

Sección 6

Controles de Materia Particulada

Capítulo 1

Filtros y Casas de Bolsas

James H. Turner
Research Triangle Institute
Research Triangle Park, NC 22709

John D. McKenna
John C. Mycock
Arthur B. Nunn
ETS, Inc.
Roanoke, VA 24018-4394

William M. Vatavuk
Grupo de Economía y de Estrategias Innovadoras
Innovative Strategies and Economics Group, OAQPS
Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
U.S. Environmental Protection Agency
Research Triangle Park, NC 22711

Diciembre de 1998 (versión del original en inglés)

Contenido

1.1	Introducción	1-4
1.2	Descripción del Proceso	1-5
1.2.1	Limpieza por Agitación	1-5
1.2.2	Limpieza con Aire a la Inversa	1-6
1.2.3	Limpieza por Chorro Pulsante	1-7
1.2.3.1	Filtros Enjaulados	1-7
1.2.3.2	Filtros Cartucho	1-8
1.2.4	Limpieza Sónica	1-11
1.2.5	Equipo Auxiliar	1-12
1.2.6	Teoría de la Filtración por Tela	1-12
1.2.6.1	Casas de Bolsas Desinfladas con Aire a la Inversa/Agitación	1-14
1.2.6.2	Casas de Bolsas de Chorro Pulsante	1-17
1.3	Procedimientos de Diseño	1-19
1.3.1	Relación Gas-a-Tela	1-20
1.3.1.1	Relación Gas-a-Tela de Aplicaciones Similares	1-20
1.3.1.2	Relaciones de Gas-a-Tela de los Métodos del Fabricante	1-20
1.3.1.3	Relación Gas-a-Tela de Ecuaciones Teóricas/Empíricas	1-23
1.3.2	Caída de Presión	1-26
1.3.3	Características de las Partículas	1-29
1.3.4	Características de la Corriente de Gas	1-29
1.3.4.1	Temperatura	1-29
1.3.4.2	Presión	1-31
1.3.5	Consideraciones de Diseño de Equipo	1-31
1.3.5.1	Cajas a Presión o al Vacío	1-31
1.3.5.2	Construcción Estándar o por Pedido	1-32
1.3.5.3	Medio de Filtración	1-33
1.4	Estimando la Inversión de Capital Total	1-34
1.4.1	Costo del Equipo	1-34
1.4.1.1	Costo Mínimo de las Casas de Bolsas	1-34
1.4.1.2	Costos de las Bolsas	1-36
1.4.1.3	Equipo Auxiliar	1-38
1.4.2	Costo Adquirido Total	1-38
1.4.3	Inversión de Capital Total	1-38
1.5	Estimando los Costos Anuales Totales	1-45
1.5.1	Costo Directo Anual	1-45

1.5.1.1	Mano de Obra de Operación y de Supervisión	1-45
1.5.1.2	Materiales de Operación	1-45
1.5.1.3	Mantenimiento	1-45
1.5.1.4	Partes de Reemplazo	1-46
1.5.1.5	Electricidad	1-47
1.5.1.6	Combustible	1-47
1.5.1.7	Agua	1-47
1.5.1.8	Aire Comprimido	1-48
1.5.1.9	Desecho del Polvo	1-48
1.5.2	Costo Indirecto Anual	1-48
1.5.3	Créditos por Recuperación	1-49
1.5.4	Costo Total Anual	1-49
1.6	Problema de Ejemplo	1-50
1.7	Reconocimientos	1-56
	Referencias	1-57

1.1 Introducción

Una unidad de filtro de tela consiste de uno o más compartimientos aislados conteniendo hileras de bolsas de tela, en la forma de tubos redondos, planos o formados, o de cartuchos plizados. El gas cargado de partículas pasa generalmente a lo largo del área de las bolsas y luego radialmente a través de la tela. Las partículas son retenidas en la cara de las bolsas corriente arriba y el gas limpio es ventilado hacia la atmósfera. El filtro es operado cíclicamente, alternando entre períodos de filtrado relativamente largos y períodos cortos de limpieza. Durante la limpieza, el polvo que se ha acumulado sobre las bolsas es removido del área de la tela y depositado en una tolva para su disposición posterior.

Los filtros de tela recolectan partículas de tamaños que van desde las submicras hasta varios cientos de micras de diámetro, con eficiencias generalmente en exceso al 99 o 99.9 por ciento. La capa de polvo o plasta recolectada sobre la tela es la razón principal de esta alta eficiencia. La plasta es una barrera con poros tortuosos que atrapan a las partículas a medida que viajan por la plasta. En algunas configuraciones pueden acomodarse rutinariamente temperaturas de gas hasta cerca de 500 F, con picos hasta cerca de 550 F. La mayor parte de la energía utilizada para operar el sistema aparece como caída de presión a través de las bolsas, y de las partes y conductos asociados. Los valores típicos de la caída de presión del sistema varía desde cerca de 5 hasta 20 pulgadas de agua. Los filtros de tela se utilizan donde se requiere una alta eficiencia de recolección de partículas. Se imponen limitaciones por las características del gas (la temperatura y la corrosividad) y por las características de las partículas (principalmente la adhesividad), que afectan a la tela o a su operación y que no pueden ser tomadas en cuenta económicamente.

Las variables importantes del proceso incluyen las características de la partícula, las características del gas y las propiedades de la tela. El parámetro de diseño más importante es la relación aire- o gas-a-tela (la cantidad de gas en pies cúbicos por minuto que penetra un pie cuadrado de tela), y el parámetro de operación de interés por lo general es la caída de presión a través del sistema de filtro. La característica de operación principal de los filtros de tela que los distingue de otros filtros de gas es la capacidad de renovar la superficie de filtración periódicamente por medio de limpiezas. Los filtros de horno comunes, los high efficiency particulate air filters - HEPA (filtros de aire de alta eficiencia para particulados), los high efficiency air filters - HEAF (filtros de aire de alta eficiencia), y los filtros de aire por inducción automotrices son ejemplos de filtros que deben ser desechados después de que se acumule una capa significativa de polvo sobre la superficie. Estos filtros se construyen típicamente de fibras entretejidas, se montan sobre marcos sostenedores y son utilizados donde existen concentraciones de polvo relativamente bajas. Los filtros de tela por lo general se construyen con felpas tejidas o, más comúnmente, perforadas con aguja y cosidas en la forma deseada, montadas en un pleno con herramientas especiales, y usados a través de un amplio rango de concentraciones de polvo.

Otro tipo de filtro de tela desarrollado en los años 1970 y 1980 es el filtro mejorado y enriquecido electrostáticamente. Las casas de bolsas piloto que emplean esta tecnología han mostrado caídas de presión menores que los diseños de filtro convencionales. Además, algunos análisis de costo han mostrado que las casa de bolsas mejoradas electrostáticamente pudieran tener costos más bajos de por vida que las

casa de bolsas convencionales. Sin embargo, el propósito de este capítulo es de enfocarse sólo sobre los filtros disponibles comercialmente. Los lectores interesados en la filtración mejorada electrostáticamente pueden consultar referencias tales como Van Osdell et al. , Viner et al. , o Donovan .

En esta sección, los tipos de filtros de tela y el equipo auxiliar requerido se discuten primero desde un punto de vista general. Entonces, la teoría de filtración por tela tal como se aplica a cada tipo de filtro se discute, para crear los cimientos para los procedimientos de diseño, resumidos en la sección 1.2.

1.2 Descripción del Proceso

Los filtros de tela pueden ser categorizados por varios medios, incluyendo el tipo de limpieza (por agitación, aire a la inversa, propulsión a chorro), la dirección del flujo de gas (desde el interior de la bolsa hacia el exterior o viceversa), la localización del ventilador del sistema (de succión o de presión), o tamaño (cantidad baja, mediana o alta de flujo de gas). De estos cuatro enfoques, el método de limpieza es probablemente la característica más distintiva. Los filtros de tela se discuten en esta sección basándose en el tipo de limpieza que es empleado.

1.2.1 Limpieza por Agitación

Para cualquier tipo de limpieza, debe impartirse a la tela la energía suficiente para superar las fuerzas de adhesión sosteniendo el polvo a la bolsa. En la limpieza por agitación, usada con flujo de gas del interior al exterior, la transferencia de energía se logra suspendiendo la bolsa de un gancho o una estructura que oscilan accionados por un motor. El movimiento puede ser impartido a la bolsa en varias maneras, pero el efecto general es de crear una onda sinusoidal a lo largo de la tela. A medida que la tela se mueve hacia fuera de la línea central de la bolsa durante porciones de la acción de onda, el polvo acumulado sobre la superficie se mueve con la tela. Cuando la tela alcanza el límite de su extensión, los parches de polvo poseen la inercia suficiente para desprenderse de la tela y descender hacia la tolva.

Para casas de bolsas pequeñas y de un sólo compartimiento, generalmente operadas de manera intermitente, una palanca conectada al mecanismo de agitación puede ser operada manualmente a intervalos apropiados, típicamente al final de una jornada de trabajo. En casas de bolsas con compartimientos múltiples, generalmente operadas continuamente, un cronómetro o un sensor de presión que responde a la caída de presión del sistema inicia la agitación de la bolsa automáticamente. Los compartimientos operan en secuencia de manera que se limpie un compartimiento a la vez. El flujo de gas hacia adelante al compartimiento es interrumpido, se permite el asentamiento del polvo, el flujo de gas residual cesa, y el mecanismo de agitación es encendido por varios segundos hasta un minuto o más. Los períodos de asentamiento y agitación pueden ser repetidos, y enseguida el compartimiento es restablecido en línea para la filtración. Como resultado de la ausencia de flujo hacia adelante a través del compartimiento, la superficie recolectora de la casa de bolsas debe ser incrementada para compensar que esa porción se encuentre fuera de servicio en un algún tiempo para su limpieza. La figura 1.1 ilustra una casa de bolsas limpiada por agitación.

Los parámetros que afectan a la limpieza son la frecuencia del movimiento de agitación y la tensión de la bolsa montada. Los primeros dos parámetros son parte del diseño de la casa de bolsas y por lo general no se cambian fácilmente. Los valores típicos son de alrededor de 4 Hz para la frecuencia y de 2 a 3 pulgadas para la amplitud (medio ciclo). Algunas instalaciones permiten ajustes fáciles de la tensión de las bolsas, mientras que otras requieren que la bolsa sea desconectada y reconectada de nuevo a su conector.

En comparación con las bolsas limpiadas por aire a la inversa (discutidas a continuación) la acción vigorosa de los sistemas de agitación tiende a presionar más a las bolsas, lo que requiere telas más pesadas y durables. En los Estados Unidos, las telas tejidas son usadas casi exclusivamente para la limpieza por agitación. La práctica europea permite el uso de telas afelpadas a velocidades de filtración un poco más altas. Estas velocidades más altas permiten la construcción de una casa de bolsas más pequeña, lo que requiere menos capital. Sin embargo, las velocidades más altas conducen a caídas de presión más altas, aumentando los costos de operación. Para cualquier aplicación determinada, existe un balance económico que con frecuencia debe ser descubierto estimando los costos para ambos tipos de tela. Se han efectuado investigaciones significantes con las casas de bolsas con agitación y las telas tejidas utilizadas en ellas, y muchas casas de bolsas por agitación continúan en servicio. Sin embargo, la mayoría de las casas de bolsas recién construidas son limpiadas con propulsión a chorro. Cuando se requieren casas de bolsas mayores que los chorros a pulso típicos, con frecuencia son unidades con aire a la inversa construidas a pedido. Las casa de bolsas de chorro pulsante se han vuelto populares porque ocupan menos espacio que la casa de bolsas con agitación equivalente y son percibidas como menos caras. Para aplicaciones a temperaturas altas usando bolsas de fibra de vidrio, puede ser esperada una vida más larga de las bolsas que la que sería encontrada con las casas de bolsas con agitación.

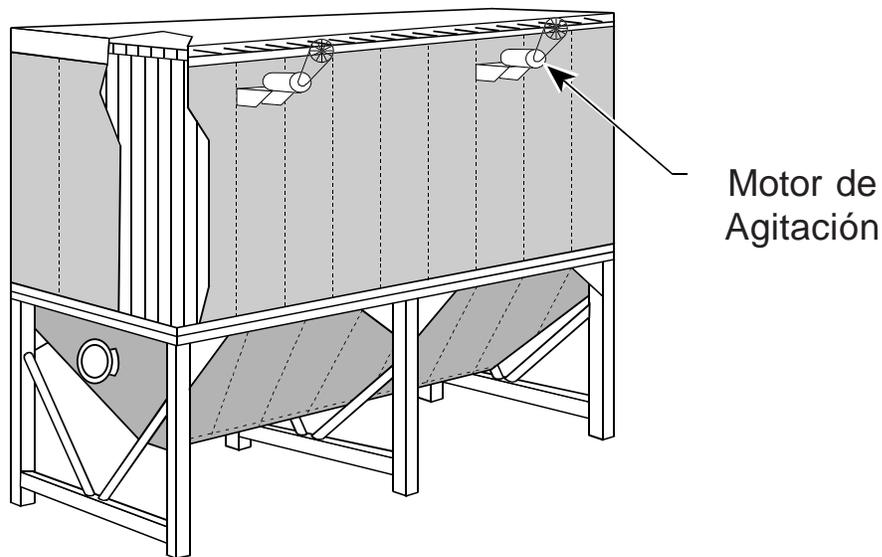


Figura 1.1: Casa de Bolsas Con Agitación Típica
(Cortesía de la Universidad del Estado de Carolina del Norte, EE.UU.)

1.2.2 Limpieza con Aire a la Inversa

Cuando las telas de fibra de vidrio fueron introducidas, se necesitó un medio más suave para limpiar las bolsas, que pueden ser de un pie de diámetro y 30 pies de longitud, para prevenir la degradación prematura. La limpieza por aire a la inversa fue desarrollada como una manera menos intensiva de impartir energía a las bolsas. En la limpieza por medio de aire a la inversa, el flujo de gas hacia las bolsas es interrumpido en el compartimiento que está siendo limpiado y un flujo a la inversa (de afuera hacia adentro) es dirigido a través de las bolsas. Este revés del flujo de gas pliega la bolsa suavemente hacia sus líneas centrales, lo que causa que la plasta se desprenda del área de tela. El desprendimiento es causado por fuerzas tipo tijera desarrolladas entre el polvo y la tela a medida que ésta última cambia su forma. Las tapas metálicas para sostener la parte superior de las bolsas son una parte integral de la bolsa tanto como lo son varios anillos cosidos que rodean las bolsas para prevenir su colapso completo durante la limpieza. Sin estos anillos, el polvo que cae y se acumula tiende a obstruir la bolsa a medida que la tela se pliega sobre sí misma mientras es limpiada. Tal como con las casas de bolsas con agitación con compartimientos múltiples, en las casas de bolsas con aire a la inversa ocurre un ciclo similar que consiste de interrumpir el flujo de gas y permitir que el polvo se asiente antes de que empiece la acción limpiadora. Además, tal como con las casas de bolsas con agitación, se debe añadir una capacidad adicional de filtración a las casas de bolsas con aire a la inversa para compensar por la porción que se encuentre fuera de servicio por limpieza en cualquier tiempo. Algunas casas de bolsas con aire a la inversa emplean un sistema suplementario con agitación para ayudar a la limpieza aumentando la cantidad de energía suministrada a la bolsa.

La fuente de aire a la inversa es por lo general un ventilador del sistema por separado que es capaz de suministrar aire limpio y seco para uno o dos compartimientos a una relación gas-a-tela tan alta o más alta que la del flujo de gas hacia adelante. La figura 1.2 ilustra una casa de bolsas limpiada con aire a la inversa.

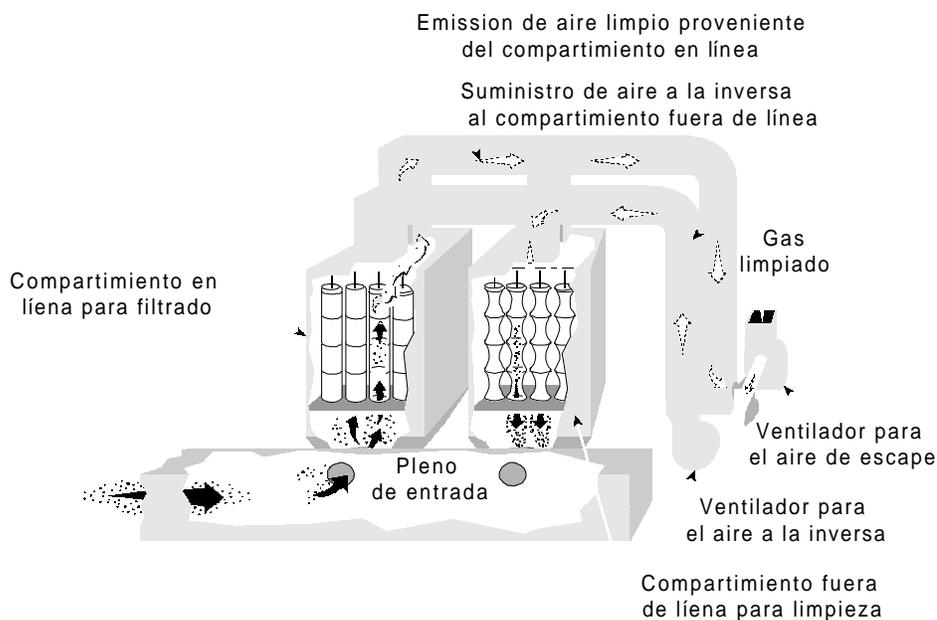


Figura 1.2: Casa de Bolsas con Aire a la Inversa Típica
(Cortesía de la Universidad del Estado de Carolina del Norte, EE.UU.)

1.2.3 Limpieza por Chorro Pulsante

Las ventajas de la limpieza por chorro pulsante comparada con las casas de bolsas con agitación o con aire a la inversa es la reducción en el tamaño de la casa de bolsas (y el costo de capital) permitida al usar menos tela debido a las relaciones más altas de gas-a-tela y, en algunos casos, por no tener que construir un compartimiento adicional para la limpieza fuera de línea. Sin embargo, las relaciones más altas de gas-a-tela causan caídas de presión más altas que aumentan los costos de operación. Esta forma de limpieza usa aire comprimido para forzar que un golpe de aire descienda a través de la bolsa y la expanda violentamente. Tal como con las casas de bolsas con agitación, la tela alcanza su límite de extensión y el polvo se separa de la bolsa. El aire escapando a través de la bolsa lleva el polvo separado del área de la bolsa. Sin embargo, en los chorros a pulso los flujos de gas de filtración se oponen en dirección, en comparación a las casas de bolsas con agitación o con aire a la inversa (o sea, de afuera hacia adentro). La figura 1.3 ilustra una bolsa limpiada con agitación por propulsión a pulso.

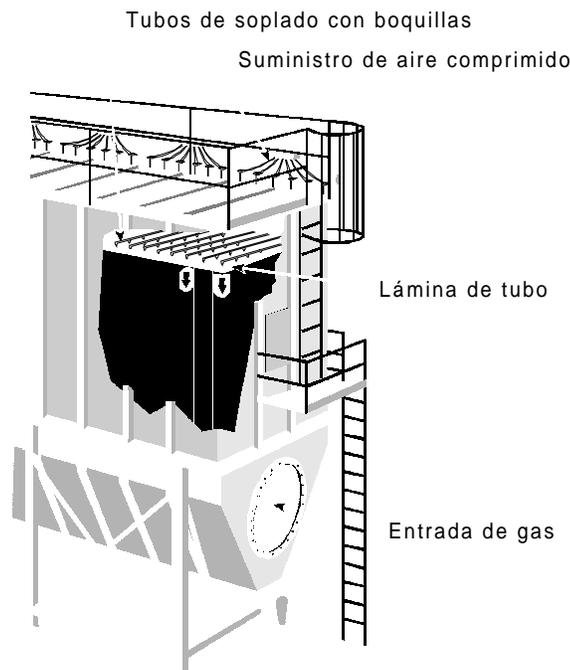


Figura 1.3: Casa de Bolsas con Chorro a Pulso
(Cortescía de la Universidad del Estado de Carolina del Norte, EE.UU.)

1.2.3.1 Filtros Enjaulados

En las casas de bolsas de chorro pulsante convencionales, las bolsas son montadas sobre jaulas de alambre para prevenir su colapso mientras el gas polvoriento fluye desde el exterior de la bolsa al interior durante la filtración. En vez de unir ambos extremos de la bolsa a la estructura de la casa de bolsas, el ensamble de bolsa y jaula es por lo general fijada sólo en la parte superior. La parte inferior del ensamble

tiende a moverse en el flujo de gas turbulento durante la filtración y puede frotar otras bolsas, lo cual acelera el desgaste.

