

# Modelado y simulación para el control de la presión diferencial en una casa de bolsas usada en la producción de mezcla asfáltica caliente.

Yoqsan Berumen\*, Sergio Valle\*,  
Rafael Lucho\*, Alfredo Serrano\*, Cristhian Rodríguez\*\*, Juan Castro\*\*

\* Maestría en sistemas ambientales, Instituto Tecnológico de Durango, Felipe Pescador 1803 Ote, Nueva Vizcaya, Durango, Durango, 34080, MÉXICO. (Tel: 618-818-6936; e-mail: [svc@alumni.net](mailto:svc@alumni.net))

\*\*Departamento de automatización, TRIASO S. A. de C. V., Blvd. Domingo Arrieta 907 Col. Juan de la Barrera, Durango, Durango, 34180, México (e-mail: [cristhian@triaso.com.mx](mailto:cristhian@triaso.com.mx))

**Abstract:** This paper presents the mathematical modeling of a baghouse filter. Physical principles were used in this modeling. The model parameters were taken from technical manual and real data from the baghouse manufacturer. The model obtained was used to create a *Matlab*<sup>®</sup> based application that can simulate the response of the PID control system.

Keywords: Mathematical model, PID control, Matlab, Pressure control, AppDesigner.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para determinar la respuesta dinámica de un sistema real, es necesario tener en cuenta los principios físicos que lo rigen. En este trabajo, se realiza un proceso de modelado, para obtener la descripción del proceso a partir de las leyes de la física, basadas en los conceptos de conservación de masa. El sistema sobre el que se basa el estudio es una casa de bolsas empleada en la producción de mezcla asfáltica en caliente.

Una casa de bolsas (Fig. 1) es un dispositivo de control de contaminación del aire, normalmente usando un conjunto de largos, y cilíndricos, filtros fabricados para remover materia particulada de una corriente de gases de escape. Normalmente cuentan con un ventilador cerca de la chimenea que ayuda a extraer los gases. Conforme los gases de escape pasan a través de los filtros, las partículas son separadas de la corriente de aire, pegándose en las paredes del filtro. Las partículas atrapadas por los filtros son removidas periódicamente por varios métodos, como golpeando las bolsas, mandando un flujo de aire a través de las bolsas, o agitándolas. Las partículas caen en un recolector, el cual es descargado periódicamente (Blanchfield, 2012).

La principal razón para tener un adecuado control en este tipo de sistemas es que un mal manejo puede traer problemas ambientales y de salud humana. Las casas de bolsas ayudan a retener partículas desde 10 $\mu$ m hasta 1 $\mu$ m con un adecuado funcionamiento, alcanzando eficiencias de hasta 99.99% (Swanson, 2016). Este tipo de sistemas son muy utilizados en la industria cementera y del asfalto, ayudando a retener partículas derivadas del procesamiento de piedra.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta presentada sobre la que se realiza el estudio es una casa de bolsas diseñada y fabricada por la empresa TRIASO S.A. de C. V., equipada con 380 bolsas (filtros) y empleada en la producción de mezcla asfáltica caliente, que se encarga de limpiar los gases de escape mediante la retención de la materia particulada. La Figura 2 muestra un diagrama completo de la maquina productora de asfalto producida por esta empresa.

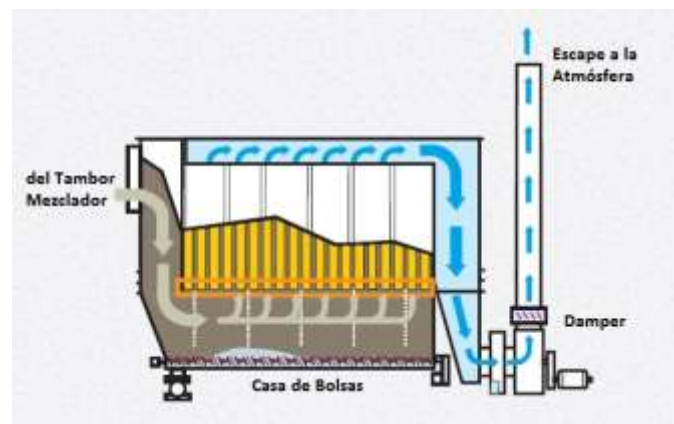


Figura 1. Diagrama de una casa de bolsas (Swanson, 2016).

