</i> .	VenTuri modelo KNE-2-143/183	100-WSTS-289 IIII
Caudal de aire	7.55 metros cúbicos por segundo	7.73 metros cúbicos por segundo	7.55 metros cúbicos por segundo
Temperatura máxima de manejo del elemento filtrante	366 K	393 K	311 K
Material de las bolsas	Polipropileno punzonado	Poliéster + membrana ptfе alta eficiencia	Polipropileno Trap - 10
Válvula de descarga	Rotoesclusa motorizada (motor 0.745 KW SEW)	Doble compuerta de contrapeso	Meyer Airlock, motor de 0.745 KW
Area filtrante	379 metros cuadrados	376 metros cuadrados	366 metros cuadrados
Material de construcción	Acero ASTM A-36	ASTM A-36	Acero calibre 12
Sistema de limpieza	Válvulas solenoides con temporizadores	Controlador con interruptor de presión diferencial	Temporizador inteligente por medio de presión diferencial
Ventilador centrífugo	Chicago Blower 5500 SW, tamaño 4014	Ven Turi modelo CSRE-4-63/94	New York Blower con damper
Motor del ventilador	48.47 KW, 1800 RPM, 230-460 VAC, 3 Fases y 60 Hz	41.01 KW, 1750 rpm, 440 VAC, 3 Fases y 60 Hz	59.7 KW, 230-460 VAC, 3 Fases y 60 Hz
Presión estática del ventilador	6.47 KPa	4.48 KPa	6.46 KPa
Peso total de los equipos	10600 kg	7235 kg	8720 kg
Tiempo de entrega	9 - 10 semanas	11 semanas	12 semanas
Condiciones de entrega	Ex - Works Cali - Colombia	DAF, Frontera con Guatemala	Ex - Works IT. Illinois, USA
Garantía	12 meses a partir de la fecha de operación. 18 meses a partir de la fecha de entrega.	12 meses a partir de la fecha de operación. 18 meses a partir de la fecha de entrega.	12 meses a partir de la fecha de operación. 18 meses a partir de la fecha de entrega.
Costo colector de polvos	Q266,000.00	Q422,000.00	Q492,600.00
Costo rotoesclusa	Q12,500.00		
Costo ventilador	Q45,000.00	Q52,000.00	
Costo motor del ventilador	Q19,000.00		
Costo transporte	Q23,000.00	Q54,000.00	
<b>Total</b>	<b>Q365,500.00</b>	<b>Q528,000.00</b>	<b>Q492,600.00</b>

**Apéndice I:** Características del sistema A considerando que los puntos de captura 8, 9 y 10 tienen capilla tipo ranura (escenario 2).

**Tabla 19:** Presión estática del sistema y flujo volumétrico necesario (escenario 2).

No.	Descripción	Tipo de capilla	Flujo volumétrico (Q), en metros cúbicos por segundo	Presión estática (SP), en KPa
1	Silo nuevo No. 1	Caseta ( <i>booth</i> )	2.11	0.25
2	Silo nuevo No. 2	Caseta ( <i>booth</i> )	2.11	0.25
3	Botado de supersacos de abrasivos	Ranura ( <i>flanged slot</i> )	0.18	0.77
4	Dosificación de lauril sulfato de sodio	Ranura ( <i>flanged slot</i> )	0.22	0.54
5	Silo de mezclador P.	Caseta ( <i>booth</i> )	1.06	0.24
6	Silo de mezclador D.	Caseta ( <i>booth</i> )	0.58	0.25
7	Silo de mezclador H.	Caseta ( <i>booth</i> )	0.58	0.28
8	Paila mezclador H.	Ranura ( <i>flanged slot</i> )	0.33	1.06
9	Paila mezclador P.	Ranura ( <i>flanged slot</i> )	0.33	1.06
10	Paila mezclador D.	Ranura ( <i>flanged slot</i> )	0.33	1.06
	<b>Total</b>		<b>7.81</b>	<b>5.76</b>

**Tabla 20:** Características del ventilador necesario para el sistema A (escenario 2).

FTP	8.25 KPa
Flujo volumétrico	7.81 metros cúbicos por segundo
ahp	53.6 KW (71.92 hp)
bhp	71.52 KW (95.89 hp)
shp	78.66 KW (105.48 hp)
Potencia nominal	104.61 KW (140.00 hp)