Con frecuencia, las casas de bolsas de chorro pulsante no se encuentran divididas en compartimientos. Las bolsas son limpiadas de fila en fila cuando un cronómetro inicia el golpe de aire de limpieza a través de una válvula de apertura rápida. Un tubo a través de cada fila de bolsas acarrea el aire comprimido. El tubo tiene una boquilla sobre cada bolsa de manera que el gas de limpieza sale directamente hacia el interior de la bolsa. Algunos sistemas dirigen el aire a través de un venturi corto que tiene la intención de encauzar aire adicional de limpieza. El pulso se opone e interrumpe el flujo de aire hacia adelante durante únicamente unos pocos décimos de segundo. Sin embargo, la continuación rápida del flujo hacia adelante deposita de nuevo la mayoría del polvo sobre la bolsa limpia o sobre bolsas adyacentes. Esta acción tiene la desventaja de inhibir la caída del polvo sobre la tolva, pero tiene la ventaja de reformar rápidamente la plasta de polvo que proporciona la recolección eficiente de las partículas.

Para aumentar la superficie de filtración en el mismo volumen de casa de bolsas, se han desarrollado configuraciones de bolsa y caja en forma de estrella y plizadas (en sección transversal). La combinación de bolsa y caja está diseñada como una unidad para ser instalada de manera similar a una unidad estándar de bolsa y jaula. Tales unidades pueden ser usadas como reemplazo para bolsas y jaulas estándares cuando se necesita superficie adicional de tela, o pueden ser usadas en diseños originales. La limpieza normal por pulso es usada, o sea, no se requieren cambios especiales en el equipo de limpieza. Los costos para las bolsas y jaulas con forma de estrella son de alrededor de tres a tres y media veces el costo de las bolsas y jaulas normales.

1.2.3.2 Filtros Cartucho

Los aumentos posteriores en superficie de filtro por unidad de volumen de casa de bolsas se obtienen usando medios de filtración finamente plizados y sostenidos por medio de una estructura de alambre. Este cartucho puede ser montado verticalmente como un reemplazo casi directo para las bolsas y jaulas estándares en las casas de bolsas existentes, o montado horizontalmente en diseños originales. Cuando es usado como un reemplazo directo para bolsas y jaulas estándares, los costos de retrofit (equipar con nuevas partes o equipo no disponible a tiempo de manufactura) para un caso son el 70 por ciento del costo de la construcción de una casa de bolsas nueva. La limpieza de los diseños antiguos de filtros cartucho es por medio de equipo por pulsación típico usando un tubo de soplado a través de una fila de cartuchos. Los diseños más recientes usan válvulas de aire individuales para cada par de cartuchos.

Un tipo de cartucho contiene un núcleo interior de soportes rodeado por el medio de filtración plizado y la malla exterior de soporte. Un extremo del cartucho está abierto, lo cual permite que el gas pasando a través del filtro desde el exterior salga hacia un pleno de aire limpio. El aire para la limpieza es pulsado a través del mismo extremo abierto, pero en una dirección inversa a la del gas que está siendo limpiado. El otro extremo del cartucho está cerrado por una tapa extrema. El proceso de manufactura requiere uniones fuertes y rígidas donde las tapas extremas se unen al medio de filtración y los núcleos. Se utilizan plásticos de epoxido o poliuretano para sellar al medio contra las tapas

extremas. El cartucho es mantenido firmemente en su lugar contra una placa de montaje que rodea el agujero que lo conecta al pleno de aire limpio. Los cartuchos horizontales se montan típicamente en batería con empaques sellados entre sí. Si no se montan correctamente o si el material del empaque no es de alta calidad, aparecerán fugas después de varios pulsos repetidos de limpieza.

El medio de filtración para los cartuchos puede ser papel, plásticos de monofilamento unidos por hilado (predomina el poliéster), o telas no tejidas. Los cartuchos pueden ser de 6 a 14 pulgadas de diámetro y 16 a 36 pulgadas de longitud. La superficie de filtración es alrededor de 25 a 50 pies cuadrados para cartuchos con telas no tejidas, alrededor de tres a cuatro veces más con los unidos por hilado, y más. Un tipo de cartucho contiene un núcleo interior de soportes rodeado por el medio de filtración plizado y la malla exterior de soporte. Un extremo del cartucho está abierto, lo cual permite que el gas pasando a través del filtro desde el exterior salga hacia un pleno de aire limpio. El aire para la limpieza es pulsado a través del mismo extremo abierto, pero en una dirección inversa a la del gas que está siendo limpiado. El otro extremo del cartucho está cerrado por una tapa extrema. El proceso de manufactura requiere uniones fuertes y rígidas donde las tapas extremas se unen al medio de filtración y los núcleos. Se utilizan plásticos de epoxido o poliuretano para sellar al medio contra las tapas extremas. El cartucho es mantenido firmemente en su lugar contra una placa de montaje que rodea el agujero que lo conecta al pleno de aire de seis veces con el papel. Un cartucho típico puede tener 36 pies cuadrados de tela no tejida, 153 pies cuadrados de tela unida por hilado, o 225 pies cuadrados de papel. El espacio entre los pliegues es importante por dos razones: un distanciamiento menor aumenta la superficie de filtrado para un volumen de cartucho específico, pero el menor distanciamiento aumenta la probabilidad de que el polvo forme un puente permanente entre los fondos de los pliegues plizados y reduzca la superficie de filtrado disponible. Para los polvos no aglomerantes de tamaños pequeños de partículas (hasta de unas pocas micras) y características benignas para el papel, el cartucho puede tener de 12 a 16 pliegues por pulgada. Las telas no tejidas bajo las condiciones más difíciles pueden tener de 4 a 8 pliegues por pulgada. La profundidad del pliegue es de 1 a 3 pulgadas, El arreglo de los pliegues y el volumen de aire para limpieza disponible determinan la capacidad de limpieza del medio para un polvo en específico. Una ventaja de los medios de papel es su capacidad de recolectar partículas menores de 2.5 μm de diámetro con alta eficiencia. La eficiencia en total puede ser del 99.999+ por ciento. Los medios no tejidos pueden ser menos eficientes por una orden de magnitud. Sin embargo, aún las bolsas de fibra de vidrio en las casas de bolsas con aire a la inversa en fuentes de combustión pueden recolectar partículas de 2.5 μm con una eficiencia del 99.9 por ciento.

Los filtros cartucho están limitados en temperatura por los adhesivos que sellan los medios a las tapas de fondo a las tapas extremas. Las temperaturas de operación de 200 F son comunes, con una capacidad de temperatura hasta 350 F pronta a ser comercializada. La figura 1.4 ilustra un recolector de cartucho.

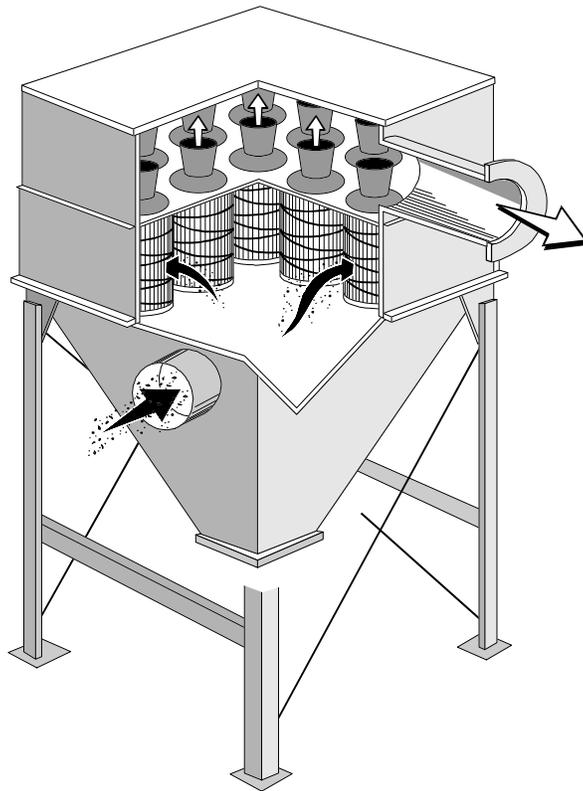


Figura 1.4: Casa de Bolsas con Cartuchos Montados Verticalmente Típica
(Cortesía de la Universidad del Estado de Carolina del Norte, EE.UU.)

1.2.4 Limpieza Sónica

Debido a que la limpieza con aire al inverso es un método de baja energía comparado con la limpieza con agitación o propulsión a pulso, se pudiera requerir energía adicional para obtener una remoción adecuada del polvo. La agitación, tal como se describe con anterioridad, es una de tales maneras de añadir energía, pero otra manera es añadir energía vibracional en el extremo inferior del espectro acústico. Las bocinas sónicas accionadas por aire comprimido son una forma típica de aplicar esta energía. Las bocinas (de 1 a varias por compartimento para casas de bolsas grandes) operan típicamente en el rango de 125 a 550 Hz (con mayor frecuencia en el rango de 125 a 160 Hz) y producen presiones de sonido de 120 a 140 decibeles. Cuando se aplica correctamente, la energía sónica puede reducir la masa de polvo sobre las bolsas de manera considerable, pero también puede conducir a un aumento en la penetración de polvo a través de la tela. La penetración aumentada reduce la eficiencia de la casa de bolsas. Las bocinas sónicas son efectivas como equipo suplementario para algunas aplicaciones que requieren energía adicional para una limpieza adecuada. En ocasiones las bocinas sónicas son usadas como la única fuente de energía para la limpieza.

La construcción de las bocinas incluye una salida con forma de bocina unida a una cámara de entrada que contiene un diafragma. Aire comprimido de 45 a 75 psig (libras estándar por pulgada cuadrada) entra a la cámara, vibra el diafragma, y escapa por la bocina. Ondas sonoras saliendo de la bocina hacen contacto y vibran la tela conteniendo polvo con energía suficiente para aflojar o desprender parches de polvo que caen a través de la bolsa hacia la tolva debajo. El consumo de aire comprimido varía de 45 a 75 scfm (pies cúbicos estándares por minuto) dependiendo del tamaño de la bocina. Las bocinas pueden ser montadas a la pestaña a través de las paredes de la casa de bolsas con la pestaña ya en el extremo de salida de la bocina o en la cámara de entrada. Las bocinas también pueden ser suspendidas dentro de la estructura de las casas de bolsas.

Un ejemplo del uso de una bocina sónica es una casa de bolsas con aire a la inversa de 10-compartimientos limpiando gases de combustión a 835 000 acfm (pies cúbicos actuales por minuto). Las bolsas que están siendo limpiadas son de 12 in. (pulgadas) de diámetro y 35 ft. (pies) de longitud. Cada compartimiento tiene una bocina montada en cada una de las cuatro esquinas e inclinada hacia el centro del compartimiento. Los compartimientos son limpiados cada 30 minutos con aire a la inversa durante 1 minuto y bocinas sónicas durante 30 segundos durante la limpieza con aire a la inversa. Las bocinas operan a 75 psig y consumen 65 scfm de aire comprimido. Para casas de bolsas que requieren una limpieza menos intensiva, el ciclo de limpieza podría extenderse hasta 1 hora o más.

Para una casa de bolsas de seis compartimientos que requiere una bocina por cada compartimiento, la inversión de sistema para las bocinas fue de \$13 500 (el Grupo BHA). Las bocinas instaladas operaron a 125 Hertz y usaron 75 scfm de aire comprimido a 75 psig. En este caso, cada bocina limpió 8 500 pies cuadrados de tela. Una bocina del mismo tamaño puede limpiar hasta 15 000 ft² (pies cuadrados) de tela.

1.2.5 Equipo Auxiliar

El equipo auxiliar típico asociado con los sistemas con filtro de tela se muestra en la figura 1.5. Junto con el filtro de tela en sí, un sistema de control típicamente incluye el equipo auxiliar siguiente: un dispositivo de captura (o sea, una campana de ventilación o una conexión de escape directa); tubería; equipo para la remoción de polvo (transportador de tornillo, etc.); ventiladores, motores, y encendedores; y una chimenea. Además, se pueden necesitar cámaras de aspersión, recolectores mecánicos, y puertos de aire de dilución para pre-acondicionar el gas antes de que llegue al filtro de tela. Los dispositivos de captura son por lo general campanas de ventilación o acoplamientos de escape directos unidos a un recipiente de proceso. Los acoplamientos de escape directos son menos comunes, requiriendo que se aspire aire a través del recipiente de proceso, y pudiera no ser factible en algunos procesos. La tubería (incluyendo los amortiguadores) se usa para contener, y regular el flujo de, la corriente de escape a medida que se mueve desde la fuente de emisiones hasta el dispositivo de control y la chimenea. Las cámaras de aspersión y los puertos de aire de dilución disminuyen la temperatura de la corriente de contaminante para proteger al

¹ Un procedimiento para estimar la caída de presión de los conductos se presenta en el capítulo 10 (“Campanas de Ventilación, Tubería, y Chimeneas”) de este Manual.

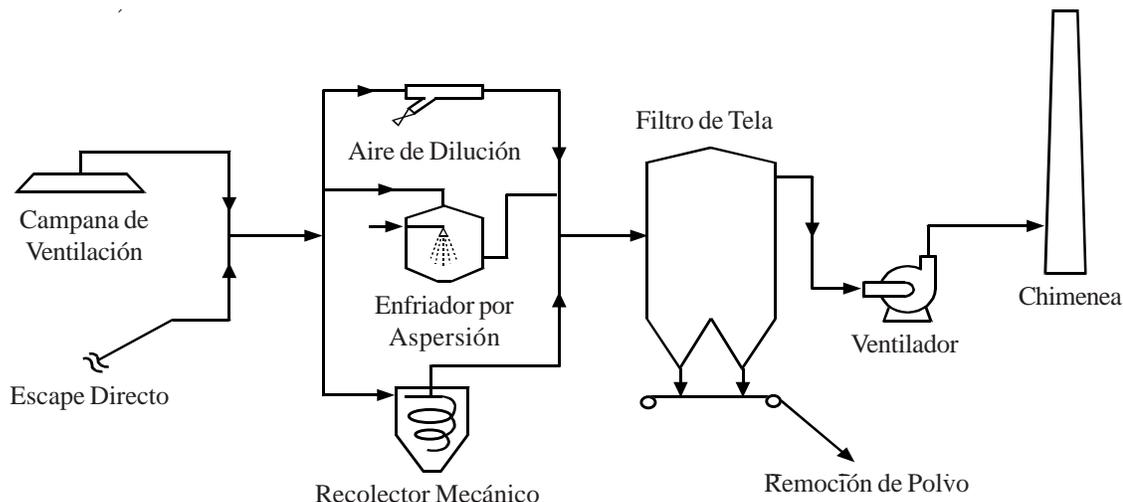


Figura 1.5: Piezas Típicas de equipo auxiliar alternativo usadas con sistemas de control con filtros de tela.

filtro de tela de las temperaturas excesivas. Cuando una porción sustancial del cargamento de contaminante consiste de partículas relativamente grandes (más de alrededor de $20\ \mu\text{m}$), se usan recolectores mecánicos tales como los ciclones para reducir la carga sobre el filtro de tela. Los ventiladores proporcionan potencia motora para el movimiento del aire y pueden ser montados antes (casa de bolsas a presión) o después (casa de bolsas con succión) del filtro. Las chimeneas cuando son usadas, ventilan la corriente limpiada hacia la atmósfera. Los transportadores de tornillo se usan con frecuencia para remover el polvo capturado del fondo de las tolvas por debajo del filtro de tela y (si se usa) el recolector mecánico. Los sistemas (neumáticos) de transportación de aire y la descarga directamente dentro de recipientes también se usan como medios alternativos para la remoción del polvo de las tolvas.

1.2.6 Teoría de la Filtración por Tela

La clave para diseñar una casa de bolsas es determinar la velocidad superficial que produce el equilibrio óptimo entre la caída de presión (el costo de operación que aumenta a medida que la caída de presión aumenta) y el tamaño de la casa de bolsas (el costo de capital que disminuye a medida que el tamaño de la casa de bolsas se reduce). El tamaño de la casa de bolsas se reduce a medida que la velocidad superficial (o relación de gas-a-tela) aumenta. Sin embargo, las relaciones gas-a-tela más altas causan mayores caídas de presión. Los factores principales que afectan la relación gas-a-tela, discutidos en la sección 2.2, incluyen a las características de las partículas y de las telas, y a la temperatura del gas.

Aun cuando la eficiencia de recolección es otra medida importante del rendimiento de las s de bolsas, una casa de bolsa diseñada apropiadamente y bien operada por lo general tendrá una eficiencia de recolección de materia particulada (MP) extremadamente alta (o sea, de 99.9+ por ciento). Las casas de bolsas son particularmente efectivas para recolectar partículas pequeñas. Por ejemplo, las pruebas en casas de bolsas en dos calderas de servicios públicos , demostraron eficiencias del 99.8 por ciento para partículas de 10 μm de diámetro y in 99.6 por ciento para partículas de 2.5 μm de diámetro. Debido a que se supone una alta eficiencia, el proceso de diseño se enfoca sobre la caída de presión.

La caída de presión ocurre desde el flujo a través de los conductos de entrada y salida, desde el flujo a través de las regiones de la tolva, y desde el flujo a través de las bolsas. La caída de presión a través del compartimiento de la casa de bolsas (excluyendo la caída de presión a través de las bolsas) depende de gran manera del diseño de la casa de bolsas y varía entre 1 a 2 pulgadas de H₂O[3] en diseños convencionales y hasta alrededor de 3 pulgadas de H₂O en diseños que tienen trayectorias complicadas de flujo de gas. Esta pérdida puede ser mantenida a un mínimo (o sea, a 1 pulgada de H₂O o menos) invirtiendo en un estudio del modelo de flujo del diseño propuesto y modificando el diseño de acuerdo con los resultados del estudio. Un estudio de este tipo costaría alrededor de \$70 000 (en 1998).

La caída de presión a través de las bolsas (también llamada caída de presión de la lámina de tubo) puede ser tan alta como de 10 pulgadas de H₂O o más. La caída de presión de la lámina de tubo es una función compleja de las propiedades físicas del polvo y de la tela y d la manera en que la casa de bolsas es diseñada y operada. Las pérdidas en el conducto y en la tolva para una configuración específica son constantes y pueden ser minimizadas efectivamente cambiando la configuración a través de un diseño apropiado basado en el conocimiento del flujo a través de la casa de bolsas.¹

La filtración por tela es un proceso de lote que ha sido adaptado para una operación continua. Un requisito para una casa de bolsas operando de forma continua es que el polvo recolectado sobre las bolsas debe ser removido periódicamente. Las casas de bolsas con agitación y con aire a la inversa normalmente usan bolsas de tela tejida, operan a velocidades de faz superficial relativamente bajas, y usan la filtración por la plasta como el mecanismo principal de remoción de partículas. O séase que, la tela simplemente sirve como un sustrato para la formación de una plasta de polvo que es el medio de filtración real. Las casas de bolsas de chorro pulsante por lo general usan tela de felpa y operan con una relación alta de has-a-tela (alrededor del doble de la relación de las casad de bolsas con agitación o con aire a la inversa). La tela de felpa puede jugar un papel mucho más activo en el proceso de filtración. Esta distinción entre la filtración por la plasta y la filtración por tela tiene implicaciones importantes para la velocidad de la pérdida de presión a través de las bolsas de filtro. La descripción teórica y el proceso de diseño son bastante diferentes para la filtración por la plasta en comparación con la filtración por tela. La selección de telas es asistida por las pruebas de filtración a escala de laboratorio para investigar los efectos de la tela sobre la caída de presión, la liberación de la plasta durante la limpieza, y la eficiencia de recolección. Estas pruebas cuestan menos de una décima parte del costo del modelado del flujo. Las propiedades eléctricas de la tela, tales como la resistividad y el orden triboeléctrico (la posición de la tela en una serie de "altamente electropositiva" a "altamente electronegativa", tal como sea determinada a partir de su carga bajo un procedimiento específico de triboelectrificación), puede ser medidas para asistir en la selección de la tela. Aunque sus efectos por lo general son entendidos deficientemente, los efectos eléctricos/ electrostáticos influyen la porosidad de la plasta y la adhesión de las partículas a las telas o a otras

partículas. El conocimiento de los efectos puede conducir a la selección de telas que interactúan favorablemente respecto a la recolección de polvo y la limpieza.

Las secciones siguientes muestran las ecuaciones generales usadas para determinar el tamaño de una casa de bolsas, comenzando por el tipo de casa de bolsas con aire a la inversa/agitación desinfladas.