El gas con partículas pasa a través de los filtros, donde quedan retenidas y van formando una capa alrededor que se conoce como tarta de polvo. Conforme pasa el tiempo, esta capa va engrosando y la eficiencia para la retención de partículas va aumentando, al igual que la caída de presión dentro de la casa de bolsas. Por esto es necesario efectuar una limpieza periódica de los filtros para evitar disminuciones en el caudal y evitar que los filtros colapsen por la presión (Echeverri, 2008).

El caso de estudio cuenta con un sistema de limpieza de aire inverso con dos secciones. En este tipo de casa de bolsas, el flujo de gas hacia los filtros es interrumpido en la sección que está siendo limpiada y un flujo a contracorriente del exterior es dirigido a través de los filtros. Estos se inflan y el exceso de partículas cae a un colector. La frecuencia de limpieza depende directamente de los niveles de la presión diferencial medida dentro del sistema (Hung & Cora, 2002).

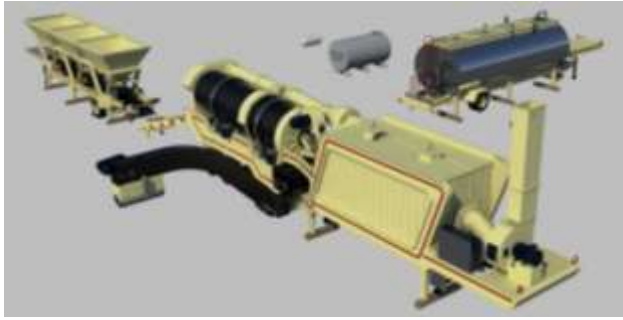


Figura 2. Máquina productora de asfalto producida por TRIASO S. A. de C. V.

Una de las variables más importantes a controlar dentro de la casa de bolsas es la presión diferencial, ya que es un indicador no sólo del correcto funcionamiento de los filtros y de una adecuada formación de la capa de partículas alrededor del filtro, sino que también es una medida de la energía requerida para mover los gases a través del sistema, lo que determina el costo del capital y requerimientos energéticos de los ventiladores. Presiones mayores a 5 pulgadas de H<sub>2</sub>O indican una mala limpieza de los filtros, y representan un mayor gasto energético para mover; y presiones menores de 2 pulgadas de H<sub>2</sub>O pueden indicar la posibilidad de un filtro dañado. Este rango de presiones se considera el adecuado para una casa de bolsas usada en producción de asfalto caliente (Swanson, 2016; Miller, 2015).

La temperatura también es una variable muy importante, pues debe tenerse en cuenta que no debe superar los límites establecidos por las características de los filtros, de lo contrario puede ocurrir un incendio dentro del sistema. Sin embargo no hay forma de controlar esta variable dentro de la casa de bolsas, depende directamente de otro sistema (Swanson, 2016).

### 3. MODELADO DE LA PLANTA

Las variaciones en la presión respecto al tiempo son causadas en mayor parte por la acumulación de partículas alrededor de los filtros. Un filtro limpio puede generar una caída de presión aproximada de 0.5 pulgadas de H<sub>2</sub>O, dependiendo del material del que esté construido. Conforme transcurre el tiempo esta presión se incrementa de forma lineal debido a la acumulación de materia particulada, y una vez alcanzadas 2 o 3 pulgadas de H<sub>2</sub>O se considera que la capa de partículas se ha formado adecuadamente y el sistema se encuentra en su mejor eficiencia de remoción (Miller, 2015).

En general, la caída de presión total a través de la casa de bolsas es una función de la resistencia que presentan los filtros, la caída de presión debida a la capa de partículas formada y a la caída de presión generada por el sistema, lo cual puede ser expresado mediante la Ec. 1 (Echeverri, 2008):

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_f + \Delta P_c \quad (1)$$

Donde:

$\Delta P$  = Caída de presión total, en mm de H<sub>2</sub>O o in de H<sub>2</sub>O,

$\Delta P_s$  = Caída de presión a través del compartimiento, en mm de H<sub>2</sub>O o in de H<sub>2</sub>O,

$\Delta P_f$  = Caída de presión a través de los filtros, en mm de H<sub>2</sub>O o in de H<sub>2</sub>O y

$\Delta P_c$  = Caída de presión a través de la capa de partículas, en mm de H<sub>2</sub>O o in de H<sub>2</sub>O.