## Apéndice J: Cálculos del sistema de colección de polvos

### 1. Cálculo de flujo volumétrico y presión estática para el Nuevo Silo 1, Sistema A.

Dimensiones de la caseta: 2.4 x 0.8 m (vid. p. 58)

$$Q = V_c A$$

donde,

Q = flujo volumétrico

V<sub>c</sub> = Velocidad de captura

A = Área

$$A = (0.8 \text{ m}) \cdot (2.4) = 1.92 \text{ m}^2$$

$$Q = (1.1 \text{ m/s})(1.92 \text{ m}^2) = 2.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 2. Cálculo del diámetro del conducto, para mantener una velocidad en conducto (V<sub>d</sub>) de 18 m/s (AIHA, 1999).

$$V_d = Q/A = Q/(\pi D^2/4)$$

Entonces,

$$D^2 = (4Q)/(\pi V_d)$$

$$D^2 = (4 \cdot 2.11 \text{ m}^3/\text{s}) / (\pi \cdot 18 \text{ m/s}) = 0.149 \text{ m}^2$$

Entonces,

D = 0.386 m ≈ 38.1 cm (para que coincida con los diámetros disponibles comercialmente).

### 3. Cálculo de las presiones debidas a la velocidad (VP):

$$VP = (V/4005)^2 \quad (\text{en unidades inglesas})$$

donde,

VP = Presión debida a la velocidad, en pulgadas de agua.

V = velocidad, en pies por minuto.

VP en conducto (VP<sub>d</sub>):

Conversión de m/s a pies por minuto (fpm).

$$V = 18 \text{ m/s} (3.281 \text{ ft / m})(1 \text{ min / } 60 \text{ s}) = 3543 \text{ fpm}$$

$$VP_d = (3543 / 4005)^2 = 0.782 \text{ pulgadas de agua}$$

Conversión de pulgadas de agua a KPa:

$$0.782 \text{ pulgadas de agua } (0.249 \text{ KPa} / 1 \text{ pulgada de agua}) = 0.19 \text{ KPa}$$

Cálculo de VP para la capilla (VPh):

$$\text{Velocidad} = 1.1 \text{ m/s} = 216.5 \text{ fpm (utilizando las conversiones mostradas anteriormente)}$$

$$VPh = (216.5 / 4005)^2 = 0.00292 \text{ pulgadas de agua} = 7.27 \times 10^{-4} \text{ KPa}$$

Cálculo de la presión estática total del ramal (SP):

$$SP = h_e + \sum e_a VPd \quad (1)$$

$$h_e = F_s * VPh + F_d * VPd(1)$$

donde,

$h_e$  = pérdida debida a la entrada

$e_a$  = coeficiente de pérdida

$F_s$  = coeficiente de pérdida debida a la capilla (2)

$F_d$  = coeficiente de pérdida debida al conducto (2).

Debido a que los coeficientes utilizados están en sistema inglés es necesario hacer este cálculo en esas unidades y luego convertir a SI.

Entonces,

Se utilizarán dos codos, de tres piezas con R/D = 1.5. La longitud total del ramal es de 9.5 m (31.2 ft).

$$SP = 0.89 * 2.92 \times 10^{-3} \text{ "wg} + 0.25 * 0.782 \text{ "wg} + (2 * 0.34 + (0.0123) * 31.2) * 0.784 \text{ "wg}$$

$$SP = 1.01 \text{ "wg} = 0.25 \text{ KPa (utilizando la conversión mostrada anteriormente).}$$

**Cálculo de pérdida debida al acople del ramal:**

Por utilizar acoples a 30° se tiene que:

$$\text{Pérdida} = 0.18 * SP \text{ (Apéndice D)}$$

$$\text{Pérdida} = 0.18 * 0.25 \text{ KPa} = .0045 \text{ KPa}$$

**Nota:** los cálculos anteriores se repiten para cada punto de uso.

**Cálculo del flujo volumétrico y de la presión total del sistema de ventilación:**

Se suman los totales de los flujos de cada punto de emisión (Tabla 11):

$$Q = 2.11 \text{ m}^3/\text{seg} + 2.11 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.18 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.22 \text{ m}^3/\text{seg} + 1.06 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.579 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.58 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.16 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.16 \text{ m}^3/\text{seg} + 0.16 \text{ m}^3/\text{seg} = 7.31 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Cálculo de la presión estática total del sistema A (SP total):

$$\text{SP total} = \sum(\text{SP}) + \sum(\text{Pérdida por acople}) + \sum(\text{Pérdida por fricción con conducto}) + \text{Pérdida por dispositivo de limpieza} + \text{Pérdida por damper.}$$

