

# Opciones para mejorar la eficiencia energética en colectores de polvos tipo casa de bolsas

## (Options to improve energy efficiency in bag house dust collectors)

Javier Del Angel, Francisco Torres  
UANL, San Nicolás de los Garza, N.L. México, 66451

**Abstract.** Practical options are presented and described to improve the energy efficiency of bag house dust collectors, using fixed speed reduction methods, differential pressure-controlled frequency inverter and negative pressure at the inlet of the bag suction duct. These methods are implemented in a fine powder collection system of a molding line of a grey iron casting plant.

Keyword: Dust collectors, variable frequency drive, differential pressure, static pressure, speed pressure.

**Resumen.** Se presenta y describen opciones práctica para mejorar la eficiencia energética de colectores de polvos tipo casa de bolsas, usando métodos de reducción de velocidad fija, variador de frecuencia controlado por presión diferencial y por presión negativa a la entrada del ducto de succión. Estos métodos son implementados en un sistema de recolección de polvos para polvos finos de una línea de moldeo de una planta de fundición de hierro gris.

Palabras clave: Colectores de polvos, controladores variables de frecuencia, presión diferencial, presión estática, presión de velocidad.

### INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es presentar alternativas prácticas en la metodología de control de colectores de polvos de manera que podamos obtener reducción en el consumo de energía. Este ahorro de energía principalmente se dará en el motor principal de sistema de colección de polvos. Aunque la aplicabilidad del método de reducción de consumo está sujeta a estudio de factibilidad, cada sistema necesita un acercamiento individualizado, es decir, un proceso de experimentación, prueba y error de resultados antes de obtener la configuración final; es importante mencionar que por condiciones o restricciones particulares de cada sistema en algunas ocasiones no es posible obtener ahorros de energía, por ejemplo si el colector esta dimensionado muy por debajo de la capacidad requerida no se obtendrán resultados deseados en la recolección de polvos si se reduce su velocidad. Pero para la mayoría de los casos es posible encontrar una manera de reducir los consumos de estos sistemas industriales.

En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de aplicación de extracción de gases de un horno de vaciado con 2 ramificaciones del ducto de entrada, en la Fig. 2 se muestra múltiples ramificaciones para extracción de polvos finos en una casa de enfriamiento y des-moldeo. Estas aplicaciones son típicas en los procesos de fundición de hierro gris y moldeo de metal fundido. En la industria muchos de estos colectores desperdician energía por desconocimiento de los responsables de su operación. Usualmente se desconoce sus principios de funcionamiento y mejores prácticas de ahorro y leyes de afinidad de los ventiladores o bombas centrifugas.



*(Fig. 1) A la izquierda un colector doble ducto de extracción en horno de vaciado y (Fig. 2) a la derecha múltiples puntos de extracción en una línea de moldeo*

Los variadores de frecuencia son el método más efectivo para la reducción de consumos y mejoramiento de consumo energético o servicio de este tipo de sistemas, aunque existen otros métodos como el uso de compuertas, compuertas variables y otras. Se ha demostrado en otros estudios técnicos las ventajas obtenidas mediante el uso de vaciadores de frecuencia en bombas, compresores y otros equipos y su uso en la industria ha ido en aumento (IEEE, 1994).

Es importante mencionar que el servicio de estos sistemas se debe de mantener en las mejores condiciones ya que si este servicio se afecta condiciones peligrosas se pueden dar por presencia de partículas en el aire que pueden afectar la salud de los trabajadores de la planta industrial que los utiliza. Además de que existen normas mexicanas que no se deben pasar por alto y deben de ser consultadas para poder definir los niveles de servicio de los sistemas de recolección de polvos y estar en cumplimiento con respecto de las emisiones atmosféricas e internas en la planta donde los trabajadores estarán laborando. Algunas normas relacionadas son (Secretaria de Gobernación, 2019):

- NOM-043-SEMARNAT-1993
- NOM-010-STPS-2014
- NOM-098-SEMARNAT-2002
- NOM-059-SSA1-2013
- NOM-040-ECOL-1993
- NOM-105-ECOL-1996
- NOM-121-ECOL-1997
- NOM-123-ECOL-1998
- PROY-NOM-156-SEMARNAT-2008
- NMX-AA-010-SCFI-2001
- NOM-005-STPS-1998

Los colectores de polvo para este estudio están en dos plantas industrial similares de fundición de hierro gris en moldes de arena verde, estas planta puede procesar hasta 80,000 toneladas métricas de producto por año. El edificio de fundición es una instalación de aproximadamente 17,000 metros cuadrados para albergar una instalación de fusión, sistema de moldeo, planta de arena, producción de núcleos y operaciones de acabado de fundición. Los sistemas de recolección de

polvo para las áreas de proceso mencionadas son objeto estudio. Los componentes del tratamiento del aire son cinco sistemas independientes, cada uno dotado de un ventilador centrífugo principal que recoge los gases de combustión a tres pilas. Cuatro sistemas están equipados con un paso de filtrado por medio de un filtro de tela (bolsa), un instrumento para la medición de la concentración de polvo, un transmisor de temperatura y un transmisor de flujo para la monitorización del aire de escape. El quinto no prevé un sistema de recolección de polvo, sino sólo un sistema de escape de aire. La recolección, contención y manipulación efectivas de los humos de la fundición, el humo y los materiales de polvo es esencial para un programa de gestión ambiental exitoso. Proteger a los trabajadores de la planta y el medio ambiente de materiales peligrosos es el objetivo del sistema de recolección de polvo. Las áreas relacionadas con el sistema de recolección de polvo están en el exterior, sólo cubiertas con un dosel colocado a 11 metros de altura desde el nivel del suelo. La planta A está ubicada en Nuevo Lean, México; y la planta B está en Michigan, USA.