1.2.6.1 Casas de Bolsas Desinfladas con Aire a la Inversa/Agitación

La construcción de una casa de bolsas inicia con un grupo de especificaciones que incluye la caída de presión total, el flujo total de gas, y otros requisitos; también pudiera especificarse una caída de presión máxima. De acuerdo a estas especificaciones, el diseñador debe determinar la velocidad superficial máxima que puede llenar estos requisitos. La manera estándar de relacionar la caída de presión de una casa de bolsas a la velocidad superficial se calcula por la relación:

$$\Delta P(\theta) = S_{sistema}(\theta) V_{f (promedio)} \quad (1.1)$$

en donde

- $\Delta P(\theta)$ = La caída de presión a través del filtro, una función del tiempo, θ (pulgadas de H₂O)
- $S_{sistema}(\theta)$ = arrastre del sistema, una función del tiempo [pulgadas de H₂O/(pies/minuto)]
- $V_{f (promedio)}$ = promedio (o sea, el diseño) velocidad superficial o G/C, constante (pies/minuto)

Para una casa de bolsas de compartimientos múltiples, el arrastre del sistema, que es responsable por la mayoría del arrastre desde el flanco de salida de la casa de bolsas, se determina como una combinación de resistencias representativas de varios compartimientos.[13]

$$S_{sistema}(\theta) = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{S_i(\theta)} \right]^{-1} = \frac{1}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{S_i(\theta)}} = \frac{M}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{S_i(\theta)}} \quad (1.2)$$

en donde

- M = número de compartimientos en la casa de bolsas
- $S_i(\theta)$ = arrastre a través del compartimiento i

El arrastre es una función de la cantidad de polvo recolectado sobre las bolsas en ese compartimiento. La carga de polvo varía de manera no uniforme de una bolsa a la siguiente, y dentro de una bolsa determinada también habrá una variación de la carga de polvo de una zona a la otra. Para una superficie suficientemente pequeña, j , dentro de un compartimiento i , se puede suponer que el arrastre es una función lineal del cargamento de polvo:

$$S_{i,j}(\theta) = S_e + K_2 W_{i,j}(\theta) \quad (1.3)$$

en donde

- S_e = arrastre de una bolsa de filtración libre de polvo [pulg.de H₂O/(pie/min.)]
 K_2 = resistencia al flujo de la plasta de polvo {[pulg. de H₂O/(pie/min)]/(libras/pie cuadrado)}
 $W_{ij}(\theta)$ = masa de polvo por unidad superficial j en el compartimiento i , «densidad superficial» (libras/pie²)

Si existe un número N de superficies diferentes de igual tamaño dentro de un compartimiento i , cada uno con un arrastre diferente $S_{i,j}$, entonces el arrastre total para el compartimiento i puede ser calculado en una manera análoga a la ecuación 1.2:

$$S_i(\theta) = \frac{N}{\sum \frac{1}{S_{i,j}(\theta)}} \quad (1.4)$$

Las constantes S_e y K_2 dependen de la tela, y la naturaleza y el tamaño del polvo. Las relaciones entre estas constantes y las propiedades del polvo y de la tela, no son entendidas lo suficientemente bien como para permitir predicciones exactas y por tanto deben ser determinadas empíricamente, ya sea a partir de la experiencia previa con la combinación de polvo y tela o a partir de mediciones de laboratorio. La masa de polvo en función del tiempo se define como:

$$W_{i,j}(\theta) = W_r + \int_0^\theta C_{in} V_{i,j}(\theta) d\theta \quad (1.5)$$

en donde

- W_r = masa de polvo por unidad de superficie que resta sobre una bolsa “limpia” (libras/pie²)
 C_{in} = concentración de polvo en el gas de entrada (libras/pie³)
 $V_{i,j}(\theta)$ = velocidad superficial a través de el área j del compartimiento i (pie/min.)

La concentración de polvo en la entrada y la superficie de filtrado se consideran constantes. La velocidad superficial, (relación gas-a-tela) a través de cada superficie de filtrado j y compartimiento i cambia con el tiempo, iniciando en un valor máximo justo después de despejarse y disminuyendo paulatinamente a medida que el polvo se acumula sobre las bolsas. Las velocidades superficiales individuales en los compartimientos se relacionan a la velocidad superficial promedio por la expresión:

$$V_{promedio} = \frac{\sum_i \sum_j V_{i,j}(\theta) A_{i,j}}{\sum_i \sum_j A_{i,j}} = \frac{\sum_i \sum_j V_{i,j}(\theta)}{M} \quad (1.6)$$

(para M compartimientos con igual área)

Las ecuaciones 1.1 a 1.6 revelan que no existe una relación explícita entre la velocidad superficial de diseño y la caída de presión de la lámina-tubo. La caída de presión para un diseño determinado por la solución simultánea de las ecuaciones 1.1 a 1.5, con la ecuación 1.6 como una restricción sobre esa solución. Resolver las ecuaciones requiere un procedimiento iterativo: empezar con un objetivo conocido para la caída de presión promedio, proponer un diseño de casa de bolsas (número de compartimientos, duración del período de filtración, etc.), suponer una velocidad superficial que produzca esa caída de presión y resuelva el sistema de ecuaciones 1.1 a 1.6 para verificar que la caída de presión calculada es igual a la caída de presión fijada como objetivo. Si no resulta así, repítase el procedimiento con parámetros nuevos hasta que la velocidad produzca una caída de presión promedio (y una caída de presión máxima, si se aplica) que sea suficientemente cercana a la especificación de diseño. Se presentan algunos ejemplos del uso del procedimiento de iteración en la referencia [13].

1.2.6.2 Casas de Bolsas de Chorro Pulsante

La distinción entre las casa de bolsas de chorro pulsante usando felpas y casas de bolsas con agitación y con aire a la inversa es básicamente la diferencia entre la filtración con pastilla y la filtración con una composita de polvo y tela (filtración sin pastilla). Esta distinción es más una cuestión de conveniencia que de física, ya que cualquiera de los dos tipos de casa de filtros puede ser diseñado para una aplicación específica. Sin embargo, los costos para los dos tipos difieren dependiendo de factores específicos para la aplicación y el tamaño. Algunos chorros a pulso permanecen en línea todo el tiempo y son limpiados frecuentemente. Otros son sacados fuera de línea para una limpieza a intervalos relativamente largos. En cuanto más tiempo permanezca un compartimiento fuera de línea sin limpiarse, más cambia el mecanismo de filtración por composita de polvo y tela a filtración por pastilla. Por lo tanto, un modelo completo de filtración de chorro pulsante debe explicar la filtración a fondo que ocurre sobre un filtro de chorro pulsante relativamente limpio, la filtración por pastilla que ocurre inevitablemente debido a períodos prolongados fuera de línea, y el período de transición entre los dos regímenes. Cuando se usan telas de membrana, la filtración se lleva a cabo principalmente en la superficie de la membrana, la cual actúa de manera similar a una pastilla, El análisis siguiente no ha sido probado contra las telas de membrana.

Además de la cuestión del mecanismo de filtración, también existe la cuestión del método de limpieza. Si las condiciones de una aplicación requieren que un apartamento sea puesto fuera de línea para su limpieza, el polvo removido de la bolsa cae hacia la tolva para polvo antes de que el flujo de gas hacia adelante se restablezca. Si las condiciones permiten que un compartimiento sea limpiado mientras se encuentre en línea, sólo una pequeña fracción del polvo removido cae dentro de la tolva. El restante del polvo desprendido será depositado de nuevo (o sea, “reciclado”) sobre la bolsa por el flujo de gas hacia adelante. La capa de polvo depositado de nuevo tiene diferentes características de caída de presión que el polvo recién depositado. El trabajo de modelado que se ha realizado hasta la fecha se enfoca en el método de limpieza en línea. Dennis y Klemm [14] propusieron el modelo siguiente de arrastre a través de un filtro a chorro de pulso:

$$S = S_e (K_2)_c W_c + K_2 W_o \quad (1.7)$$

en donde

S	=	arrastre través del filtro
S_e	=	arrastre de un filtro recién limpiado
$(K_2)_c$	=	resistencia específica del polvo del polvo reciclado
W_c	=	densidad superficial del polvo de reciclaje
K_2	=	resistencia específica del polvo del polvo recién depositado
W_o	=	densidad superficial del polvo recién depositado

Este modelo posee la ventaja de que puede explicar fácilmente todos los tres regímenes de filtración en una casa de bolsas de chorro pulsante. Tal como en las ecuaciones 1.1 a 1.6, el arrastre, la velocidad de filtración y las densidades de superficie son funciones del tiempo, θ . Para condiciones determinadas de operación, sin embargo, se puede suponer que los valores de S_e , $(K_2)_c$, y W_c son constantes, de manera que pueden ser agrupados:

$$\Delta P = (PE)_{\Delta w} + K_2 W_o V_f \quad (1.8)$$

en donde

ΔP	=	caída de presión (pulgadas de H ₂ O)
V_f	=	velocidad de filtración (pie/minuto)
$(PE)_{\Delta w}$	=	$[S_e + (K_2)_c W_c] V_f$

La ecuación de 1.8 describe el comportamiento de la caída de presión de una bolsa individual. Para extender este resultado de una sola bolsa a un compartimiento con bolsas múltiples, la ecuación 1.7 sería usada para determinar el arrastre individual de las bolsas y el arrastre total de la casa de bolsas sería entonces calculado como la suma de las resistencias paralelas. LA caída de presión sería calculada tal como en la ecuación 1.1. Parece razonable extender este análisis al caso en que el polvo se encuentra distribuido de manera desuniformada sobre la bolsa y entonces aplicar la ecuación 1.7 a cada zona sobre la bolsa, seguido por una ecuación análoga a la ecuación 1.4 para calcular el arrastre de las bolsas en total. La dificultad en seguir este procedimiento estriba en que uno debe suponer valores W_c para cada zona diferente que va a ser modelada.

La desventaja del modelo representado por las ecuaciones 1.7 y 1.8 es que las constantes S_e , $(K_2)_c$, y W_c , no pueden predecirse hasta este punto. En consecuencia, se deben usar las correlaciones de los datos de laboratorio para determinar el valor de $(PE)_{\Delta w}$. Para la combinación de tela y polvo de felpa d Dacron y ceniza flotante del carbón, Dennis y Klemm[14] desarrollaron una relación empírica entre $(PE)_{\Delta w}$, la velocidad superficial, y la presión del chorro de limpieza. Esta relación (convertida de unidades métricas a inglesas) es de la siguiente manera:

$$(PE)_{\Delta w} = 6.08 V_f P_j^{-0.65} \quad (1.9)$$

en donde

$$\begin{aligned} V_f &= \text{velocidad superficial, (pies/minuto)} \\ P_j &= \text{presión del chorro de limpieza} \\ &\quad \text{(generalmente entre 60 y 100 libras por pulgada cuadrada en} \\ &\quad \text{válvula, } \textit{psig}; \text{ véase la sección 1.4.1)} \end{aligned}$$

Esta ecuación es esencialmente un ajuste de regresión a una cantidad limitada de datos de laboratorio y no debe ser aplicada a otras combinaciones de polvo y tela. La forma de ley a potencia de la ecuación 1.9 puede no ser válida para otros polvos o telas. En consecuencia, se deben recolectar y analizar más datos antes de que el modelo representado por la ecuación 1.9 pueda ser usada para propósitos rigurosos de determinación de tamaño.

Otro modelo que parece prometedor en la predicción de la caída de presión en la filtración sin plasta es el de Leith y Ellenbecker[15] tal como fue modificado por Koehler y Leith.[16] En este modelo, la caída de presión en el tubo-lámina es una función del arrastre de la tela limpia, la maquinaria del sistema, y la energía de limpieza. En específico:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \left[P_s + K_1 V_f - \sqrt{(P_s - K_1 V_f)^2 - 4W_o \frac{K_2}{K_3}} \right] + K_v V_f^2 \quad (1.10)$$

en donde

$$\begin{aligned} P_s &= \text{presión estática máxima lograda en la bolsa durante la limpieza} \\ K_1 &= \text{resistencia de la tela limpia} \\ V_f &= \text{velocidad superficial} \\ K_2 &= \text{resistencia de flujo del deposito de polvo} \\ K_3 &= \text{coeficiente de eficiencia de la limpieza de la bolsa} \\ K_v &= \text{coeficiente de pérdida para el venturi a la entrada de la bolsa} \end{aligned}$$

Las comparaciones de los datos de laboratorio con las caídas de presión calculadas a partir de la ecuación 1.10 [15,16] se encuentran en acuerdo para una variedad de combinaciones de polvo y tela. La desventaja de la ecuación 1.10 es que las constantes K_1 , K_2 , and K_3 deben ser determinadas a partir de mediciones de laboratorio. Lo más difícil de determinar es el valor de la constante K_3 , que sólo puede ser encontrado realizando mediciones en una casa de bolsas de chorro pulsante a escala piloto. Una limitación de las mediciones de laboratorio es que las condiciones reales de la filtración no siempre pueden ser simuladas de manera adecuada. Por ejemplo, un polvo redispersado puede no tener la misma distribución de tamaños o características de carga que el polvo original, generando así diferentes valores de K_1 , K_2 , y K_3 de los que serían medidos en una casa de bolsas en operación.

1.3 Procedimientos de Diseño

El procedimiento de diseño requiere estimar una relación de gas a tela que es compatible con la selección de la tela y el tipo de limpieza. La selección de la tela con respecto a la composición depende de las características del gas y del polvo; la selección de la tela con respecto a la construcción (tejidas o de felpa) depende en gran parte del tipo de limpieza. Una estimación de una relación de gas a tela que es demasiado alta, comparada con una relación de gas a tela estimada correctamente, conduce a caídas de presión más altas, mayor penetración de las partículas (eficiencia de recolección más baja), y una limpieza más frecuente que conduce a una vida reducida de la tela. Una estimación de una relación de gas a tela que es demasiado bajo aumenta el tamaño y el costo de la casa de bolsas innecesariamente. Cada uno de los parámetros para diseño se discuten a continuación.

1.3.1 Relación Gas-a-Tela

La relación gas-a-tela es difícil de estimar a partir de los principios presentados primeramente. Sin embargo, ciertos métodos acortados de complejidad variante permiten una estimación rápida. A continuación se presentan tres métodos de dificultad progresivamente mayor. Para las casas de bolsas con agitación y con aire a la inversa, el tercer método se realiza de manera óptima con programas de computación disponibles al público. Aunque las casas de bolsas con chorro a pulso han conquistado una gran parte del mercado, no son necesariamente el tipo menos costoso para una aplicación específica. Las determinaciones del costo para las casas de bolsas con chorro de pulso deben ser realizadas usando las relaciones gas-a-tela específicas para la aplicación y para las casas de bolsas con aire a la inversa o con agitación a sus relaciones de gas-a-tela específicas para la aplicación.

Los métodos resumidos a continuación se aplican a las casas de bolsas convencionales. El uso de una simulación electrostática puede permitir una relación mayor de gas-a-tela a una caída de presión determinada; por tanto se requiere una estructura más pequeña de casa de bolsas y menos bolsas. Viner y Locke¹⁷ discuten los modelos de costo y rendimiento para los filtros de tela estimulados electrostáticamente; sin embargo, no existen datos disponibles para las instalaciones a gran escala. El uso de configuraciones extendidas de la zona de bolsas (bolsas con forma de estrella o cartuchos con medios plizados) no permiten cambios significantes en las relaciones de gas-atela, pero no permiten la instalación de más tela en un volumen determinado.

1.3.1.1 Relación Gas-a-Tela de Aplicaciones Similares

Después de que se ha seleccionado una tela, una relación inicial de gas-a-tela puede ser determinada usando la tabla 1.1. La columna 1 muestra el tipo de polvo; la columna 2 muestra la relación de gas-a-tela para telas tejidas; y la columna 3 muestra las relaciones de gas-a-tela para las telas afelpadas. Nótese que estos valores son todos relaciones de gas-a-tela *netas*, iguales a la razón de flujo volumétrico total en pies cúbicos por minuto divididos entre el área neta de tela en pies cuadrados. Esta relación, en unidades de pies por minuto, afecta la caída de presión y la vida de las bolsas como fue discutido en la sección 1.2. El área neta de tela se determina dividiendo la velocidad de flujo del gas de escape en *acfm*, entre la relación

Tabla 1.1: Relación Gas-a-Tela para las Combinaciones de Casa de Bolsas y Telas ^{a,b}
(pies cúbicos reales por minuto) / (pies cuadrados de superficie neta de tela)

Polvo	Agitador/Tela Tejida Aire a la Inversa/Tela Tejida	Chorro a Pulso/Tela de Felpa Aire a la Inversa/Tela de Felpa
Oxido de Aluminio (Alúmina)	2.5	8
Asbesto	3.0	10
Bauxita	2.5	8
Carbón Negro	1.5	5
Carbón	2.5	8
Cacao, Chocolate	2.8	12
Arcilla	2.5	9
Cemento	2.0	8
Cosméticos	1.5	10
Residuo de Esmalte	2.5	9
Alimento de Ganado, Granos	3.5	14
Feldspar	2.2	9
Fertilizante	3.0	8
Harina	3.0	12
Ceniza Flotante	2.5	5
Grafito	2.0	5
Yeso	2.0	10
Mineral de Hierro	3.0	11
Oxido Férrico	2.5	7
Sulfato Férrico	2.0	6
Oxido de Plomo	2.0	6
Polvo de Piel	3.5	12
Cal	2.5	10
Piedra Caliza	2.7	8
Mica	2.7	9
Pigmentos de Pintura	2.5	7
Papel	3.5	10
Plásticos	2.5	7
Quarzo	2.8	9
Polvo de Piedra	3.0	9
Arena	2.5	10
Aserrín (Madera)	3.5	12
Sílice	2.5	7
Loza	3.5	12
Detergentes, Jabón	2.0	5
Especies	2.7	10
Almidón	3.0	8
Azúcar	2.0	13
Talco	2.5	5
Tabaco	3.5	
Oxido de Zinc	2.0	

^aReferencia[1]

^bValores de diseño generalmente seguros; su aplicación requiere la consideración del tamaño de las partículas y cargado de grano.

Tabla 1.2: Guía Aproximada para Estimar la Superficie de Tela en Grueso a Partir del Área Neta de Tela^a

Superficie Neta de tela (pies cuadrados)	Factor de Multiplicación	
	Para Obtener la Superficie de Tela en (pies Cuadros)	
1-4,000	Multiplicar por	2
4,001-12,000	“	1.5
12,001-24,000	“	1.25
24,001-36,000	“	1.17
36,001-48,000	“	1.125
48,001-60,000	“	1.11
60,001-72,000	“	1.10
72,001-84,000	“	1.09
84,001-96,000	“	1.08
96,001-108,000	“	1.07
108,001-132,000	“	1.06
132,001-180,000	“	1.05
above 180,001	“	1.04

de gas-a-tela de diseño. Para una casa de bolsas de tipo intermitente que es clausurada para su limpieza, el área neta de tela también es el total, de la superficie de la tela. Sin embargo, para filtros continuos con agitación o con aire a la inversa, el área puede ser aumentada para permitir la clausura de uno o más compartimientos para su limpieza. Los filtros de chorro pulsante con compartimientos y operados continuamente que son limpiados fuera de línea también requieren tela adicional para mantener el área neta requerida al limpiar. La tabla 1.2 proporciona una guía para ajustar el área neta a la superficie en grueso, la cual determina el tamaño de un filtro que requiere limpieza fuera de línea.

1.3.1.2 Relaciones de Gas-a-Tela de los Métodos del Fabricante

Los fabricantes han desarrollado nomógrafos y tablas que permiten la estimación rápida de la relación de gas-a-tela. Dos ejemplos se presentan a continuación, uno para las casas de bolsas limpiadas por agitación y el otro para casas de bolsas limpiadas por chorro a pulso.

Para las casas de bolsas con agitador, la tabla 1.3 da un método que usa factores para estimar la relación. Las relaciones para varios materiales en diversas operaciones se presentan, pero son modificadas por factores para el tamaño de las partículas y la carga de polvo. Se incluyen direcciones y un ejemplo. Las relaciones de gas-a-tela para las casas de bolsas con aire a la inversa serían aproximadamente iguales o un poco menores en comparación a los valores de la tabla 1.3.