La caída de presión que se presenta a través del compartimiento generalmente es baja y puede ser despreciada. Cuando el sistema se arranca y antes de empezar a realizar la filtración, la caída de presión del compartimiento se determina junto con la caída de presión a través de los filtros, por lo que se considera que este término está contemplado en la caída de presión a través de los filtros. En la práctica,  $\Delta P_f$  es usualmente medida antes de empezar la filtración, de esta forma se puede determinar fácilmente su valor (Miller 2015), sin embargo este valor también puede ser estimado mediante la Ec. 2 (Echeverri, 2008):

$$\Delta P_f = k_1 v \quad (2)$$

En la cual:

$k_1$  = Factor de resistencia del filtro, en mm de H<sub>2</sub>O o in de H<sub>2</sub>O y

$v$  = Velocidad de filtración, en m/s o ft/s.

Para determinar  $\Delta P_c$  se usa la Ec. 3 (Miller, 2015):

$$\Delta P_c = k_2 C_p v^2 \Delta t \quad (3)$$

Donde:

$k_2$  = Factor de resistencia debido a la capa de partículas, en mm de H<sub>2</sub>O o in de H<sub>2</sub>O,

$C_p$  = Concentración de partículas en la corriente gaseosa, en  $\text{g/m}^3$  o  $\text{lb/ft}^3$ ,

$v$  = Velocidad de filtración, en  $\text{m/s}$  o  $\text{ft/s}$  y

$\Delta t$  = Tiempo de acumulación de las partículas o de filtración, en s.

Los valores tanto de  $k_1$ ,  $k_2$  y  $v$ , pueden ser estimados o determinados mediante el uso de diferentes tablas dependiendo de la aplicación en la que sea usada la casa de bolsas.

Teniendo en cuenta que la presión diferencial es la variable más importante dentro de la casa de bolsas, y la única sobre la cual se puede tener control, se establecieron las fronteras del sistema considerando únicamente los flujos de entrada y salida de los gases a través de la casa de bolsas (Fig. 3). De esta manera se puede establecer un balance de masa para la descripción física del sistema:

$$\frac{dm}{dt} = F_i C_i - FC \quad (4)$$

Donde:

$\frac{dm}{dt}$  = Tasa de acumulación de masa dentro del sistema,

$F_i$  = Flujo volumétrico de entrada, en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,

$C_i$  = Concentración de partículas a la entrada, en  $\text{kg/m}^3$ ,

$F$  = Flujo volumétrico de salida, en  $\text{m}^3/\text{s}$ , y

$C$  = Concentración de partículas a la salida, en  $\text{kg/m}^3$ .

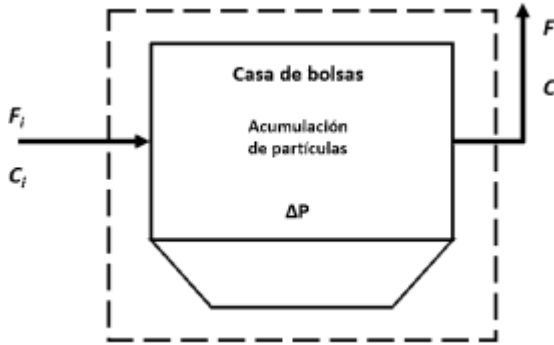


Figura 3. Fronteras del sistema.

Debido a que solo se cuenta con un flujo volumétrico de entrada y un flujo volumétrico de salida, ambos se pueden considerar iguales y constantes, dejando como única variable la concentración de partículas para el control de la presión diferencial.