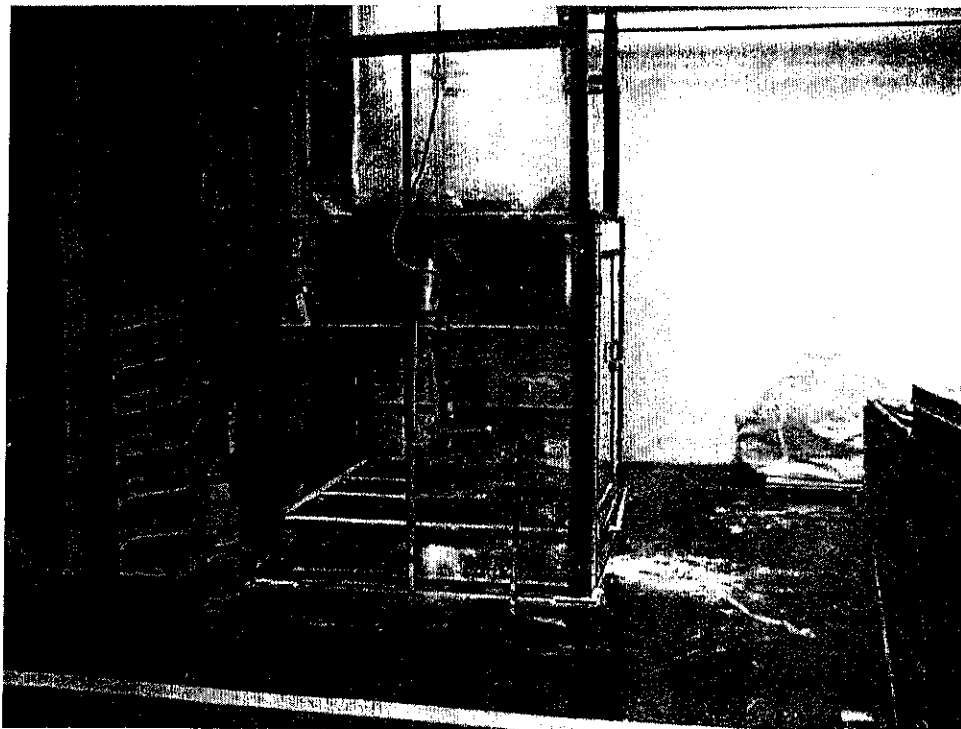
La pérdida por un dispositivo de limpieza debe ser cercana a 0.99 KPa (1).

Entonces,

$$\text{SP total} = 3.72 \text{ KPa} + 0.63 \text{ KPa} + 0.62 \text{ KPa} + 0.99 \text{ KPa} + 0.25 \text{ KPa} = 6.21 \text{ KPa}$$