Para casas de bolsas de chorro pulsante, que normalmente operan a dos o más veces la relación de gas-a-tela de las casas de bolsas con aire a la inversa, otro método por factores²⁰ ha sido modificado con ecuaciones para representar la temperatura, el tamaño de las partículas, y la carga de polvo:

$$V = 2.878 A B T^{-0.2335} L^{-0.06021} (0.7471 + 0.0853 \ln D) \quad (1.11)$$

en donde

- V = relación gas-a-tela (pies/minuto)
- A = factor del material, de la tabla 1.4
- B = factor de la aplicación, de la tabla 1.4
- T = temperatura, (°F, entre 50 y 275)
- L = carga de polvo de entrada (gramos por pie cúbico, entre 0.05 y 100)
- D = diámetro promedio en masa de la partícula (micras, entre 3 y 100)

Para temperaturas por debajo de 50°F, úsease $T = 50$ pero espérese una exactitud disminuida; para temperaturas por encima de 275°F, úsease $T = 275$. Para diámetros promedio en masa de partículas menores de 3 micras, el valor de D es 0.8, y para diámetros mayores de 100 micras, D es 1.2. Para cargas de polvo menores de 0.05 gramos por pie cúbicos, úsease $L = 0.05$; para cargas de polvo por encima de 100 gramos por pie cúbico, úsease $L = 100$. Para casas de bolsas con cartuchos horizontales, un método de factores similar puede ser usado. La tabla 1.5 proporciona los factores.

1.3.1.3 Relación Gas-a-Tela de Ecuaciones Teóricas/Empíricas

Casas de Bolsas con Agitador y con Aire a la Inversa. El sistema descrito por las ecuaciones 1.1 a 1.6 es complicado; sin embargo, los métodos numéricos pueden ser usados para obtener una solución exacta. Una debilidad crítica en el modelado de casas de bolsas que todavía debe ser resuelta es la falta de una descripción fundamental del proceso de limpieza de las bolsas. Esto es, para resolver las ecuaciones 1.1 a 1.6, el valor de W_r (la carga de polvo después de la limpieza) debe ser conocido. Con claridad, debe existir una relación entre la cantidad y el tipo de energía para la limpieza y el grado de remoción del polvo de una bolsa. Dennis *et al.*[13] desarrollaron correlaciones para la remoción de ceniza flotante de carbón de las bolsas de fibra de vidrio tejida mediante la limpieza por agitación y por aire a la inversa. Estas correlaciones han sido incorporadas en un programa de computación que genera la solución al sistema de ecuaciones presentado con anterioridad.[14],[21],[22] Si uno aplicara las correlaciones desarrolladas con la ceniza de carbón y las telas de fibra de vidrio tejidas a otras combinaciones de polvo y tela, la exactitud de los resultados dependería de que tan cercanamente esa combinación duplicara el sistema de ceniza de carbón y tela tejida de vidrio.

Los factores físicos que afectan la correlación incluyen a la distribución de tamaños de las partículas, la adhesión y las propiedades electrostáticas del polvo y de la tela, y el tejido de la tela, tanto como la energía de limpieza. Se necesita más investigación en esta área de la filtración por tela.

Tabla 1.3: Método Usando el Factor del Fabricante para Estimar las Relaciones Gas-a-Tela para las Casas de Bolsas c

A RELACIÓN 4/1		RELACIÓN 3/1		RELACIÓN 2.5/1		RELACIÓN 2/1		F
Material	Operación	Material	Operación	Material	Operación	Material	Operación	Mate
Cartón Alimentos Harina Granos Polvo de Piel Tabaco Aire de Suministro	1 2, 3, 4, 5, 6, 7 2, 3, 4, 5, 6, 7 2, 3, 4, 5, 6, 7 1, 7, 8 1, 4, 6, 7 13 1, 6, 7	Asbesto Polvo de Aluminio Material Fibroso Material Celulósico Yeso Cal (Hidratada) Perlita Químicos del Hule Sal Arena Escama de Hierro Carbonato de Sodio Talco Operación de Maquina	1, 7, 8 1, 7, 8 1, 4, 7, 8 1, 4, 7, 8 1, 3, 5, 6, 7 2, 4, 6, 7 2, 4, 5, 6 4, 5, 6, 7, 8 2, 3, 4, 5, 6, 7 4, 5, 6, 7, 9, 15 1, 7, 8 4, 6, 7 3, 4, 5, 6, 7 1, 8	Óxido de Aluminio Carbón Negro Cemento Coque Pigmento de Cerámica Polvo de Arcilla y de Ladrillo Carbón Kaolina Piedra Caliza Roca, Polvo de Minerales Sílice Azúcar	2, 3, 4, 5, 6 4, 5, 6, 7 3, 4, 5, 6, 7 2, 3, 5, 6 4, 5, 6, 7 2, 4, 6, 12 2, 3, 6, 7, 12 4, 5, 7 2, 3, 4, 5, 6, 7 2, 3, 4, 5, 6, 7 3, 4, 5, 6, 7	Fertilizante de Fosfato de Amonio Diatomáceas Petroquímicos Secos Tintas Ceniza Flotante Polvos Metálicos Plásticos Resinas Silicatos Almidón Jabones	2, 3, 4, 5, 6, 7 4, 5, 6, 7 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 2, 3, 4, 5, 6, 7 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 6, 7 3, 4, 5, 6, 7	Carbón Activado Carbón Negro Detergentes Humos y Oxidos Otros Sólidos I
CORTE - 123 TRITURADO - PULVERIZADO -		MEZCLADO - 456 TAMIZADO - ALMACENAJE -		TRANSPORTE - 789 MOLIENDA - AGITACION -		HORNO DE HUMOS - 101112 HUMO DE REACCION - DISPOSICION -		LIMPIEZA DE
B		C		Esta información constituye una guía para situaciones comunes y no debe ser con excepciones. Las relaciones de aire-a-tela dependen de la carga de polvo, la distri forma de las partículas y la "cohesividad" del polvo depositado. Estas condicione para cada aplicación. Entre más largo sea el intervalo entre las limpiezas de las bo relación de aire-a-tela. Las partículas finamente divididas, de tamaño uniforme p plastas más densas en el filtro y requieren relaciones aire-a-tela que cuando las pa encuentran interdispersadas con las finas. Las partículas pegajosas y aceitosas, in forma y el tamaño, forman plastas densas en el filtro y requieren relaciones más b				
FACTOR DE FINEZA		FACTOR DE LA CARGA DE POLVO						
Tamaño en Micras	Factor	Carga gramos/pie cúbico	Factor					
> 100	1,2	1 - 3	1,2	Ejemplo: Una unidad de agitación en una fundición que procesa 26 000 pies cúbico por minuto y re arena. La distribución de partículas muestra que el 90 por ciento son mayores de 10 micra en el invierno y a la atmósfera en el verano. $3,500 \frac{\text{libras}}{\text{hora}} \div 60 \frac{\text{minutos}}{\text{hora}} \div 26,000 \frac{\text{pies cubicos}}{\text{minuto}} \times 7,000 \frac{\text{gramos}}{\text{libras}}$				
50 - 100	1,1	4 - 8	1					
10 - 50	1	9 - 17	0,95					
3 - 10	0,9	18 - 40	0,9					
1 - 3	0,8	> 40	0,85					
< 1	0,7							
				*Tabulación A = 3/1 relación, Tabulación B = Factor 1.0, Tabulación C = 0.95; 3 x 1 x 0.95 = relació 26,000 / 2.9 = 9,000 sq. ft.				

1-24

Tabla 1.4: Factores para las Relaciones de Gas-a-Tela en Chorro Pulsante^a

A. Factor del Material

15 ^b	12	10	90	6.0 ^c
Mezcla para Pastel	Asbesto	Oxido de	Fertilizante de	Carbón activado
Polvo de cartón	Polvo para Pulido	Aspirina	fosfato de amonio	Carbón negro
Cacao	Material fibroso	Carbón negro	Pastel	(molecular)
Alimentos	y celulósico	(terminado)	Diatomáceas	Detergentes
Harina	Residuo del agitado	Cemento	Petroquímicos secos	Humos y otros
Grano	en fundiciones	Pigmentos	Tintas	productos
Polvo de piel	Yeso	de cerámica	Ceniza flotante	dispersados
Aserrín	Cal (hidratada)	Polvos de arcilla	Polvo metálico	directo de las
Tabaco	Perlita	y de ladrillo	Oxidos metálicos	reacciones
	Químicos del hule	Carbón	Pigmentos	Leche en polvo
	Sal	Fluorspar	metálicos y sintéticos	Jabón
	Arena	Goma natural	Plásticos	
	Polvo del soplado	Caolina	Resinas	
	de arena	Piedra caliza	Silicatps	
	Carbonato de sodio	Percloratos	Almidón Estearatos	
		Polvo de roca, y	Acido Tánico	
		de minerales		
		Sílice		
		Azúcar		
		Acido Sórico		

B. Factor de la Aplicación

Ventilación de Emisiones Molestas (insidiosas) Alivio de los puntos de transferencia, transportadores, estaciones de embalaje, etc.	1.0
Recolección de Producto Transporte-ventilación del aire, molinos, secadoras relámpago, clasificadores, etc.	0.9
Filtración del Gas de Proceso Secadoras por aspersión, hornos, reactores, etc.	0.8

^aReferencia [20]

^bEn general, material físicamente y químicamente estable.

^cTambién incluye aquellos sólidos que son inestables en su estado físico o químico debido a su naturaleza higroscópica, sublimación y/o polimerización.

El diseño riguroso de una casa de bolsas por consiguiente emplea varios pasos. Primero, la meta del diseño para una caída de presión promedio (y una caída de presión máxima, si es necesario) debe ser especificada junto con la velocidad de flujo de gas total y otros parámetros, tales como S_e y K_2 (obtenidas sea en el campo o por mediciones de laboratorio). Segundo, se supone una velocidad superficial y el número de compartimientos en la casa de bolsas es calculado basándose en el flujo de gas total, la velocidad superficial, el tamaño de la bolsa, y el número de bolsas por compartimiento (Los compartimientos típicos en la industria eléctrica de los Estados Unidos usan bolsas de 1 pie de diámetro por 30 pies de longitud con 400 bolsas por compartimiento). La práctica estándar es diseñar una casa de bolsas para alcanzar la caída de presión especificada cuando un compartimiento se encuentra fuera de línea para su mantenimiento. El tercer paso es especificar las características de operación de la casa de bolsas (o sea, el período de filtración, el período de limpieza, y el mecanismo de limpieza). Cuarto, el diseñador debe especificar la eficiencia de limpieza para que la carga residual de polvo puede ser estimada. Finalmente, el diseño de casa de bolsas especificado se usa para establecer los detalles para las ecuaciones 1.1 a 1.6, los que enseguida son resueltos numéricamente para establecer la caída de presión como función del tiempo. La caída de presión es calculada a continuación integrando la caída de presión instantánea durante el ciclo de filtración y dividiendo entre el tiempo del ciclo. Si el promedio calculado es más alto que la especificación de diseño, la velocidad superficial debe ser reducida y se debe repetir el procedimiento. Si la caída de presión promedio calculada es significativamente más baja que la especificación de diseño, la casa de bolsas propuesta se sobrepasaría de tamaño, aumentando la velocidad superficial y repitiendo el procedimiento. Cuando el promedio calculado se acerca lo suficiente al valor especificado supuesto, se ha determinado el diseño. Una descripción completa del proceso de modelado se encuentra en los reportes de Dennis et al. [13,22] Una crítica sobre la exactitud del modelo es presentado por Viner et al.

Casa de Bolsas de Chorro Pulsante. El proceso total de diseñar una casa de bolsas de chorro pulsante es en realidad más sencillo que el que se requiere para una casa de bolsas con aire a la inversa o con agitador si la casa de bolsas permanece en línea para la limpieza. El primer paso es especificar la caída de presión promedio deseada para el tubo-lámina. Segundo, las características de la casa de bolsas deben ser establecidas (por ejemplo, el tiempo en línea, la energía de limpieza). Tercero, el diseñador debe obtener valores para los coeficientes ya sea en la ecuación 1.9 o la ecuación 1.10 proveniente del campo, la planta piloto, o las mediciones de laboratorio. Cuarto, se estima un valor para la velocidad superficial y la ecuación apropiada (ecuación 1.8 o 1.10) se resuelve para la caída de presión como función de tiempo para la duración del ciclo de filtración. Esta información se usa para calcular la caída de presión promedio del ciclo. Si la caída de presión resulta igual a la caída de presión especificada, el procedimiento termina. Si no es así, el diseñador debe ajustar la velocidad superficial y repetir el procedimiento.

1.3.2 Caída de Presión

La caída de presión para las bolsas puede ser calculada a partir de las ecuaciones presentadas en la sección precedente si se conocen los valores para los diversos parámetros. Con frecuencia no son conocidos, pero una caída de presión máxima de 5 a 10 pulgadas de H_2O a través de la casa de bolsas y de 10 a 20 pulgadas de H_2O a través del sistema por completo puede suponerse si contiene una buena cantidad de conductos.

Tabla 1.5: Método Usando el Factor del Fabricante para Estimar las Relaciones Gas-a-Tela para las Casas de Bolsas con Cartucho Horizontal
Tabla de Factores “A” para el Material Seleccionado

2,5		2,1	1,9	1,3	Muestra de Po Requerida
M A T E R I A L E S	Polvo de roca y de minerales Sal mineral ^a Arena (no en fundiciones)	Carbón activado	Fertilizantes ^a Talco	Óxido de aluminio (ascensor de aire) Tintas Humos metalúrgicos Pigmentos de pintura Estearatos	Detergentes Aimentos y granos Perlita Farmacéuticos Leche en polvo Resinas Jabón Tabaco
		Oxido de aluminio (transferencia) Mezcla para pastel ^a Carbón negro (terminado) Pigmento de cerámica Carbón Coque Diatomáceas Harina			
		Fluorspar Ceniza flotante Residuo de la agitación en fundiciones Yeso Cal hidratada Piedra caliza Pintura para spersión electrostática (recubrimiento de polvo) Petroquímicos (en seco) Pigmentos metálico y sintéticos Emplastados Aditivos de hule Silicatos Carbonato de sodio Almidón Azucar ^a Humos de soldadura	1,7	0,7	Polvos Excluí
			Aspirina Cemento Polvo de arcilla y ladrillo Cacao ^a Café ^a Grafito Caolina Óxidos metálicos Polvo metálico Percloratos Selenio Sílice (harina)	Sílice (humos)	Asbesto Lavado por arco Fibra de vidrio Materiales fibrosos y celulósicos Piel Metalización Lana mineral Molienda de taga de Polvo de papel Madera comprimida Aserín

^a Únicamente bajo humedad controlada (40 por ciento de humedad relativa) y temperatura ambiente.

La relación aproximada de “gas-to-cloth” - G/C (gas-a-tela) para un recolector horizontal *Mikropul* en pies cúbicos reales por minuto por pie cuadrado de superficie de filtrado se obtiene multiplicando los cinco factores siguientes: $G/C = A \times B \times C \times D \times E$

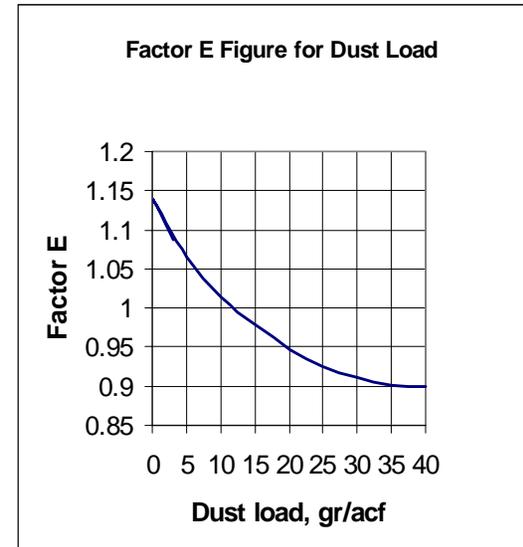
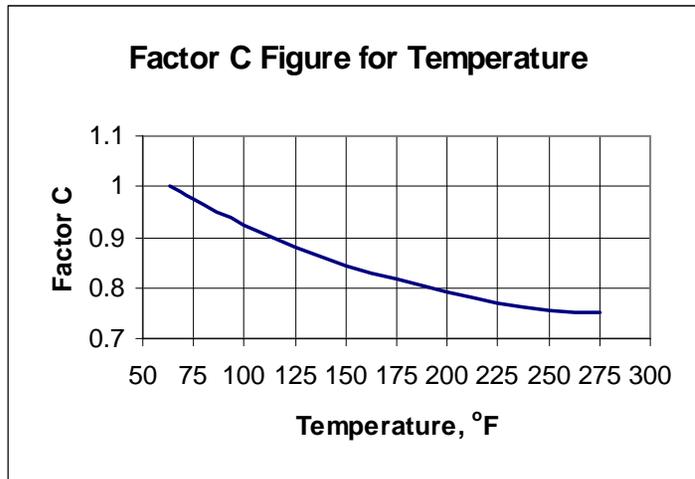
Por ejemplo, G/C para la filtración del gas de proceso de polvo de piedra a 250° F y 2 gramos/pie cúbico real = 2.5 x 0.8 x 0.75 x 0.9 x 1.1 = 1.49.

Cortesía de *Hosokawa Mikropul*

Tabla 1.5: (continuación)

Tabla de Factores “B” para la Aplicación		Tabla de Factores “D” para la Fineza del Polvo	
Aplicación	Factor B	Fineza	Factor D
Ventilación de Insidiosos Alivio de puntos de transferencia, transportadores, estaciones de embalaje, etc.	1	Por encima de 50 μm	1,1
Recolección de Productos Ventilación del aire en transportadores, molinos, secadores relámpago, clasificadores, etc.	0,9	20 - 50 μm	1
Filtración de Gas de Procesos secadores, hornos, reactores, etc.	0,8	2-20 μm	0,9
		Por debajo de 2 μm	0,85

1-28



Cortesía de *Hosokawa Mikropul*

Una forma comparable de las ecuaciones 1.1 y 1.3 que puede ser usado para estimar la caída de presión máxima a través de la tela en una casa de bolsas con agitador o con aire a la inversa es:

$$\Delta P = S_e V + K_2 C_i V^2 \theta \quad (1.12)$$

en donde

ΔP	=	caída de presión (pulgadas de H ₂ O)
S_e	=	arrastre residual efectivo de la tela [pulgadas de H ₂ O/(pie/minuto)]
V	=	velocidad superficial o relación gas-a-tela (pies/minuto)
K_2	=	coeficiente De resistencia específica del polvo { [pulgadas de H ₂ O/(pies/minutos)]/(libras/pie cuadrado) }
C_i	=	concentración del polvo de entrada (libras por pie cúbico)
θ	=	tiempo de filtración (minutos)

Aunque existe mucha variabilidad, los valores para S_e pueden variar en un rango de alrededor de 0.2 a 2 pulgadas de H₂O/(pie/minuto) y para K_2 de 1.2 a 30–40 [pulgadas de H₂O/(pie/minuto)]/(libras por pie cuadrado). Los valores típicos para la ceniza flotante de carbón son de alrededor de 1 a 4. Las concentraciones de entrada varían desde menos de 0.05 gramos por pie cúbico a más de 100 gramos por pie cúbico, pero un rango aún más típico es de alrededor de 0.5 a 10 gramos por pie cúbico. Los tiempos de filtración varían dentro de un rango de 20 a 90 minutos para casas de bolsas en uso continuo, pero un rango entre 30 y 60 minutos se encuentra con mayor frecuencia. Para casas de bolsas de chorro pulsante, se usan las ecuaciones 1.8 y 1.9 para estimar ΔP , después de sustituir $C_i V \theta$ por W_o , y $(PE)_{\Delta w}$ por $S_e V$.

1.3.3 Características de las Partículas

La distribución de tamaños de las partículas y la adhesividad son las propiedades más importantes de las partículas que afectan los procedimientos de diseño. Los tamaños menores de partículas pueden formar una plasta más densa, lo que aumenta la caída de presión. Tal como se muestra en las tablas 1.3 y 1.5 y en la ecuación 1.11, el efecto del tamaño promedio de las partículas que va en disminución es un valor menor de la relación de gas-a-tela aplicable.

Las partículas que se adhieren, tales como los residuos aceitosos o los plásticos electrostáticamente activos, pueden requerir la instalación de equipo que inyecte un material de recubrimiento sobre la superficie de la bolsa, el cual actúa como un tampón que atrapa a las partículas y evita que cieguen o obstruyan permanentemente a los poros de la tela. Una selección informada puede eliminar los problemas electrostáticos.