Así, de la Ec. (1), se puede definir en un solo término  $\Delta P_s$  y  $\Delta P_f$ , siendo ahora  $\Delta P_s$  una presión inicial en estado estable y  $\Delta P_c$  la única variable:

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_c \quad (5)$$

Y considerando la Ec. (3), se obtiene ahora que:

$$\Delta P - \Delta P_s = k_2 C_p v^2 \Delta t \quad (6)$$

Tanto  $k_2$  como  $v$  son valores constantes, agrupándolos en  $A$ :

$$\Delta P - \Delta P_s = AC_p \Delta t \quad (7)$$

Considerando  $C_p$  como la diferencia de concentración de partículas respecto al tiempo, despejando en la Ec. (7) se obtiene:

$$\frac{1}{A} \frac{d(P - P_s)}{dt} = C_i - C \quad (8)$$

Al multiplicar la presión diferencial por el factor  $A$  da como resultado una concentración de partículas. En la Ec. (8) se puede definir la concentración de partículas a la salida  $C$  como una variable que depende de la presión diferencial final alcanzada y de la eficiencia de diseño de la casa de bolsas, la cual es un indicador de la cantidad de partículas a la salida, de esta forma se obtiene:

$$\frac{1}{A} \frac{d(P - P_s)}{dt} = C_i - \frac{1}{A} eP \quad (9)$$

Donde:

$e$  es la eficiencia de diseño de la casa de bolsas y

$P$  es la presión final.

Definiendo las variables como sigue y despejando de la Ec. (9) se obtiene:

$$y = P - P_s \quad (10)$$

$$u = C_i - C_{is} \quad (11)$$

$$\frac{dy}{dt} = Au - ey \quad (12)$$

Aplicando transformada de Laplace se obtiene la siguiente función de transferencia que describe la física del proceso:

$$y(s) = \frac{A}{s + e} u \quad (13)$$

Recordando que  $A$  es un factor que depende directamente de la velocidad de filtración y el factor de resistencia debido a la capa de partículas, y  $e$  la eficiencia de diseño de la casa de bolsas. De manera que podemos decir que estos 3 factores son los que más influyen en el comportamiento del sistema.

#### 4. RESULTADOS

El análisis de la planta se llevó a cabo con el software *Matlab*<sup>®</sup>. Se utilizó la librería de *AppDesigner/ Matlab*<sup>®</sup> para

crear una aplicación donde se pudiera simular la planta y su respuesta ante la aplicación de controladores P, PI y PID, mediante el algoritmo:

$$P \left( 1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right) \quad (14)$$

El cual es usado por los bloques de PID de la librería de control/ Matlab® y donde:

*P* es la acción proporcional,

*I* es la acción integral,

*D* es la acción derivativa y

*N* es el coeficiente del filtro.

La aplicación desarrollada se muestra en la Figura 4. Cuenta con dos submenús con información importante de la estructura de controlador (Fig. 5) y de la planta (Fig. 6). Los valores que se simularon fueron los proporcionados por la empresa TRIASO S.A. de C. V. de su sistema de casa de bolsas, sin embargo, es posible simular cualquier valor. La respuesta que se muestra en las gráficas corresponde a la respuesta del sistema ante un cambio escalón unitario a su entrada, sin acción de control, en la parte de arriba y con acción de control en la parte inferior. Se observa que la planta sin control no llega a alcanzar el valor de la unidad, correspondiente al escalón unitario. Y en caso contrario, con el control, el sistema se estabiliza rápidamente y alcanza el valor de la unidad.

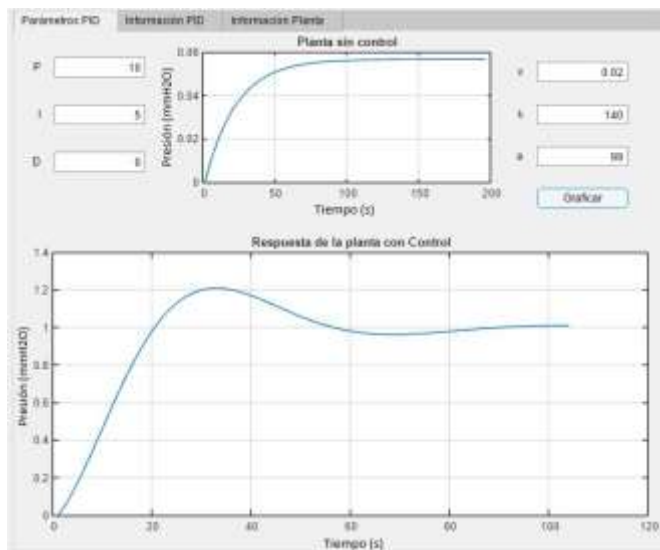


Figura 4. Pantalla principal de la aplicación desarrollada.