**Apéndice K: Fotografías del área de fabricación.**

**Figura 9: Fotografía de botado de supersacos de abrasivo.**



**Figura 10: Fotografía de dosificación de lauril sulfato de sodio.**

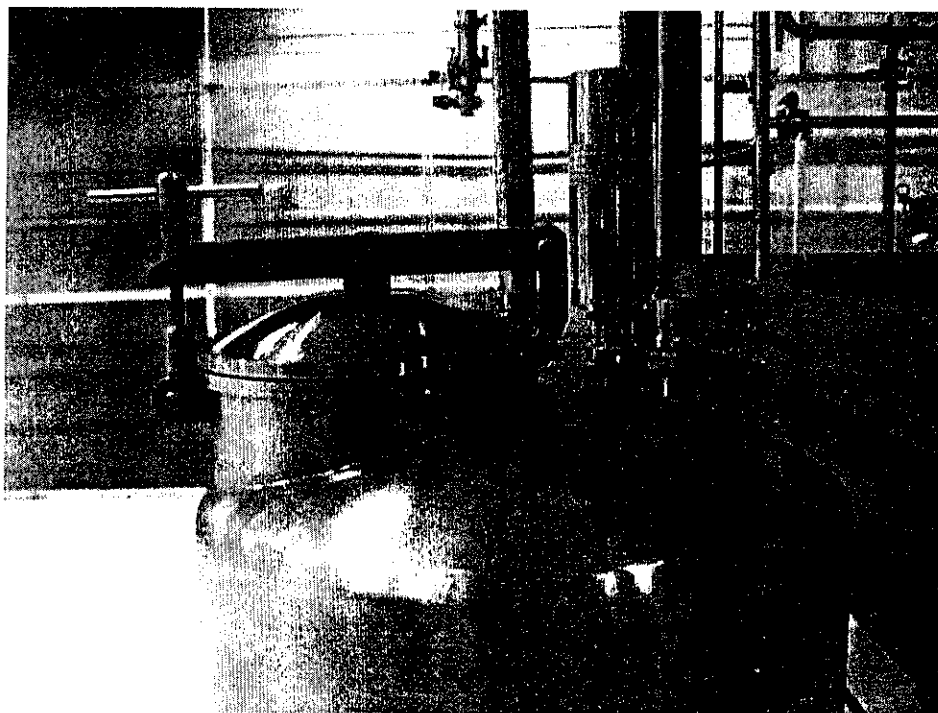
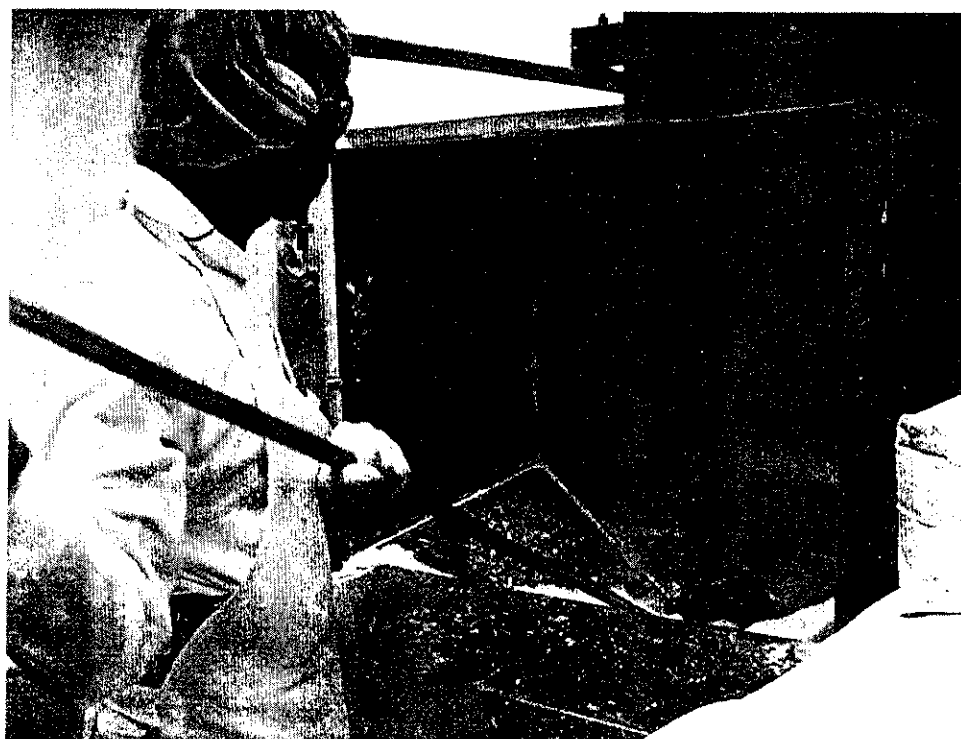


Figura 11: Fotografía de silo de Mezclador 2.