Tabla 1.6: Propiedades de los Principales Materiales de Tela ^a

Tela	Temperatura °F ^b	Resistencia al Ácido	Resistencia a los Alcalíes	Abrasión Flex
Algodón	180	Deficiente	Muy Buena	Muy Buena
Creslan ^c	250	Buena en ácidos minerales	Buena en alcalí débil	Buena a Muy Buena
Dacron ^d	275	Buena en la mayoría de los ácidos minerales, se disuelve parcialmente en H ₂ SO ₄ concentrado	Buena en alcalí débil, Mediana en alcalí fuerte	Muy Buena
Dyne ^e	160	Poco efecto aún en concentración alta	Poco efecto aún en concentración alta	Mediana a Buena
Fiberglas ^f	500	Mediana a Buena	Mediana a Buena	Mediana
Filtron ^e	270	Buena a Excelente	Buena	Buena a Muy Buena
Membrana de Nextel ^g	Depende del forro 1400	Depende del forro Muy buena	Depende del forro Buena	Mediana Buena
Nomex ^d	375	Mediana	Excelente a temperatura baja	Excelente
Nylon ^d	200	Mediana	Excelente	Excelente
Orlon ^d	260	Buena a Excelente en ácidos minerales	Mediana a Buena en alcalíes débiles	Buena
P84 ^h	475	Buena	Buena	Buena
Polipropileno	200	Excelente	Excelente	Excelente
Ryton ⁱ	375	Excelente	Excelente	Buena
Teflón ^d	450	Inerte excepto al fluoro	Inerte excepto al trifluoruro, el cloro y los metales alcalinos derretidos	Mediana
Lana	200	Muy buena	Deficiente	Mediana a Buena

^aReferencia [24]

^bTemperaturas máximas de operación continua recomendadas por *Institute of Clean Air Companies*, el Instituto de Compañías de Aire Limpio.

^cMarca Registrada de *American Cyanamid*.

^dMarca registrada de *Du Pont*.

^eNombre comercial de la División *W. W. Criswell* de *Wheelabrator-Fry, Inc.*

^fMarca registrada de *Owens-Corning Fiberglas*.

^gMarca registrada de *3M Company*.

^hMarca registrada de *Inspec Fibres*.

ⁱMarca registrada de *Phillips Petroleum Company*.

1.3.4 Características de la Corriente de Gas

La humedad y el contenido de sustancias corrosivas son las características principales de la corriente de gas que requieren una consideración de diseño. La casa de bolsas y el sistema de ductos asociado deben ser insulados y posiblemente calentados si ocurriera la condensación. Tanto los componentes estructurales como los de la tela deben ser considerados, ya que cualquiera de éstos puede ser dañado. En los casos en que la corrosión estructural sea probable, la sustitución del acero inoxidable por el acero ligero puede ser requerida, siempre que no haya presencia de cloruros al usar acero inoxidable de serie 300. (La mayoría de los aceros inoxidables auténticos son susceptibles a la corrosión por cloruros.)

1.3.4.1 Temperatura

La temperatura de la corriente de contaminante debe permanecer por encima del punto de rocío de cualquier condensable en la corriente. Si la temperatura puede ser disminuída sin acercarse al punto de rocío, se pueden utilizar los enfriadores por aspersión o el aire de dilución de manera que los límites de temperatura de la tela no sean excedidos. Sin embargo, el costo adicional de un pre-enfriador tendrán que ser considerados contra el precio más alto de las bolsas con una mayor resistencia a la temperatura. El uso del aire de dilución para enfriar la corriente también implica un intercambio entre una tela menos costosa y un filtro mayor para acomodar el volumen adicional de aire de dilución. Po lo general, el pre-enfriamiento no es necesario si la temperatura y las telas resistentes a las sustancias químicas se encuentran disponibles. (Los costos para las cámaras de aspersión, los saciadores, y otros pre-enfriadores se encuentran en la sección de “Depuradores en Húmedo”, «*Wet Scrubbers*», del *Manual [a ser escrito]*) La tabla 1.6 enumera varias de las telas que se encuentran en uso en la actualidad y proporciona información sobre los límites de temperatura y de resistencia química. La columna encabezada por el título de “Abrasión *Flex*” indica la conveniencia de la tela para la limpieza mediante agitadores mecánicos.

1.3.4.2 Presión

Los filtros de tela estándares pueden ser utilizados para el servicio por presión o al vacío pero únicamente dentro de un rango de alrededor de ± 25 pulgadas de agua. Debido a la construcción de lámina metálica de la casa, por lo general no son apropiados para servicios más severos. Sin embargo, para las aplicaciones especiales, se pueden construir cajas para presiones altas.

1.3.5 Consideraciones de Diseño de Equipo

1.3.5.1 Cajas a Presión o al Vacío

La localización de la casa de bolsas con respecto al ventilador en la corriente de gas afecta el costo de capital. Una casa de bolsas del tipo con succión, con el ventilador localizado en el lado corriente abajo de la unidad, debe tolerar presiones negativas altas y por lo tanto debe estar construida más pesada y reforzada que una casa de bolsas localizada corriente abajo del ventilador (casa de bolsas a presión). La presión

negativa en la casa de bolsas por succión puede resultar en condensación, corrosión, o aún explosiones si se están manejando gases combustibles. En el caso de gases tóxicos, esta fuga hacia adentro puede tener una ventaja sobre la casa de bolsas del tipo a presión, en donde las fugas son hacia afuera. La ventaja principal de la casa de bolsas con succión es que el ventilador que maneja la corriente de proceso se localiza en el lado de gas limpio de la casa de bolsas. Esto reduce el desgaste y la abrasión en el ventilador y permite el uso de ventiladores más eficientes (diseño de aspa con curva hacia atrás). Sin embargo, debido a que para algunos diseños los gases de escape provenientes de cada compartimiento se combinan en el atrio múltiple de salida al ventilador, la localización de los compartimientos con bolsas con fugas puede ser difícil y añade a los costos de mantenimiento. Las casas de bolsas del tipo a presión son por lo general menos costosas porque las cajas sólo deben tolerar la presión diferencial a través de la tela. En algunos diseños la casa de bolsas no tiene caja externa. El mantenimiento también se reduce porque se puede entrar a los compartimientos y observar las bolsas con fugas mientras el compartimiento se encuentra en servicio. Con una casa de bolsas a presión, la caja actúa como la chimenea para contener los humos con la descarga posterior a través de ventilas con bordo largo (monitores) en el techo de la estructura. Esta configuración hace a las bolsas con fugas más fáciles de localizar cuando la pluma sale del monitor por encima de la bolsa. La desventaja principal de la casa de bolsas del tipo a presión es que el ventilador se encuentra expuesto a los gases contaminados cuando la abrasión y el desgaste de las aspas del ventilador pueden volverse un problema.

1.3.5.2 Construcción Estándar o por Pedido

El diseño y la construcción de las casas de bolsas se separan en dos grupos, estándar y por pedido. [19] Además, las casas de bolsas estándares se separan en categorías de tamaño de baja, mediana y alta capacidad. Las casas de bolsas estándares son pre-diseñadas y construídas en la fábrica como unidades completas en serie que son ensambladas en el taller y dotadas de bolsas para unidades de baja capacidad (de cientos a miles de pies cúbicos reales por minuto de producto). Las unidades de capacidad mediana (de miles a menos de 100 000 pies cúbicos reales por minuto) tienen diseños estándares, son ensambladas en el taller, pueden o no ser dotadas de bolsas, y poseen compartimientos de bolsas separados y secciones de tolvas. Una forma de casas de bolsas de alta capacidad es el módulo enviable

(de 50 000 a 10 000 pies cúbicos reales por minuto), el cual requiere sólo un ensamble moderado en el campo. Estos módulos pueden tener bolsas instaladas y pueden ser enviados por camión o tren. A su llegada, pueden ser operados de manera sencilla o combinados para aplicaciones de mayor capacidad. Debido a que son pre-ensamblados, requieren menos trabajo de campo.

Las casas de bolsas fabricadas a pedido, consideradas también como de alta capacidad, pero por lo general de 100 000 pies cúbicos reales por minuto o mayores, son diseñadas para aplicaciones específicas y generalmente son construídas según las especificaciones prescritas por el cliente. Generalmente, estas unidades son mucho más grandes que las casas de bolsas estándares. Por ejemplo, muchas son usadas en las plantas generadoras de energía. El costo de la casa de bolsas por pedido es mucho más alto por pie cuadrado de tela porque no es un artículo en existencia y requiere arreglos especiales para su manufactura y mano de obra de campo costosa para su ensamble a su llegada. Las ventajas de la casa de bolsas a

pedido son muchas y por lo general se dirigen hacia la facilidad de mantenimiento, la accesibilidad, y otras preferencias del cliente. En algunas casas de bolsas estándares, un juego completo de bolsas debe ser reemplazado en un compartimiento a la vez debido a la dificultad en localizar y reemplazar bolsas individuales con fugas, mientras que en el caso de las casas de bolsas por pedido, las bolsas individuales se encuentran accesibles y pueden ser reemplazadas una por una a medida que se desarrollen las fugas.

1.3.5.3 Medio de Filtración

El tipo de material del filtro usado en las casas de bolsas depende de la aplicación específica y de la composición química asociada del gas, la temperatura de operación, la carga de polvo, y las características físicas y químicas de las partículas. La selección de un material, tejido, acabado, o peso específico se basa principalmente en la experiencia previa. Para las telas tejidas, el tipo de hilo (filamento, hilado, o grapa), el diámetro del hilo, y el torcido también son factores en la selección de telas apropiadas para una aplicación específica. Algunas aplicaciones son difíciles o sea, tienen partículas pequeñas o lisas que penetran fácilmente la plasta y la tela, o tienen partículas que se adhieren fuertemente a la tela y son difíciles de remover, o tienen alguna otra característica que degrada la recolección de partículas o la limpieza. Para algunas de estas aplicaciones se puede utilizar el *Gore-Tex*, una membrana de politetrafluoroetileno (PTFE) laminado a un fondo de tela (felpa o tejido). Los materiales de fondo se seleccionan para ser compatibles con la aplicación para la cual son usados. Otras telas laminadas con membrana de PTFE son distribuidas por *Tetratec (Tetratex)* y *BHA (BHA-Tex)*. Estas membranas, debido a sus poros pequeños (1 a 2 μm a menores de 1 μm) son ventajosas por su capacidad de recolectar partículas pequeñas casi inmediatamente después de que inicia la filtración. En contraste, las telas tejidas y los materiales no tejidos, (con poros de alrededor de 10 μm a 100 μm) permite que las partículas penetren el filtro durante un tiempo corto antes de que la plasta que cubre la tela sea reconstituida. La eficiencia total de la recolección de masa para una casa de bolsas puede no aparentar ser mayor que para una casa de bolsas con otras telas, pero la eficiencia puede ser mayor para las partículas finas. Para aplicaciones capaces de usar medios de papel, los filtros de cartucho pueden ser particularmente efectivos para las partículas en el rango de las submicras.

Debido a la agitación violenta de los agitadores mecánicos, las telas de hilo hilado o de hilo pesado se usan comúnmente con este tipo de limpieza, mientras que las telas de hilo de filamento más ligero se usan con la limpieza más suave con aire a la inversa. Las felpas con perforaciones por aguja son usadas típicamente para las casas de bolsas de chorro pulsante. Estas telas más pesadas son más duraderas que las tejidas al ser sujetas a los pulsos de limpieza. Las bolsas tejidas de fibra de vidrio son una excepción para aplicaciones a temperaturas altas, en donde compiten con éxito, en base al costo, contra el vidrio afelpado y otras felpas para temperaturas altas.

El tipo de material limita la temperatura máxima de operación del gas para la casa de bolsas. La tela de algodón posee la menor resistencia a las temperaturas altas (alrededor de 180°F), mientras que de las telas usadas comúnmente, el *Fiberglas* (marca registrada de *Owens Corning*) posee la mayor resistencia (alrededor de 500°F).²⁴ Si los condensables son contenidos en la corriente de gas, su temperatura debe estar bien por encima del punto de rocío porque las partículas líquidas generalmente obstruirán los poros de la tela en cuestión de minutos u horas. Sin embargo, la temperatura debe estar por debajo del límite máximo de la tela de las bolsas. Estos límites máximos se presentan en la tabla 1.6.

1.4 Estimando la Inversión de Capital Total

La *total capital investment* (inversión de capital total) incluye los costos de la estructura de la casa de bolsas, el complemento inicial de bolsas, y los costos directos e indirectos acostumbrados que se asocian a la instalación o erección de estructuras nuevas. Estos costos se describen a continuación. (Los costos para mejorar el rendimiento de las casas de bolsas con enriquecimiento eléctrico no se discuten en esta sección, pero son mencionados en el problema de ejemplo.)

1.4.1 Costo del Equipo

1.4.1.1 Costo Mínimo de las Casas de Bolsas

Las correlaciones del costo con la superficie de tela para siete tipos de casas de bolsas se muestran a continuación. Estos siete tipos, seis de los cuales son pre-ensamblados y uno es ensamblado en el campo, se enumeran en la tabla 1.7.

Esta figura muestra los costos para un tipo de casa de bolsas y para artículos de costos adicionales.²⁵ Todas las curvas se basan en cifras citadas por el vendedor. Una línea de regresión ha sido ajustada a las citas y su ecuación es presentada. En la mayoría de los casos estas líneas no deben ser extrapoladas más allá de los límites mostrados. Si el lector obtiene citas del vendedor, pudieran diferir de estas curvas por tanto como un ± 25 por ciento. Todas las estimaciones incluyen los soportes de los atrios múltiples de entrada y de salida, las plataformas, los pasamanos, y los dispositivos para la descarga de las tolvas. Los precios indicados son de flanco a flanco. El lector debe notar que la escala de cada figura cambia para acomodar los diferentes rangos de flujo de gas a través de los cuales operan los diversos tipos de casas de bolsas.

El costo adicional del acero inoxidable 304 se usa cuando tal construcción es necesaria para prevenir que la corriente de gas de escape corroa el interior de la casa de bolsas. Todas las superficies metálicas que se encuentran en contacto con la corriente de gas de escape se sustituyen por acero inoxidable.

Los costos de aislamiento representan 3 pulgadas de fibra de vidrio instaladas en el taller y recubiertas por un forro de metal, excepto las casas de bolsas por pedido, que tienen un aislamiento instalado en el campo. Los costos de aislamiento incluyen únicamente a la estructura de flanco a flanco de la casa de bolsas en la parte exterior de todas las superficies en contacto con la corriente de gas de escape. El aislamiento para el sistema de conductos, las cajas de los ventiladores, y las torres de chimenea deben ser calculados por separado como se discutirá más adelante.

La figura 1.6 representa una casa de bolsas en servicio intermitente limpiada por un agitador mecánico.[24] Esta casa de bolsas es apropiada para operaciones que requieren una limpieza poco frecuente. Puede ser puesta fuera de operación y limpiada a tiempos convenientes, tales como al final del turno o al final del día. La figura 1.6 presenta el costo de la casa de bolsa como una función del área de tela requerida. Debido a que las casas de bolsas en servicio intermitente no requieren un compartimiento

adicional para la limpieza, las superficies en grueso y las superficies netas son iguales. La gráfica es lineal porque las casas de bolsas están fabricadas con compartimientos modulares y por esto tienen poca economía de escala.

La figura 1.7 presenta los costos para una casa de bolsas modular operada de manera continua y limpiada por un agitador mecánico.²⁶ Una vez más, el precio es gráficado contra la superficie de la tela en grueso en pies cuadrados. Los costos para estas unidades, en base a pies cuadrados, son más altos que los costos para las casas de bolsas con agitación intermitentes debido a su complejidad incrementada y su construcción generalmente más pesada.

Las figuras 1.8 y 1.9 muestran [24] casas de bolsas con cajas comunes y casas de bolsas modulares de chorro pulsante, respectivamente. Las unidades con envolturas comunes tienen todas las bolsas dentro de una envoltura caja; así, por una razón diferente a al de las unidades modulares discutida anteriormente, el costo aumenta de manera lineal con el tamaño. Debido a que la envoltura común es relativamente económica, la adición de acero inoxidable es proporcionalmente más costosa que para las unidades modulares. Los costos de material adicionales y los cargos por preparación y mano de obra asociados con el acero inoxidable, que es más difícil de trabajar, son responsables de la mayor parte del gasto adicional. La figura 1.10 muestra los costos para las casas de bolsas con cartuchos limpiadas por pulso.

Tabla 1.7: Lista de Curvas de Costo para Siete Tipos de Casas de Bolsas

Tipo de Casas de Bolsas		Figura No.
<u>Unidades Pre-ensambladas</u>		
Intermitente	Agitador (intermitente)	1,6
Continuo	Agitador (modular)	1,7
Continuo	Chorro Pulsante (caja común)	1,8
Continuo	Chorro Pulsante (modular)	1,9
Continuo	Chorro Pulsante (cartucho)	1,1
Continuo	Aire a la Inversa	1,11
<u>Unidades Ensambladas</u>		
<u>en el Campo</u>		
Continuo	Cualquier método	1,12

Las figuras 1.11 y 1-12 muestran los costos para las casas de bolsas modulares y las casas de bolsas con aire a la inversa fabricadas por pedido, respectivamente.[24] Estas últimas unidades, debido a su tamaño mayor, deben ser ensambladas en el campo. Con frecuencia son usadas en plantas generadoras de energía, molinos de acero, u otras aplicaciones demasiado grandes para las casas de bolsas ensambladas en fábrica. Los precios para las unidades con agitación fabricadas por pedido no se muestran aquí, pero se anticipa que son similares a las unidades con aire a la inversa fabricadas a pedido.

1.4.1.2 Costos de las Bolsas

La tabla 1.8 presenta el precio en 1998 por pie cuadrado de bolsas por tipo de tela y por tipo de sistema de limpieza usado. Los precios reales citados pueden variar por un ± 10 por ciento de los valores en la tabla. Cuando se estimen los costos de las bolsas para toda una casa de bolsas, se debe usar la superficie de tela en grueso tal como se determine a partir de la tabla 1.2. Los costos de tela de membrana de PFTE son una combinación del costo base de la tela y una primizia para el laminado y su aplicación. A medida que las condiciones del mercado de fibras cambia, los costos de las telas en onzas por yarda cuadrada. Los anillos a presión cosidos a la tela están incluidos en el precio, pero otros artículos para el montaje, tales como las pinzas o las jaulas, deben ser añadidos basándose en el tipo de casa de bolsas.

Tabla 1.8: Precios de Bolsas
(Segundo trimestre de 1998 \$/ft²)

Forma de Limpieza	Díametro de Bolsa (pulgadas)	Tipo de Material ^F									
		PE	PP	NO	HA	FG	CO	TF	P8	RT	NX
Chorro Pulsante, TR ^b	4-1/2 to 5-1/8	0.75	0.81	2.17	1.24	1.92	NA	12.21	4.06	2.87	20.66
	6 to 8	0.67	0.72	1.95	1.15	1.60	NA	9.70	3.85	2.62	NA
Chorro Pulsante, BBR	4-1/2 to 5-1/8	0.53	0.53	1.84	0.95	1.69	NA	12.92	3.60	2.42	16.67
	6 to 8	0.50	0.60	1.77	0.98	1.55	NA	9.00	3.51	2.30	NA
Chorro Pulsante, Cartucho ^c	4-7/8	2.95	NA	6.12	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	6-1/8	1.53	NA	4.67	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Agitación, <i>Strap top</i>	5	0,63	0,88	1,61	1,03	NA	0,7	NA	NA	NA	NA
Agitación, <i>Loop top</i>	5	0,61	1,01	1,53	1,04	NA	0,59	NA	NA	NA	NA
Aire a la Reversa con anillos	8	0.63	1.52	1.35	NA	1.14	NA	NA	NA	NA	NA
	11-1/2	0.62	NA	1.43	NA	1.01	NA	NA	NA	NA	NA
Aire a la Reversa sin anillos	8	0.44	NA	1.39	NA	0.95	NA	NA	NA	NA	NA
	11-1/2	0.44	NA	1.17	NA	0.75	NA	NA	NA	NA	NA

NA = No aplicable.

Tabla 1.8: (Cont.)

^aMateriales:

PE = 16-onza poliéster	CO = 9-onza algodón
PP = 16-onza polipropileno	TF = 22-oz felpa de Teflón
NO = 14-onza <i>Nomex</i>	P8 = 16-oz P84
HA = 16-onza homopolímero acrílico	RT = 16-oz <i>Ryton</i>
FG = 16-onza fibra de vidrio con 10% Teflón	NX = 16-oz <i>Nextel</i>

^bMétodos para remover bolsas:

TR = Remoción de bolsa desde arriba (<i>snap in</i>)
BBR = Remoción de bolsa desde abajo (<i>bottom bag removal</i>)

^cCostos para cartuchos de 12.75-*in.* diámetro por 26-*inch* de largo son \$59.72 para una mezcla de poliéster/celulosa (\$0.26/ft² para 226 ft²) y \$126.00 for poliéster de enlace *spunbonded* (\$1.26/ft² para 100 ft²).