Parámetros PID Información PID Información Planta  
 Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la derivación o error entre un valor medido y un valor deseado.  
 El algoritmo del control PID consiste de los parámetros (bloques) de proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual. El Integral depende de los errores pasados y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control.  
 Algunas aplicaciones pueden tener requerir de uno o dos modos de los que provee esta sistema de control. Un controlador PID puede ser también llamado PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede estar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

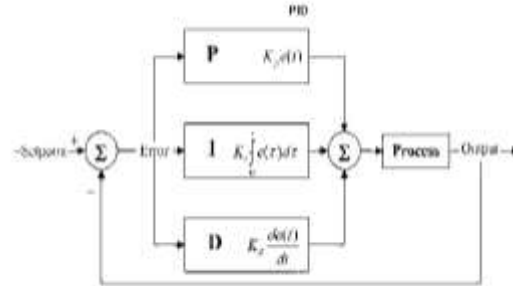


Figura 5. Submenú de información de la estructura del PID.

Parámetros PID Información PID Información Planta  
 Planta  

$$y(s) = \frac{a}{s + a}$$
  
 Los parámetros más importantes que influyen en la física de la planta son *a* y *b*.  
 Donde  
*a* = Es la multiplicación de los valores de *a* y velocidad de filtración. En caso de haber un incremento en la casa de filtración un aumento de *a* y *b*.  
 Tanto el valor de *a* como el de *b* pueden ser reducidos o aumentados de forma para el caso de haber un cambio en la planta. El hecho de cambiar el valor de *a* como el de *b* puede ser graficados los cambios en la presión obtenida y la densidad relativa del gas.  
 En la diferencia obtenida o de cambio de la casa de bolsa de los parámetros. Un valor cercano para estas aplicaciones es de 0.02.

Figura 6. Submenú de información de la planta.

Se pudo observar que el sistema obtuvo buenas respuestas de espabilización para valores de  $P > I$  y  $D = 0$ . La acción derivativa no es muy recomendable de usar ya que puede causar mucho ruido (Fig. 7) incluso con valores pequeños, a menos que se trabaje con velocidades altas de filtración, donde puede ayudar a estabilizar adecuadamente al sistema (Fig. 8)

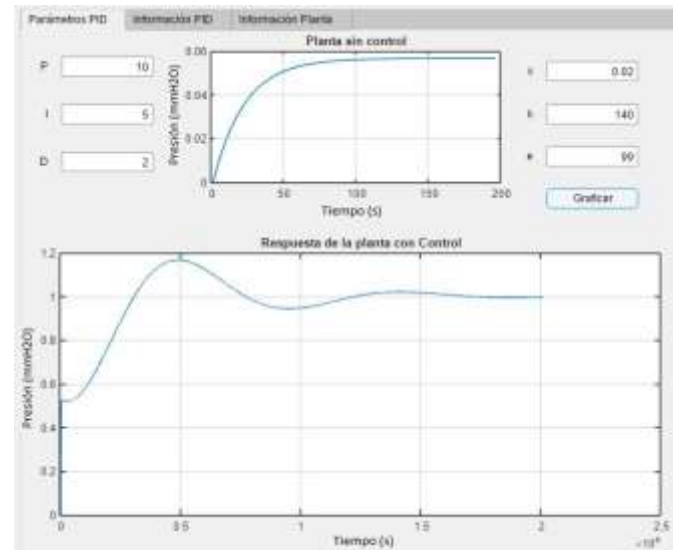


Figura 7. Respuesta del sistema con acción derivativa.