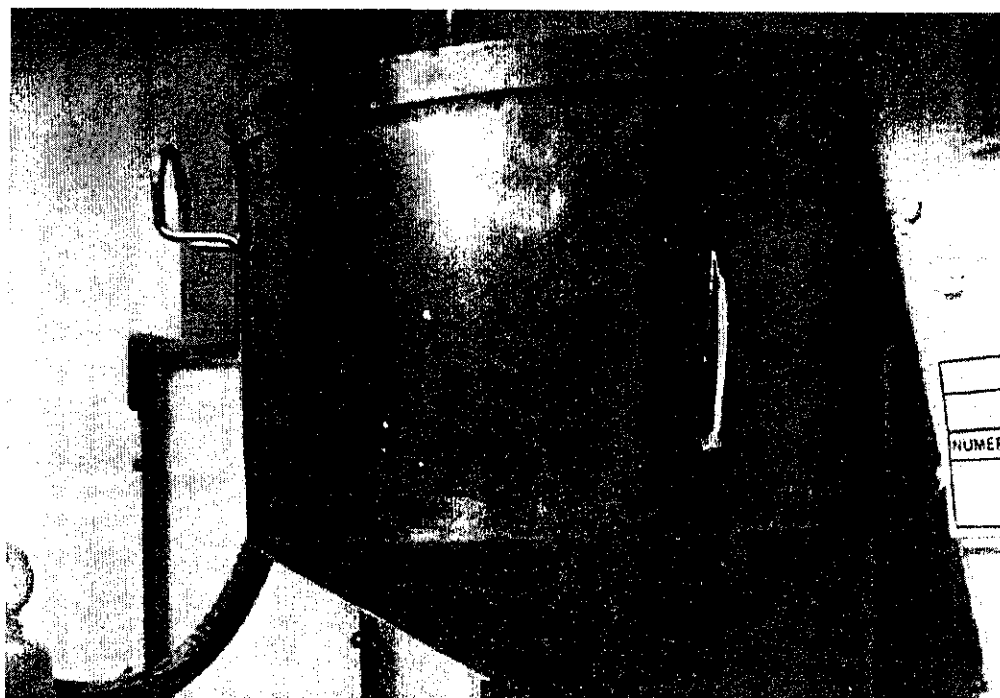
Figura 12: Fotografía de silo de Mezclador 2.



**Figura 13:** Fotografía de tolva de paila de Mezclador 3



**Figua 14:** Fotografía de tolva de paila de Mezclador 2.



**Apéndice L: Símbolos**

ahp	Caballo de fuerza de aire, kW (hp en sistema inglés)
A	Área, m <sup>2</sup> .
A1	Área del conducto o ramal 1, m <sup>2</sup> .
A2	Área del conducto o ramal 2, m <sup>2</sup> .
bhp	Caballo de fuerza de freno, kW (hp)
Ce	Coefficiente de entrada a la capilla, adimensional.
d	Factor de corrección por densidad, adimensional.
D	Diámetro del conducto, cm.
e <sub>q</sub>	Coefficiente de pérdida por accesorios o tubería, adimensional.
FSP	Presión estática del ventilador, kPa.
FTP	Presión total del ventilador, kPa.
h	Eficiencia de un colector de polvo, adimensional.
hd	Caída de presión debida a la entrada del conducto, kPa.
he	Caída de presión debida a la entrada a la capilla, kPa.
hs	Caída de presión debida a la entrada a la ranura o abertura, kPa.
NT	Número de unidades de transferencia.
Q	Flujo volumétrico de aire, m <sup>3</sup> /s.
Q <sub>ideal</sub>	Flujo volumétrico ideal, m <sup>3</sup> /s.
Q <sub>actual</sub>	Flujo volumétrico actual, m <sup>3</sup> /s.
Q <sub>p</sub>	Flujo volumétrico en el punto de succión, m <sup>3</sup> /s.
Q <sub>sh</sub>	Flujo volumétrico a través de una capilla, m <sup>3</sup> /s.
Q1	Flujo volumétrico en el ramal 1, m <sup>3</sup> /s.
Q2	Flujo volumétrico en el ramal 2, m <sup>3</sup> /s.
rhp	Caballo de fuerza nominal, kW (hp)
shp	Caballo de fuerza de freno más la pérdida de impulsión entre el ventilador y el eje del motor, kW.
SP	Presión estática, kPa.
SP(entrada)	Presión estática a la entrada del ventilador, kPa.
SP(salida)	Presión estática a la salida del ventilador, kPa.
SPh	Presión estática de la capilla, kPa.
TP(salida)	Presión total a la salida del ventilador, kPa.
TP(entrada)	Presión total a la entrada del ventilador, kPa.
V	Velocidad, m/s.

Vc	Velocidad de captura, en m/s.
Vd	Velocidad en el ducto, m/s.
Vf	Velocidad en la apertura (face velocity), m/s.
VP	Presión debida a la velocidad, kPa.
VP(entrada)	Presión debida a la velocidad a la entrada del ventilador, kPa.
VP(salida)	Presión debida a la velocidad a la salida del ventilador, kPa.
VPd	Presión debida a la velocidad en el conducto, kPa
VPr	Presión debida a la velocidad resultante de la combinación de los ramales, kPa.
VPs	Presión debida a la velocidad, en la bertura, kPa.
Vx	Velocidad del aire a una distancia X de la capilla, m/s.
X	Distancia de un punto al punto de succión, m.