NOTA: Para las casas de bolsas tipo chorro pulsante, todas las bolsas son felpas salvo la fibra de vidrio, la cual está tejida. Para las casas de bolsas tipo chorro pulsante con acceso de abajo, se puede calcular el precio para una jaula de acero de carbón para una jaula de 4 1/2-*inch* de diámetro o una jaula de 5 5/8-*inch* de diámetro de la superficie de una sola bolsa utilizando dos juegos de ecuaciones, respectivamente. La forma de la ecuación $5.6542 \text{ ft}^2 \wedge (0.4018)$ significa $5.6542 \times \{\text{ft}^2 \text{ elevado al poder } (0.4018)\}$.

Jaulas de 4-1/2 inches por 8 ft:

\$ = $7.8444 \wedge (0.0355 \text{ ft}^2)$, juegos de 25
\$ = $6.0211 \wedge (0.0423 \text{ ft}^2)$, juegos de 50
\$ = $4.2635 \wedge (0.0522 \text{ ft}^2)$, juegos de 100
\$ = $3.4217 \wedge (0.0593 \text{ ft}^2)$, juegos de 500

Jaulas de 5-5/8 inches por 10 ft:

\$ = $5.6542 \text{ ft}^2 \wedge (0.4018)$, juegos de 25
\$ = $4.3080 \text{ ft}^2 \wedge (0.4552)$, juegos de 50
\$ = $3.0807 \text{ ft}^2 \wedge (0.5249)$, juegos de 100
\$ = $2.5212 \text{ ft}^2 \wedge (0.5686)$, juegos de 500

Estos costos se aplican a jaulas de 8 pies por 10 pies construidas de acero de carbón de calibre 11 y hechas con 10 alambres verticales y tapones “*Roll Band.*” Para collar “*snap-band*” con venturi integral, hay que agregar \$6.00 por jaula para acero de carbón y \$13.00 por jaula para acero inoxidable. Para jaulas de acero inoxidable utiliza:

\$ = $8.8486 + 1.5734 \text{ ft}^2$, juegos de 25	\$ = $21.851 + 1.2284 \text{ ft}^2$, juegos de 25
\$ = $6.8486 + 1.5734 \text{ ft}^2$, juegos de 50	\$ = $8.8486 + 1.2284 \text{ ft}^2$, juegos de 50
\$ = $4.8466 + 1.5734 \text{ ft}^2$, juegos de 100	\$ = $8.8486 + 1.2284 \text{ ft}^2$, juegos de 100
\$ = $3.8486 + 1.5734 \text{ ft}^2$, juegos de 500	\$ = $8.8486 + 1.2284 \text{ ft}^2$, juegos de 500

Para casas de bolsas con agitación o con aire a la reversa, todas las bolsas son tejidas. Todos los precios son para bolsas terminadas, y los precios pueden variar de un proveedor de otro. Para determinar los precios de bolsas de membrana, hay que multiplicar el precio de base de tela por factores de 3 a 4.5.

Fuente: ETS Inc.[24]

1.4.1.3 Equipo Auxiliar

La figura 1.1 muestra el equipo auxiliar, el cual se discute en otras partes del *Manual*. Debido a que las campanas de ventilación, el sistema de conductos, los pre-enfriadores, los ciclones, los ventiladores, los motores, el equipo para la remoción de polvo y las torres de chimenea son comunes a muchos sistemas para el control de contaminante, se les da (o se les dará) un tratamiento extenso en capítulos por separado. Por ejemplo, el capítulo 10 proporciona los procedimientos para la determinación del tamaño y del costo y los datos para las campanas de ventilación, sistema de conductos, y torres de chimenea.

1.4.2 Costo Adquirido Total

El *total purchased cost* (costo adquirido total) del sistema de filtros de tela es la suma de los costos de la casa de bolsas, las bolsas, y el equipo auxiliar; los instrumentos y los controles, los impuestos, y el transporte. Los instrumentos y los controles, los impuestos, y el transporte por lo general son tomados como porcentajes del costo total estimado de los tres primeros factores. Los valores típicos, tomados del capítulo 2, son del 10 por ciento para los instrumentos y los controles, el 3 por ciento para impuestos, y el 5 por ciento para transporte.

El costo de las bolsas varía desde menos del 15 por ciento a más del 100 por ciento del costo de la casa de bolsas austera (la casa de bolsas son bolsas o auxiliares), dependiendo del tipo de tela requerido. Esta situación no hace aconsejable que se estime el costo adquirido en total sin estimar por separado los costos de la casa de bolsas y las bolsas, y disuade del uso de un factor único para estimar un costo de la casa de bolsa y las bolsas combinadas.

1.4.3 Inversión de Capital Total

La *total capital investment - TCI* (inversión de capital total) es la suma de tres costos: el *purchased equipment cost - PEC* (costo del equipo adquirido), los *direct installation costs - DC* (costos directos de instalación) y los *indirect installation costs - IC* (costos indirectos de instalación). Los actores necesarios para estimar la *TCI* se presentan en la tabla 1.9. Los factores en la tabla 5.9 pueden ser demasiado grandes para los filtros de tela “embalados”—aquellas casas de bolsas pre-ensambladas que consisten de compartimientos, bolsas, ventilador de gas residual y motor, e instrumentos y controles. Debido a que estas unidades embaladas requieren muy poca instalación, sus costos de instalación serían más bajos (del 20 al 25 por ciento del costo del equipo adquirido). Debido a que los costos de bolsas afectan el costo del equipo adquirido en total, los factores de costo en la tabla 1.9 pueden causar la sobre-estimación de la inversión capital total cuando se usan bolsas costosas. El uso de los componentes de acero inoxidable también puede causar la sobre-estimación. Debido a que las casas de bolsas varían en tamaño, los factores específicos para la preparación del sitio o para las edificaciones no son presentados. Los costos para los edificios pueden ser obtenidos de referencias tales como *Means Construction Cost Data 1998*[25] (Información sobre los Costos de Construcción de los Medios de Means). El terreno, el capital de trabajo, y las instalaciones fuera de línea no se requieren normalmente y han sido excluidos de la tabla. Cuando sea necesario, estos costos pueden ser estimados.

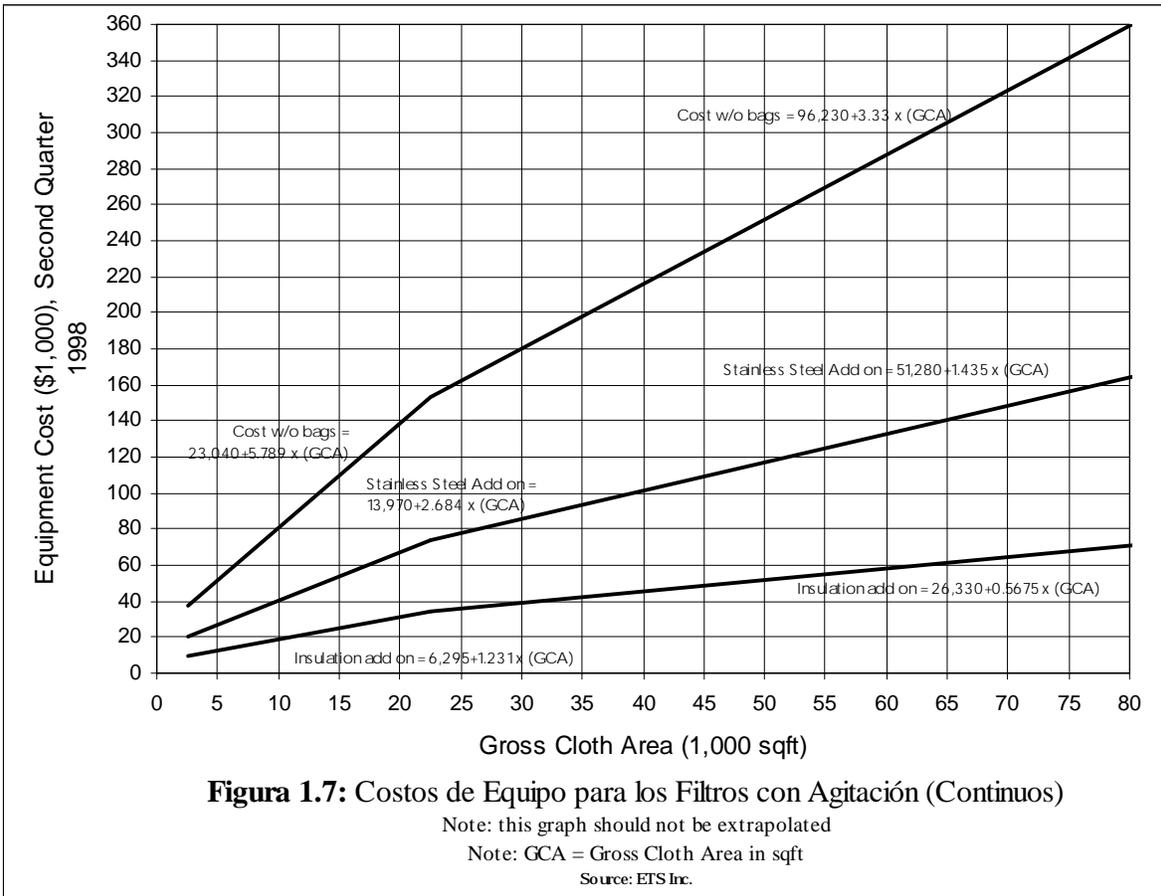
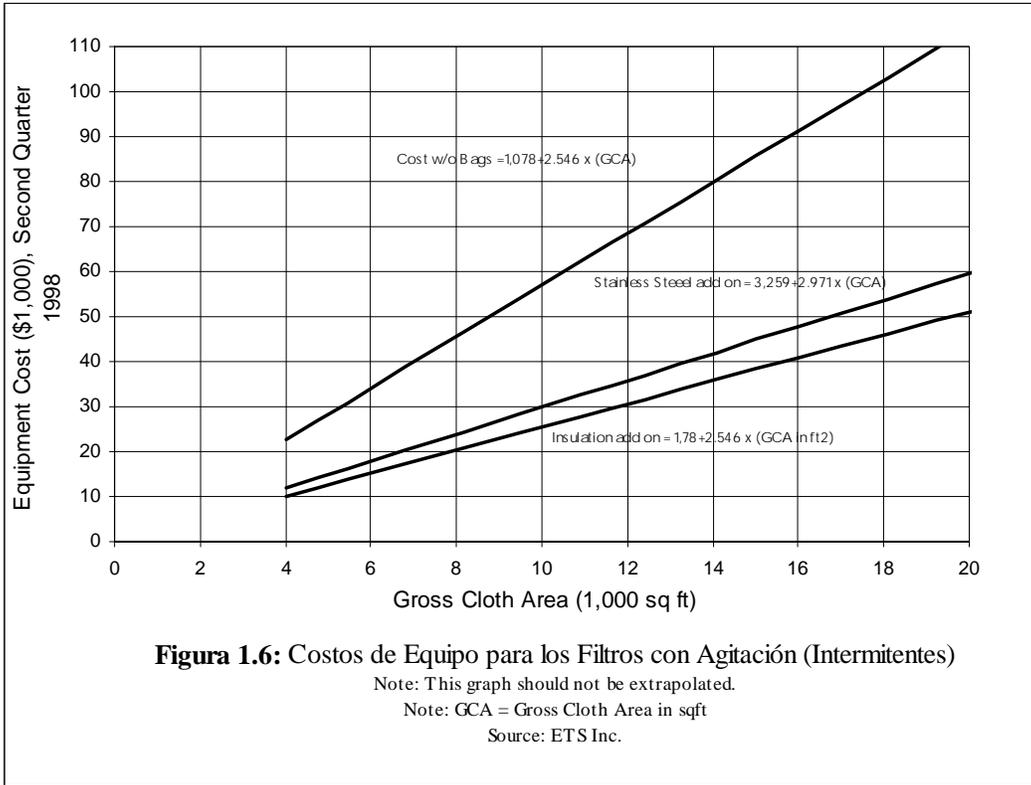
Tabla 1.9: Factores de Costo de Capital para Filtros de Tela ^a

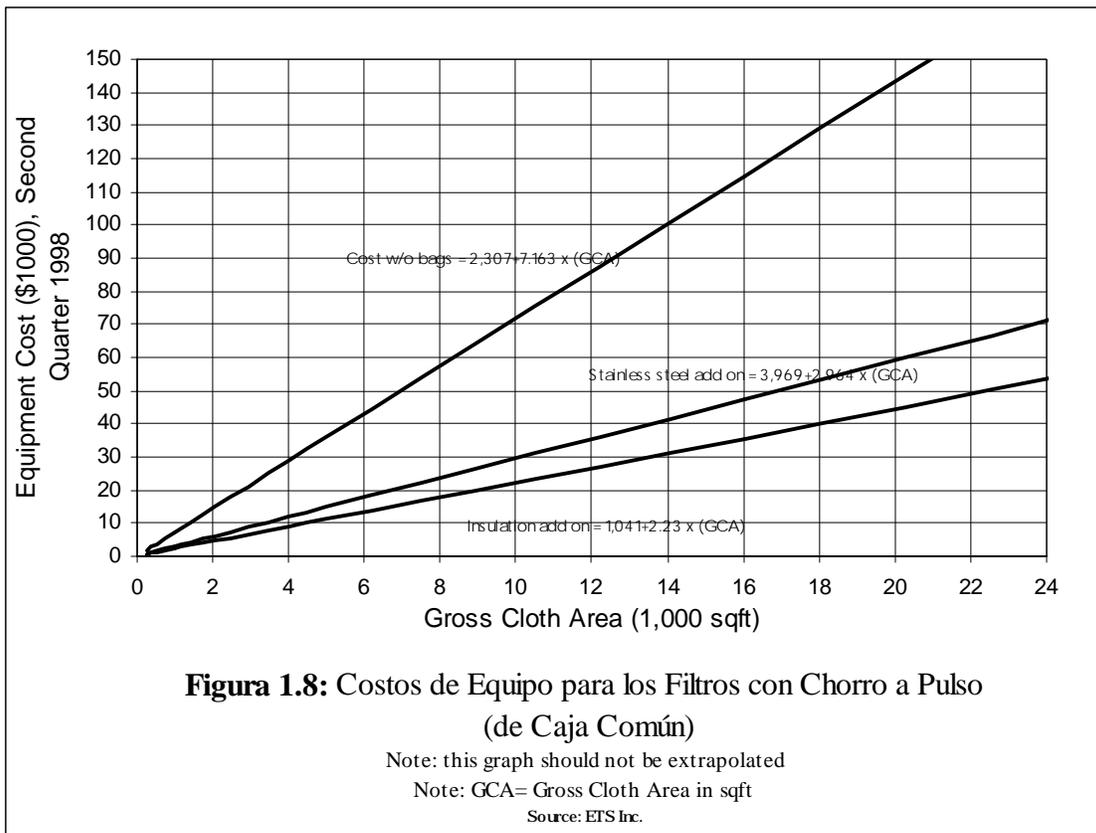
Elementos de Costo	Factor
Costos Directos - DC	
Costos de Equipo Adquirido	
Filtro de tela (costo de equipo) + bolsas + equipo auxiliar	Tal como sea estimado, A
Instrumentación	0.10 A
Impuestos sobre la venta	0.03 A
Transporte	<u>0.05 A</u>
Costo de Equipo Adquirido (PEC)	B = 1.18 A
Costos Directos de Instalación	
Cimientos y soportes	0.04 B
Manejo y erección	0.50 B
Sistema eléctrico	0.08 B
Tubería	0.01 B
Aislamiento para el sistema de conductos ^b	0.07 B
Pintura ^c	<u>0.04 B</u>
Costo Directo de Instalación	0.74 B
<i>Site preparation</i> - SP (preparación del sitio)	Tal como sea requerido, SP
Edificaciones	Tal como sea requerido, Edif.
Costo Directo Total (DC)	1.74 B + SP + Edif.
Costos Indirectos - IC (instalación)	
Ingeniería	0.10 B
Gastos de construcción y campo	0.20 B
Honorarios del constructor	0.10 B
Inicio de obra	0.01 B
Prueba de rendimiento	0.01 B
Contingencias	<u>0.03 B</u>
Costo Indirecto Total (IC)	0.45 B
Inversión de Capital Total (TCI) = DC + IC	2.19 B + SP + Edif.

a Referencia [24], revisada

b Costos del sistema de conductos y la chimenea, incluyendo los costos del aislamiento, pueden ser obtenidos del capítulo 10 del manual. Este factor de instalación se refiere únicamente a el aislamiento de las cajas de los ventiladores y otros auxiliares, excepto los sistemas de conductos y las torres de chimenea.

c El uso incrementado de recubrimientos especiales pudiera aumentar este factor hasta 0.6 B o más. [Los factores presentados en la tabla 5.8 son para las condiciones de instalación promedio. Se puede observar una variación considerable con otras circunstancias de instalación diferentes del promedio.]





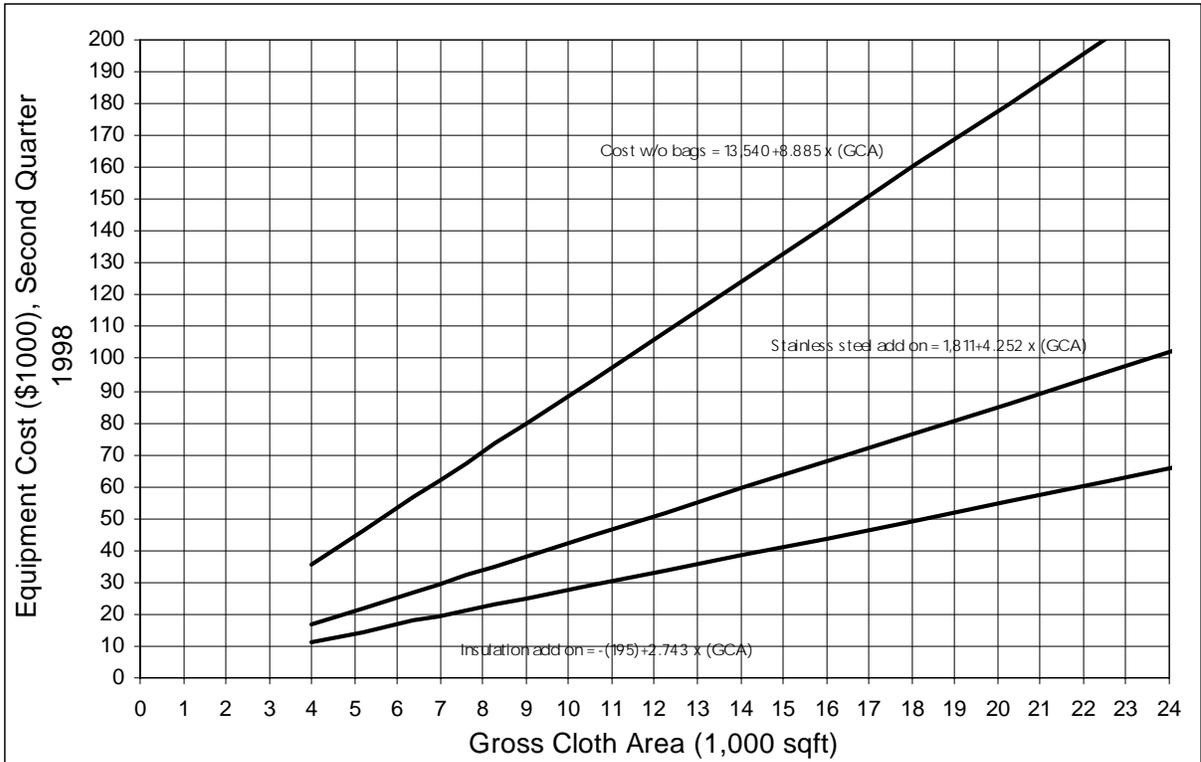


Figura 1.9: Costos de Equipo para los Filtros con Chorro a Pulso (Modulares)

Note: this chart should not be extrapolated

Note: GCA= Gross Cloth Area in sqft

Source: ETS Inc.