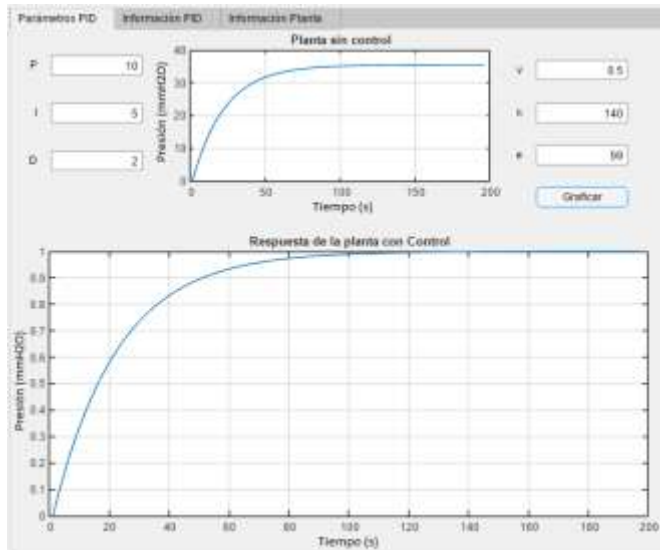


Figura 8. Respuesta del sistema con velocidad de filtración más alta.

Se pudo observar también que las variaciones tanto en la eficiencia como en el factor de resistencia debido a las partículas, no afectan la respuesta del sistema tan gravemente como lo hace el cambio en la velocidad de filtración (Fig. 9).

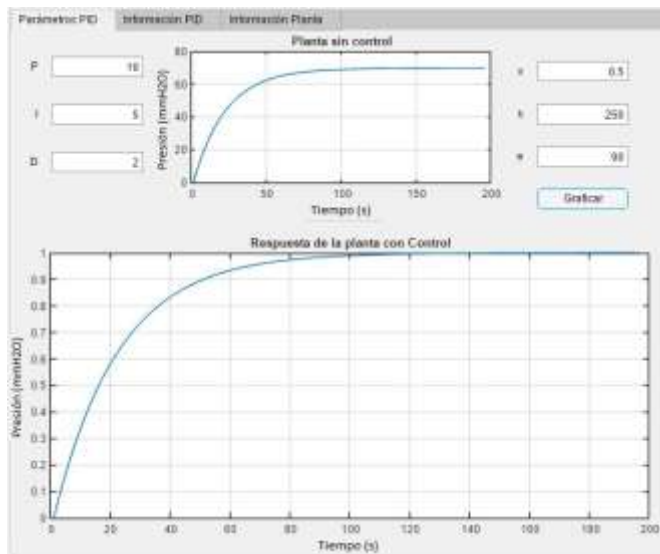


Figura 9. Respuesta del sistema ante variaciones de  $k$  y  $v$ .

Una de las mayores ventajas que presenta esta aplicación es que al ser un archivo ejecutable, puede ser instalada en cualquier computadora, de modo que solo es necesario correrla y sustituir los datos para observar las diferentes respuestas a las teorías de control sobre la planta de estudio.

## 5. CONCLUSIONES

Se pudo determinar mediante el análisis de la planta que la presión diferencial es la variable más importante a controlar dentro de la casa de bolsas. Esto se logra mediante el sistema de limpieza.

La eficiencia de diseño, el factor de resistencia debido a las partículas y la velocidad de filtración son las variables más importantes que describen la física del proceso, y estos parámetros nos han ayudado a desarrollar una aplicación que permite simular la respuesta de la planta para cualquier valor.

## REFERENCIAS

Blanchfield, D.S., 2012. "Environmental encyclopedia" 4th ed. Gale Cengage Learning, ed., Emerald Group Publishing Limited.

Echeverri, A., 2008. Diseño de filtros de talegas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, pp.43–60.

Hung, Y. & Cora, M.G., 2002. Controlling Industrial Particulate Emissions : A Practical Overview of Baghouse Technology. , pp.53–65.

Miller, B., 2015. Particulate formation and control technologies. In Elsevier, ed. *Fossil Fuel Emissions Control Technologies*. Butterworth-Heinemann, pp. 145–196..

Swanson, M., 2016. "Baghouse applications." , pp.1–28. Available at: <http://www.astecinc.com/images/file/literature/Astec-T-139-Baghouse-Applications-EN.pdf>.