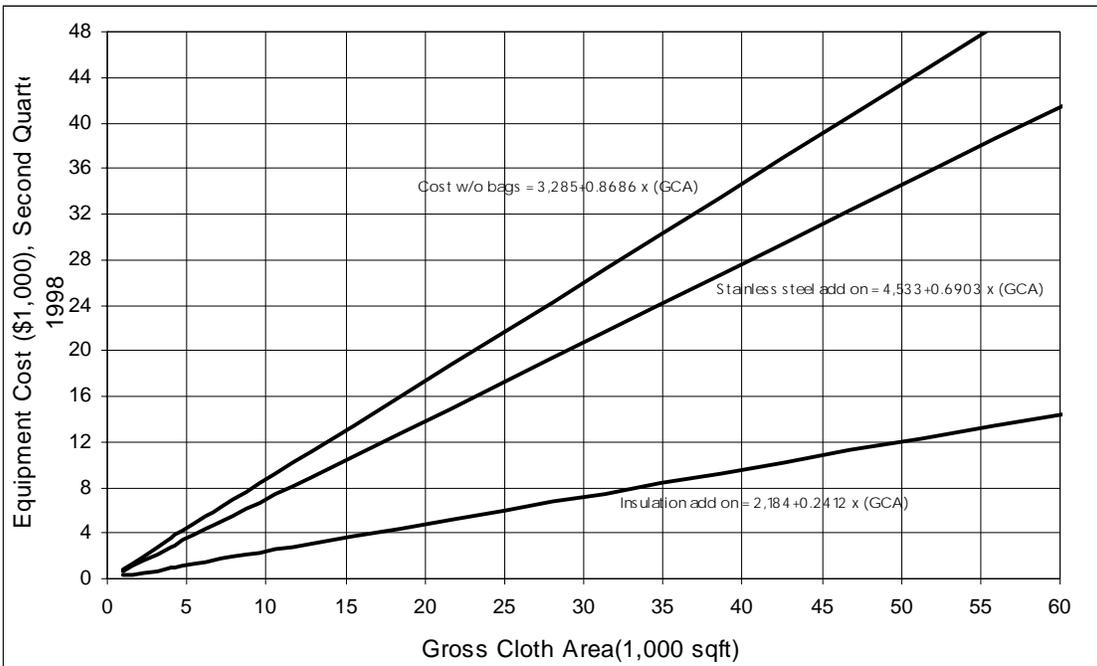


Figura 1.10: Costos de Equipo para los Filtros con Cartuchos

Note: this graph should not be extrapolated

Note: GCA= Gross Cloth Area in sqft

Source: ETS Inc.

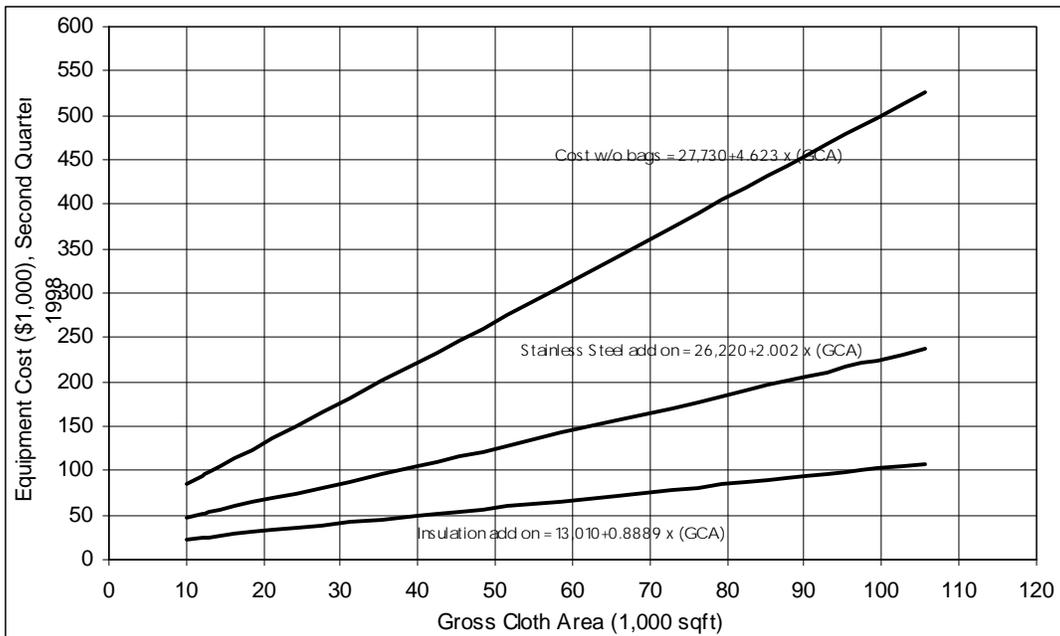


Figura 1.11: Costos de Equipo para los Filtros con Aire a la Inversa (Modulares)

Note: this graph should not be extrapolated

Note GCA= Gross Cloth Area in sqft

Source: ETS Inc.

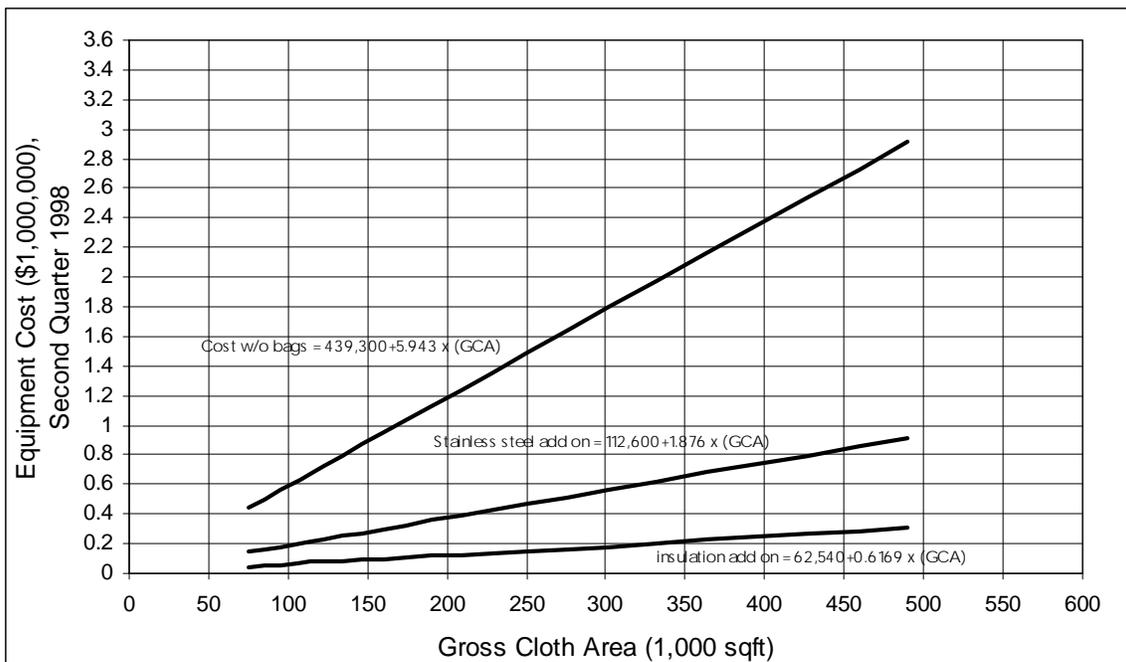


Figura 1.12: Costos de Equipo para los Filtros con Aire a la Inversa (Fabricados por pedido)

Note: this graph should not be extrapolated

Note GCA= Gross Cloth Area in sqft

Source: ETS Inc.

1.5 Estimando los Costos Anuales Totales

1.5.1 Costo Directo Anual

Los *direct annual costs* (costos directos anuales) incluyen la mano de obra de operación y de supervisión, los materiales para la operación, las bolsas de repuesto, el mantenimiento (la mano de obra y los materiales), los servicios, y el desecho del polvo. La mayoría de estos costos se discuten individualmente a continuación. Varían con la localización y el tiempo y, por esta razón, deben ser obtenidos para adecuarse al sistema específico de casa de bolsas que está siendo presupuestado. Por ejemplo, las tarifas de mano de obra en la actualidad se pueden obtener de publicaciones tales como *Monthly Labor Review*, publicado por *Bureau of Labor Statistics (BLS)*, del *U.S. Department of Labor*, el Departamento del Trabajo de los Estados Unidos, u obtenidos del sitio en la red mundial del *BLS* en: <http://stats.bls.gov>.

1.5.1.1 Mano de Obra de Operación y de Supervisión

Los requisitos típicos de la mano de obra de operación son de 2 a 4 horas por turno para un amplio rango de tamaños de filtros.[26] Cuando los filtros de tela son operados para satisfacer las regulaciones de *Maximum Achievable Control Technology - MACT* (Máxima Tecnología de Control Alcanzable), es probable que el límite superior del rango es adecuado. Las unidades pequeñas o de buen rendimiento pueden requerir menos tiempo, mientras que las unidades muy grandes o problemáticas pueden requerir más. La mano de obra supervisora se cotiza al 15 por ciento de la mano de obra de operación.

1.5.1.2 Materiales de Operación

Por lo general no se requieren materiales para la operación de las casas de bolsas. Una excepción es el uso de materiales para recubrimiento inyectados en el lado de entrada de la casa de bolsas para proporcionar una capa protectora de polvo sobre las bolsas cuando partículas pegajosas o corrosivas pudieran dañarlas. Los adsorbentes pueden ser inyectados de manera similar cuando la casa de bolsas es usada para la remoción simultánea de partículas y gas. Los costos para estos materiales deben ser incluidos en base a los dólares-por-masa (por ejemplo, en dólares por tonelada).

1.5.1.3 Mantenimiento

La mano de obra de mantenimiento varía de 1 a 2 horas por turno. [26] Tal como con la mano de obra de operación, estos valores pudieran ser reducidos o excedidos dependiendo del tamaño y la dificultad de operación de una unidad en particular. La parte superior del rango puede ser requerida para que la operación satisfaga las regulaciones *MACT*. Los costos de los materiales para mantenimiento se suponen iguales a los costos de la mano de obra de mantenimiento.[26]

1.5.1.4 Partes de Reemplazo

Las partes de reemplazo consisten de las bolsas de filtro, las que tienen una vida de operación típica de alrededor de 2 a 4 años. La fórmula siguiente se usa para calcular el costo de reemplazo de las bolsas:

$$CRC_B = (C_B + C_L) \times CRF_B \quad (1.13)$$

en donde

- CRC_B = costo de la recuperación del capital de las bolsas (\$ dólares/año)
- C_B = costo inicial de las bolsas incluyendo impuestos y transporte (\$ dólares)
- C_L = costo de mano de obra para el reemplazo de las bolsas (\$ dólares)
- CRF_B = *capital recovery factor* (factor de recuperación del capital - definido en el capítulo 2) cuyo valor es una función de la tarifa de interés anual y la vida útil de las bolsas (por ejemplo, para una tarifa de interés del 7 por ciento y una vida de 2 años, $CRF_B = 0.5531$.)

El costo de la mano de obra para el reemplazo de las bolsas (C_L) depende del número, tamaño, y tipo de bolsas; su accesibilidad; cómo se encuentran conectadas a la lámina-tubo de la casa de bolsas; y otros factores específicos al sitio que aumentan o disminuyen la cantidad de mano de obra requerida. Por ejemplo, una casa de bolsas con aire a la inversa probablemente requiera de 10 a 20 minutos-persona para cambiar una bolsa de 8 pulgadas por 24 pies que está sujeta en su sitio por medio de pinzas. Basándose en una superficie de filtrado de aproximadamente 50 pies cuadrados y una tarifa de mano de obra de \$29.15 dólares. por hora (incluyendo los gastos generales), C_L sería \$0.10 a \$0.19 dólares. por pie cuadrado de superficie de bolsa. Como muestra la tabla 5.8, para algunas bolsas (por ejemplo, las bolsas de poliéster), este rango de C_L constituiría una fracción del costo adquirido. Para los chorros de pulso el tiempo sería de 5 a 10 minutos-persona para una bolsa de 5 pulgadas por 10 pies en una casa de bolsas con acceso por la parte superior se contrarresta parcialmente recortando la cantidad de tela en la casa de bolsas, pero puede existir una mayor cantidad de las bolsas más pequeñas. Estos tiempos de reemplazo de bolsas están basados en el cambio de un mínimo de un módulo entero y en tener diseños típicos de casas de bolsas. Los tiempos serían significativamente más largos si sólo unas pocas bolsas se fueran a reemplazar o si el diseño para conectar o accesar las bolsas fuera atípico. Se toma alrededor de 4 minutos para reemplazar un cartucho en las casas de bolsas con montaje horizontal. Las casas de bolsas de estilo antiguo con montaje vertical y tubos de soplado a través de los cartuchos toma alrededor de 20 minutos por cartucho.

La metodología del *OAQPS Control Cost Manual* (el Manual para el Control de Costos de la *OAQPS*) trata a las bolsas y a la mano de obra para el reemplazo de bolsas como una inversión amortizada sobre la vida útil de las bolsas, mientras que el resto del sistema de control es amortizado sobre su vida útil, típicamente de 20 años (véase la subsección 1.4.2). Los valores de los factores para la recuperación del capital para bolsas con diversas vidas útiles pueden ser calculados a partir de la ecuación 1.3.

1.5.1.5 Electricidad

La electricidad se requiere para operar los ventiladores del sistema y el equipo de limpieza. La potencia del ventilador de gas primario puede ser calculada a partir de la ecuación 1.7, sustituyendo en esta ecuación una eficiencia combinada de ventilador y motor de 0.65 y una gravedad específica de 1.000. Obtenemos:¹

$$Potencia_{ventilador} = 0.000181 Q(\Delta P)\theta \quad (1.14)$$

en donde

$$\begin{aligned} Potencia_{ventilador} &= \text{requisito de potencia del ventilador (kW-hora por año)} \\ Q &= \text{velocidad de flujo del sistema (pies cúbicos reales por minuto)} \\ \Delta P &= \text{caída de presión del sistema (pulgadas de H}_2\text{O)} \\ \theta &= \text{tiempo de operación (horas por año)} \end{aligned}$$

La energía de limpieza para sistemas de aire a la inversa puede ser calculada (usando la ecuación 1.14) a partir del número de compartimientos a ser limpiados a la vez (generalmente uno, a veces dos), y la relación de gas-a-tela a la inversa (a partir de alrededor de una dos veces la relación de gas-a-tela hacia adelante). La caída de presión del aire a la inversa varía hasta 6 o 7 pulgadas de H₂O dependiendo de la localización del punto de levantamiento de levantamiento del ventilador (antes o después del ventilador principal del sistema).² El ventilador de aire a la inversa por lo general opera de manera continua.

El consumo típico de energía en kilovatios-hora por año para un sistema con agitación operado 8 760 horas al año puede ser calculado a partir de:[5]

$$P = 0.053 A \quad (1.15)$$

donde

$$A = \text{superficie de tela en grueso (pies cuadrados)}$$

1.5.1.6 Combustible

Los costos de combustible deben ser calculados si la casa de bolsas o el sistema de conductos asociado se calienta para prevenir la condensación. Estos costos pueden ser significantes, pero pueden ser difíciles de predecir. Para obtener información acerca de métodos para calcular los requisitos para la transferencia de calor, véase la referencia de Perry.³

1.5.1.7 Agua

El enfriamiento de los gases de proceso a temperaturas aceptables para telas en uso puede ser logrado mediante la dilución con aire, la evaporación con agua, o el intercambio de calor con equipo normal. El

⁵Típicamente, el 8 por ciento del costo inicial de las bolsas.

equipo de evaporación y el intercambio de calor normal requiere el consumo de la agua de la planta, aunque los costos generalmente no son significantes. La sección 4.4 del capítulo 4 proporciona información sobre la estimación de los costos del agua para enfriamiento.

1.5.1.8 Aire Comprimido

Los filtros de chorro a pulso usan aire comprimido a presiones desde alrededor de 60 a 100 libras por pulgada cuadrada en válvula, *psig*. El consumo típico es de alrededor de 2 pies cúbicos estándares por minuto por 1 000 pies cúbicos por minuto de gas filtrado. Por ejemplo, una unidad que filtra 20 000 pies cúbicos por minuto de gas usa alrededor de 40 pies cúbicos estándar por cada minuto que el filtro es operado. Para cada pulso, los filtros de cartucho con telas no tejidas usan 10 pies cúbicos estándares por minuto por 1 000 pies cuadrados o 14 pies cúbicos estándares por minuto por 1 000 pies cuadrados a una presión de pulso de 60 *psig* o 90 *psig*, respectivamente, en un diseño del fabricante.⁴ Al usar medios de papel, las cantidades de aire son de 1.7 y 2.2 pies cúbicos estándares por minuto por 1 000 pies cuadrados a las presiones respectivas. La frecuencia de los pulsos varía dentro de un rango de alrededor de 5 a 15 minutos. Un costo típico para el aire comprimido es de \$0.25 dólares. por 1 000 pies cúbicos estándares en dólares de 1998.

1.5.1.9 Desecho del Polvo

Si el polvo recolectado no puede ser recolectado o vendido, debe ser desechado en un relleno sanitario o en alguna otra manera. Los costos de desecho son específicos al sitio, pero típicamente van de \$35 to \$55 dólares por tonelada en basureros municipales en el estado de Pennsylvania, Estados Unidos, excluyendo la transportación (véase la sección 2.4 del capítulo 2). Pueden estar disponibles costos menores para operaciones industriales con contratos de desecho a largo plazo. El desecho de los residuos peligrosos pueden costar \$150 dólares por tonelada o más.

1.5.2 Costo Indirecto Anual

Los costos indirectos anuales incluyen la recuperación del capital, los impuestos de la propiedad, la aseguranza, los costos administrativos («G&A»), y los gastos generales. El costo de la recuperación del capital se basa en la vida del equipo y la tarifa de interés anual empleada. (Véase el capítulo 2 para una discusión del costo de la recuperación del capital y las variables que la determinan). Para los filtros de tela, la vida del sistema varía de 5 a 40 años, siendo típicamente de 20 años.[26] Sin embargo, esto no se aplica a las bolsas, las cuales por lo general tienen vidas mucho más cortas. (Véase la sección 1.5.1.) Por lo tanto, uno debe basar las estimaciones del costo de recuperación del capital del sistema en el costo de capital instalado, menos el costo de reemplazar las bolsas (o sea, el costo adquirido de las bolsas más el costo de la mano de obra necesaria para reponerlas). Algebraicamente:

$$CRC_s = [TCI - C_B - C_L]CRF_s \quad (1.16)$$

en donde

- CRC_s = costo de la recuperación del capital para el sistema de filtros de tela (\$ dólares por año).
 TCI = inversión de capital total (\$ dólares)
 C_B = costo inicial de las bolsas incluyendo los impuestos y la transportación (\$ dólares)⁵
 C_L = costo de la mano de obra para el reemplazo de las bolsas (\$ dólares)
 CRF_s = factor de recuperación del capital para un sistema de filtros de tela (definido en el capítulo 2).

Por ejemplo, para una vida del sistema de 20 años y una tarifa de interés anual del 7 por ciento, el CRF_s sería de 0.09439.

El factor sugerido a usar para los impuestos de propiedad, la aseguranza, y los cargos administrativos es del 4 por ciento de la TCI (véase el capítulo 2). Finalmente, los gastos generales se calculan como el 60 por ciento de los materiales de mano de obra (de operación, supervisora, y de mantenimiento) y de mantenimiento.

1.5.3 Créditos por Recuperación

Para los procesos que pueden usar de nuevo el polvo recolectado en la casa de bolsas o que pueden vender el polvo (por ejemplo, la ceniza flotante que se vende como un extendedor para las mezclas para pavimentar), se debe tomar un *recovery credit* - RC (crédito por recuperación). Tal como se usó en la ecuación 5.17, este crédito (RC) debe restarse del *total annual cost* - TAC (costo anual total).

1.5.4 Costo Total Anual

El costo anual de ser propietario y operar un sistema de filtros de tela es la suma de los componentes enumerados en las secciones 1.4.1 a 1.5.3, o sea:

$$CRC_s = [TCI - C_B - C_L]CRF_s \quad (1.17)$$

donde

- TAC = costo anual total (\$ dólares)
 DC = costo directo anual (\$ dólares)
 IC = costo indirecto anual (\$ dólares)
 RC = créditos de recuperación (anual) (\$ dólares)

1.6 Problema de Ejemplo

Supóngase que se requiere una casa de bolsas opera controlar las emisiones de ceniza flotante provenientes de una caldera alimentada por carbón. La corriente de gas es de 50 000 pies cúbicos reales por minuto a 325 °F y tiene un cargado de ceniza de 4 gramos por pie cúbico real. El análisis de la ceniza muestra un diámetro de masa medio de 7 micras. Supóngase que la casa de bolsas opera 8 640 horas al año (360 días).

La relación de “*gas-to-cloth*” - G/C (gas-a-tela) puede ser tomada de la tabla 1.1 como 1.5, para las telas tejidas en casas de bolsas con agitación o con aire a la inversa; o 5, para felpas usadas en las casas de bolsas de chorro pulsante. Si se usará un método por factores para estimar G/T , la tabla 1.3 para los agitadores generaría los siguientes valores: $A = 2$, $B = 0.9$, y $C = 1.0$. La relación de gas-a-tela sería de:

$$2 \times 0.9 \times 1.0 = 1.8.$$

Este valor también puede ser usado para la limpieza por aire a la inversa. Para una unidad de chorro pulsante, la tabla 1.4 da un valor de 9.0 para el factor “A” y 0.8 para el factor “B”. La ecuación 1.11 se vuelve:

$$\begin{aligned} V &= 2.878 \times 9.0 \times 0.8(275)^{-0.2335} (4)^{-0.06021} (0.7471 + 0.0853 \ln 7) \\ &= 4.69 \end{aligned}$$

Debido a que este valor es tanto más grande que la relación G/C en agitadores/aire a la inversa, concluimos que la casa de bolsas de chorro pulsante sería el diseño menos costoso. Esta conclusión se basa en la inferencia de que una relación G/C mucho más grande generaría un capital más bajo y, a su vez, costos anuales más bajos. Sin embargo, para hacer una selección más rigurosa, necesitaríamos calcular y comparar los costos anuales totales de todos los tres diseños de casas de bolsas (suponiendo que todos los tres fueran aceptables técnicamente). Se invita al lector a que haga esta comparación. Se puede encontrar una discusión adicional de los efectos de los aumentos de la relación G/C , y sus aumentos en la caída de presión que los acompañan, sobre los costos anuales totales en la referencia [30]⁵. Supóngase que el uso de la limpieza en línea en una estructura de caja común y, debido a la alta temperatura de operación, el uso de bolsas de filtro de vidrio (véase la tabla 1.6).⁶ A una relación de gas-a-tela de 4.69, la tela requerida es ⁷:

$$50,000 \text{ pies cúbicos reales por minuto} / 4.69 \text{ pies por minuto} = 10,661 \text{ pies cuadrados.}$$

⁵ De manera adicional, COST-AIR - la hoja de trabajo para el control de costos para filtros de tela calcula los costos de capital y anuales para todos los tres diseños. Las hojas COST-AIR se pueden descargar a un disco en: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#cccinfo>.

⁶ Tal como se muestra en la tabla 1.6, otros materiales de bolsa (*e.g.*, *Nomex*) también podrían tolerar esta temperatura de operación. Pero la fibra de vidrio es la menos costosa en base al costo de adquisición. Para ambientes pesados, una bolsa más costosa pero más durable pudiera costar menos en base al costo anual total.

⁷ Esta es el área total (en grueso) de bolsas requerida. No se ha aplicado ningún factor de ajuste aquí, porque ésta es una unidad de chorro a pulso con una caja envoltura común que es limpiada continuamente durante su operación. De esta manera, no se necesita un compartimiento de bolsas adicional, y las áreas en grueso total y netas son iguales.

A partir de la figura 1.8, el costo de la casa de bolsas (con diseño de “caja común”) es:

$$Costo = 2,307 + 7.163(10,661) = \$78,672$$

El aislamiento es requerido. El costo de adición del aislamiento a partir de la figura 1.4 es:

$$Costo = 1,041 + 2.23(10,661) = \$24,815$$

A partir de la tabla 1.8, los costos de las bolsas son de \$1.69 dólares. por pie cuadrado para bolsas de 5-1/8 pulgadas de diámetro removidas por la parte inferior. El costo total de las bolsas es:

$$10,661 \text{ pies cuadrados} \times \$1.69 \text{ dólares por pie cuadrado} = \$18,017 \text{ dólares.}$$

Para jaulas de 10 pies de longitud:

$$\text{area de tela por jaula} = \frac{\left(5 \frac{1}{8} \text{ in}\right)}{\left(12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}\right)} \times \pi \times 10 \text{ ft} = 13.42 \text{ ft}^2$$

$$\begin{aligned} \text{el numero de jaulas} &= \frac{(10,661 \text{ ft}^2)}{(13.42 \text{ ft}^2)} \\ &= 795 \text{ jaulas (redondeado al proximo entero)} \end{aligned}$$

De la tabla 1.7, el costo de las jaulas individuales es:

$$2.5212 \times 13.42 \text{ pie cuadrado (0.5686)} = \$11,037 \text{ dólares.}$$

El costo total de las jaulas es:

$$795 \text{ jaulas} \times \$11,037 \text{ dólares/ jaula} = \$8,774.$$

Suponiendo que los siguientes costos auxiliares han sido estimados a partir de los datos en otras partes del *Manual*:

Sistema de Conductos	\$19,000 dólares.
Ventilador	\$19,000
Motor	\$12,000
Encendedor	\$4,700
Amortiguadores	\$9,800
Compresor	\$8,000
Transportador de Tornillo	\$5,000
Chimenea	<u>\$12,000</u>
Total	\$89,500

Los costos directos para el sistema de filtro de tela, basándose en los factores en la tabla 1.9, se presentan en la tabla 1.10. (Una vez más, suponemos que los costos de la preparación del sitio y de los edificios es insignificante.) La inversión de capital total es de \$569,000 dólares. La tabla 1.11 presenta los costos anuales directos e indirectos, tal como se calculan con los factores presentados en la sección 1.51. Para la mano de obra de reemplazo de bolsas, supónganse 10 minutos por bolsa para cada una de las 795 bolsas. A una tarifa de obra de mantenimiento de \$29.65 dólares (incluyendo los gastos generales), el costo por mano de obra es de \$3 943 dólares por 133 horas. Se supone que las bolsas y jaulas serán repuestas cada 2 años. El costo del reemplazo se calcula usando la ecuación 1.13.

La caída de presión (para los costos de energía) puede ser calculada a partir de las ecuaciones 1.8 y 1.9, con los siguientes valores supuestos:

$$K_2 = 15 \frac{\frac{in \ H_2O}{1(ft/min)}}{\frac{lb}{ft^2}}$$

$$P_j = 100 \text{ } \textit{psig}$$

$$\text{intervalo de limpieza} = 10 \textit{ } \textit{min}$$

Además suponemos que una relación G/C de 4.69 pies por minuto es una buena estimación de la velocidad superficial promedio sobre la duración del ciclo de filtrado.

$$\begin{aligned}
 W_o &= C_i V \theta \\
 &= 4 \frac{gr}{ft^3} \times \frac{1lb}{7,000 gr} \times 4.69 \frac{ft}{min} \times 10min \\
 &= 0.0268 \frac{lb}{ft^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= 6.08 \times 4.69 \frac{ft}{min} \times (100 \text{ psig})^{-0.65} \\
 &+ 15 \frac{\frac{inH_2O}{ft/min}}{lb/ft^2} \times 0.0268 \frac{lb}{ft^2} \times 4.69 \frac{ft}{min} \\
 &= 3.32 \text{ plg } H_2O \text{ a traves de la tela (totalmente cargada).}
 \end{aligned}$$

Se supuso que la estructura de la casa de bolsas y el sistema de conductos contribuyen 3 y 4 pulgadas de H₂O adicionales, respectivamente. La caída de presión en total es, por lo tanto, de 10.3 pulgadas.

El costo anual es \$474,000 dólares., 39 por ciento del cual es para el desecho de la ceniza. Si se pudiera encontrar un mercado para la ceniza flotante, el costo anual total descendería a \$274,000 (\$474,000 – \$185,000 – \$14,800) dólares., o el 58 por ciento del costo cuando no existe ningún mercado. Claramente, el costo anual total es extremadamente sensitivo al valor seleccionado para el costo del desecho del polvo en este caso. En este caso y en otros similares, este valor debe ser seleccionado con cuidado.

Tabla 1.10 Costos de Capital de un Sistema de Filtro de Tela -
Problema de Ejemplo (\$ del 2º trimestre de 1998)

Artículo de Costo	Costo
Costos Directos - DC	
Costos del Equipo Adquirido	
Filtro de Tela (con aislamiento)(costo de equipo)	\$103,847
Bolsas y Jaulas	26,791
Equipo Auxiliar	<u>89,500</u>
Suma = A	\$220,138
Instrumentación, 0.1A	22,014
Impuesto sobre la Venta, 0.03A	6,604
Transportación, 0.05A	<u>11,007</u>
Costos del equipo adquirido, B	\$259,763
Costos de la Instalación Directa	
Cimientos y Soportes, 0.04B	10,391
Manejo y erección, 0.50B	129,882
Sistema Eléctrico, 0.08B	20,781
Tubería, 0.01B	2,598
Aislamiento para el Sistema de Conductos, 0.07B	18,183
Pintura, 0.04B	<u>10,391</u>
Costo de la instalación directa	192,226
Preparación del Sitio	-
Instalaciones y Edificios	-
Costo Directo Total - DC	\$451,989
Costos Indirectos (instalación)	
Ingeniería, 0.10B	25,976
Gastos de Construcción y de Campo, 0.20B	51,953
Honorarios del Contratista, 0.10B	25,976
Inicio de la Obra, 0.01B	2,598
Prueba de Rendimiento, 0.01B	2,598
Contingencias, 0.03B	<u>7,793</u>
Costo Indirecto Total - IC	\$116,894
Inversión de Capital Total (redondeada) - TCI	\$569,000

Tabla 1.11 Costos Anuales de un Sistema de Filtro de Tela -
Problema de Ejemplo (\$ del 2º trimestre de 1998)

Componente del Costo	Cálculos	Costo
Costos Anuales Directos - DC		
Mano de Obra de Operación Operador	$\frac{2 \text{ h}}{\text{turnos}} \times \frac{3 \text{ turnos}}{\text{día}} \times \frac{360 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{\$17.26}{\text{h}}$	\$37,282
Supervisor	15% del operador = 0.15 x 37,282	5,592
Materiales de Operación		—
Mantenimiento Mano de Obra	$\frac{1 \text{ h}}{\text{turno}} \times 3 \frac{\text{turnos}}{\text{día}} \times \frac{360 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{\$17.74}{\text{h}}$	19,159
Material	100% de la mano de obra de mantenimiento	
Partes de Repuesto, Bolsas	$[3,943 + (26,791 \times 1.08^8)] \times 0.5531$	18,184
Servicios Electricidad	$0.000181 \times 50,000 \text{ acfm}^c \times 10.3 \text{ pulg. H}_2\text{O} \times \frac{8,640 \text{ h}}{\text{año}} \times \frac{\$0.0671}{\text{kWh}}$	54,04
Aire Comprimido (secado y filtrado)	$\frac{2 \text{ scfm}^c}{1,000 \text{ acfm}} \times 50,000 \text{ acfm} \times \frac{\$0.25}{1,000 \text{ scf}^c} \times \frac{60 \text{ minuto}}{\text{h}} \times \frac{8,640 \text{ h}}{\text{año}}$	
Desecho de Residuos	a \$25/tonelada en el sitio por una eficiencia de recolección esencialmente del 100%: eficiencia: $\frac{4 \text{ granos}}{\text{pie}^3} \times \frac{1 \text{ libras}}{7,000 \text{ granos}} \times 50,000 \text{ pie}^3 \times \frac{60 \text{ minutos}}{\text{h}} \times \frac{8,640 \text{ h}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ tonelada}}{2,000 \text{ libras}} \times \frac{\$25}{\text{tonelada}}$	185,134
DC Total	(redondeado)	319,5
Indirect Annual Costs, IC		
Gastos Generales	60% de la suma de mano de obra de oper., supv., y mant. y material de mant. = 0.6(37,282+5,592+19,159+19,159)	4,8715e+22
Cargos Administrativos	2% de la Inversión de Capital Total = 0.02 (\$568,883)	
Impuesto sobre la Propiedad	1% de la Inversión de Capital Total = 0.01 (\$568,883)	
Aseguranza	1% de la Inversión de Capital Total = 0.01 (\$568,883)	
Recuperación del Capital ^b	0.09439 (568,883 - 3,943 - 28,934 x 1.08)	
IC Totales		
(redond.)		
Costo Anual Total - TAC	(redondeado)	\$446,000

^aEl factor de 1.08 factor es para los impuestos por la venta y el embalaje.

^bEl factor de costo de la recuperación del capital, *CRF*, es una función del filtro de tela o vida del equipo y el costo de oportunidad del capital (o sea, la tasa de interés). Por ejemplo, para una vida del equipo de 20 años y una tasa de interés del 7%, el *CRF* = 0.09439.

^c*scfm* = pies cúbicos estándares por minuto; *acfm* = pies cúbicos reales por minuto; *scf* = pies cúbicos estándares

1.7 Reconocimientos

Reconocemos con agradecimiento a las siguientes compañías por contribuir información para esta sección:

- Aget Manufacturing Company (Adrian, Michigan)
- BACT Engineering, Inc. (Arlington Heights, Illinois)
- The BHA Group (Kansas City, Missouri)
- Dustex Corporation (Charlotte, North Carolina)
- EV Air Systems, Inc. (Charlotte, North Carolina)
- Fuller Company (Bethlehem, Pennsylvania)
- W. L. Gore and Associates, Inc. (Elkton, Maryland)
- Griffin Environmental Company, Inc. (Syracuse, Nueva York)
- Hosokawa Mikropul (Summit, New Jersey)
- W. W. Sly Manufacturing Company (Cleveland, Ohio)
- Zurn Industries, Inc. (Birmingham, Alabama)

Los autores reconocen agradecidamente el trabajo de Andrew S. Viner (anteriormente con RTI) y de Richard E. Jenkins (anteriormente con EPA), quienes contribuyeron a las ediciones previas de este capítulo, el cual está siendo revisado para reflejar los cambios en la tecnología y en los costos.

Referencias

- [1] Van Osdell, D. W., M. B. Ranade, G. P. Greiner, y D. F. Furlong, *Electrostatic Augmentation of Fabric Filtration: Pulse-jet Pilot Unit Experience*, Noviembre de 1982 (EPA-600/7-82-062).
- [2] Viner, A. S., G. P. Greiner, D. F. Furlong, y R. G. Hurst, *Pilot-Scale Evaluation of Top-Inlet and Advanced Electrostatic Filtration*, Octubre de 1986 (EPA-600/7-86-042).
- [3] Donovan, R. P., *Fabric Filtration For Combustion Sources*, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1985.
- [4] Turner, J. H., "Bag Filtration," en *Handbook of Multiphase Systems*, editado por G. Hetsroni, Hemisphere, Nueva York, 1982.
- [5] Turner, J. H., y J. D. McKenna, "Control of Particles by Filters," en *Handbook of Air Pollution Technology*, editado por S. Calvert y E. Englund, John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.
- [6] Palazzo, L., J. Woolston, y P. Ristevski, *Retrofitting Shaker Baghouses to Cartridge Pulse Jet Technology in The User and Fabric Filtration Equipment - VII*, Proceedings, Toronto, Septiembre 12 - 14, 1994, Air and Waste Management Association, Pittsburgh.
- [7] Klimczak, William, comu e innformación de la publicación P6100 de Dustex, *Principles of Pulse Jet Filter Performance*.
- [8] Broadway, R. M. y R. W. Cass, *Fractional Efficiency of a Utility Boiler Baghouse: Nucla Generating Plant*, Agosto de 1975 (EPA-600/2-75-013-a [NITS PB 246 641]).
- [9] Cass, R. W. y R. M. Bradway, *Fractional Efficiency of a Utility Boiler Baghouse: Sunbury Steam Electric Station*, Marzo de 1976 (EPA-600/2-76-077a [NTIS PB253 943]).
- [10] Penny, C. W., *Electrostatic Effects in Fabric Filtration: Volume I. Fields, Fabrics, and Particles (Annotated Data)*, Septiembre de 1978 (EPA-600/7-78-142A[NTIS PB 288576]).
- [11] Frederick, E. R., *Electrostatic Effects in Fabric Filtration: Volume II. Triboelectric Measurements and Bag Performance*, Julio de 1978 (EPA600/7-78.1A2B[NTIS PB 287207]).
- [12] Frederick, E. R., *Electrical Effects in Particulate Matter Processes*, Filter Media Specification, Pittsburgh, 1987.
- [13] Dennis, R., y H. A. Klemm, "Modeling Concepts for Pulse Jet Filtration." *JAPCA*, 30(1), Enero de 1980.

- [14] Leith, D. y M. J. Ellenbecker, "Theory for Pressure Drop in a Pulse-Jet Cleaned Fabric Filter." *Atm. Environment*, 14, 1980, pp. 845-852.
- [15] Koehler, J. L. y D. Leith, "Model Calibration for Pressure Drop in a Pulse-Jet Cleaned Fabric Filter," *Atm. Environment*, 17(10), 1983, pp. 1909-1913.
- [16] Viner, A. S., y B. R. Locke, *Cost and Performance Models for Electrostatically Stimulated Fabric Filters*, Abril 1984 (EPA 600/8-84-016).
- [17] Northrop Services, Inc. *Fabric Filter Workshop Reference Materials, 1977 Workshop*, Air Pollution Training Institute.
- [18] Vatavuk, W. M., and R. B. Neveril, "Estimating Costs of Air-Pollution Control Systems, Part XI: Estimate the Size and Cost of Baghouses," *Chemical Engineering*, Marzo 22, 1982, pp. 153-158.
- [19] Frey, R. F., and T. V. Reinauer, "New Filter Rate Guide," *Air Engineering*, Abril de 1964.
- [20] Owen, M. K. and A. S. Viner, *Microcomputer Programs for Particulate Control*, Junio 1985 (EPA-600/8-85-025a).
- [21] Dennis, R. and H. A. Klemm, *Fabric Filter Model Change: Vol. I, Detailed Technical Report*, Febrero de 1979 (EPA-600/7-79-043a) [NTIS PB 293551]).
- [22] Viner, A. S., *et al.*, "Comparison of Baghouse Test Results with the GCA/EPA Design Model," *JAPCA*, 34(8), Agosto de 1984.
- [23] ETS, Inc., Roanoke, VA.
- [24] Vatavuk, W. M., y R. B. Neveril, "Estimating Costs of Air-Pollution Control Systems, Part II: Factors for Estimating Capital and Operating Costs," *Chemical Engineering*, Noviembre 3, 1980, pp. 157-162.
- [25] Perry, Robert H., *et al.*, *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Cuarta Edición), McGraw-Hill, Nueva York, 1963, p. 6-20.
- [26] Comunicación personal de Gary Greiner, ETS, Inc., a Jim Turner, Research Triangle Institute, Octubre 24, 1986.
- [27] Perry, Robert H., *et al.*, *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Sexta Edición), McGraw-Hill, Nueva York, 1984.
- [28] Hosokawa Mikropul Environmental System, *Cartridge Dust Collectors*, boletín del producto, sin fecha (alrededor de 1997).

TECHNICAL REPORT DATA

(Please read Instructions on reverse before completing)

1. REPORT NO. 452/B-02-002	2.	3. RECIPIENT'S ACCESSION NO.
4. TITLE AND SUBTITLE Manual de Costos de Control de Contaminacion del Aire de la EPA	5. REPORT DATE July, 2002	
	6. PERFORMING ORGANIZATION CODE	
7. AUTHOR(S) Daniel Charles Mussatti	8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO.	
9. PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Standards and Strategies Division Innovative Strategies and Economics Group Research Triangle Park, NC 27711	10. PROGRAM ELEMENT NO.	
	11. CONTRACT/GRANT NO.	
12. SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS Director Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711	13. TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED Final	
	14. SPONSORING AGENCY CODE EPA/200/04	
15. SUPPLEMENTARY NOTES Updates and revises EPA 453/b-96-001, OAQPS Control Cost Manual, fifth edition (in English only)		
16. ABSTRACT In Spanish, this document provides a detailed methodology for the proper sizing and costing of numerous air pollution control devices for planning and permitting purposes. Includes costing for volatile organic compounds (VOCs); particulate matter (PM); oxides of nitrogen (NOx); SO₂, SO₃, and other acid gases; and hazardous air pollutants (HAPs).		
17. KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS		
a. DESCRIPTORS	b. IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS	c. COSATI Field/Group
Economics Cost Engineering cost Sizing Estimation Design	Air Pollution control Incinerators Absorbers Adsorbers Filters Condensers Electrostatic Precipitators Scrubbers	
18. DISTRIBUTION STATEMENT Release Unlimited	19. SECURITY CLASS (<i>Report</i>) Unclassified	21. NO. OF PAGES 1,400
	20. SECURITY CLASS (<i>Page</i>) Unclassified	22. PRICE