(Fig. 3) Vaciado de hornos a ollas en una planta similar

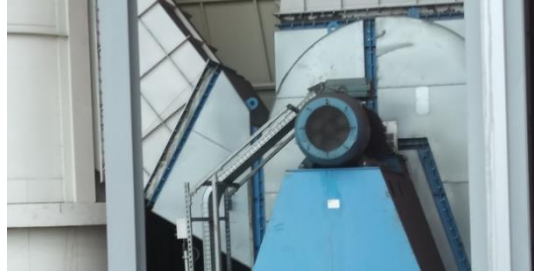
## ANTECEDENTES

Existen varios métodos de reducción de consumos con ventiladores centrífugos (Wayne C. Turner, 2007), entre ellas están: el método de ciclado, compuerta de salida, propela de entrada variable, etc. Es este trabajo solo nos enfocaremos a las opciones que utilizan variador de frecuencia variable por ser la que ha demostrado más ahorros por sus resultados más cercanos a las leyes de afinidad.

Los ventiladores tipo centrífugo son ventiladores donde el aire sigue una dirección axial a la entrada y paralela a un plan radial a la salida (Salvador Escoda S.A.), la entrada y la salida están en un ángulo recto. El rodete de estos aparatos está compuesto de álabes que pueden ser hacia adelante, radiales o hacia atrás.

Los ventiladores centrífugos están diseñados para poder alcanzar la máxima capacidad del sistema en el que son instalados (Rockwell Automation, 2014); en el caso de los ventiladores centrífugos instalados en los colectores de polvos estos también están diseñados para poder proporcionar el flujo de diseño en las condiciones de filtros sucios. En muchas ocasiones también se pueden variar la demanda más debajo de su capacidad de diseño (Rockwell Automation, 2014); en el caso de los colectores de polvos por ejemplo, los filtros pueden estar limpios y la capacidad para poder proporcionar el flujo de aire de diseño es menor a la capacidad demandada para poder proporcionar el mismo flujo con filtros sucios. La eficacia y periodicidad de la limpieza de los filtros también puede ser clave para afectar la capacidad demandada sobre el motor. El ventilador centrífugo

transfiere energía a el aire usando fuerza centrífuga como resultado se incrementa la presión y se genera un flujo a la salida del ventilador. El sistema genera una presión estática, el flujo generado por el ventilador centrifugo tendrá que ser capaz de romper esta presión estática y generar el flujo a el nivel necesario de acuerdo a su diseño. Aunque en este estudio no nos vamos a enfocar el los detalles del diseño; si no solo en las recomendaciones para ahorro de energía y factibilidad de la aplicación del ahorro.



(Fig. 4) Motor principal de un colector de polvos

#### Definiciones importantes

Tenemos definiciones importantes de este estudio técnico son: presión estática, presión diferencial, presión de velocidad, presión total, sistema de limpieza de un sistema de colección de polvos y caudal.

La presión estática es causada por la resistencia del sistema o ductos y las condiciones de limpieza de los filtros. Al ser un fluido es cualquier sustancia que no se ajusta a una forma fija, esto puede ser un líquido o un gas. Dado que el fluido no se mueve, la presión estática es el resultado del peso del fluido o de la fuerza de gravedad que actúa sobre las partículas del fluido. La presión en casos donde no hay movimiento es referida a presión estática (Johnson, 1997).

La presión diferencial (Dolandson - Filtration Solutions, 2019) es el diferencial de presión que existe en el sistema de ductos después de los filtros y antes de los filtros. Esta presión cambia a lo largo del tiempo debido al incremento de suciedad en los filtros, esta suciedad hace que la represión estática aumente antes del filtro, por lo tanto la presión diferencial aumenta.

Presión velocidad, es la presión en la dirección del flujo que es necesaria para mover el aire a una velocidad dada.

Presión total está compuesta de dos, de la presión estática y de la dinámica (Streeter, 1971). Esto es la presión estática del ducto y la presión de la velocidad.

Sistema de limpieza de un sistema de colección de polvos, es un conjunto de dispositivos que por medio de soplado neumático y válvulas de diafragma generan sacudimiento en las bolsas o filtros para que se limpien.

Caudal es la cantidad de aire que circula en el ducto, típicamente en la industria se mide en CFM por sus siglas en inglés (Cubic feet per Minute).

Definición de curvas de comportamiento de un ventilador

Este método aprovecha el cambio en la curva del ventilador que se produce cuando la velocidad del ventilador se cambia. Estos cambios se pueden cuantificar en un conjunto de fórmulas leyes de afinidad (Rockwell Automation, 2014). De una manera práctica se puede decir que el flujo de fluido es proporcional a la velocidad del motor (bomba o ventilador centrifugo), la presión de salida es proporcional al cuadrado de la velocidad y el poder requerido es proporcional al cubo de la velocidad (Food, 2011). Por nuestra familiaridad con unidades CFM (cubic feet per minute), RPM (revolution per minute) y HP (horse power) expresamos las leyes de afinidad en la siguiente serie de fórmulas:

$$\frac{CFM_x}{CFM_{nueva}} = \frac{RPM_x}{RPM_{nueva}}$$

$$\frac{SP_x}{SP_{nueva}} = \frac{CFM_x^2}{CFM_{nueva}^2} = \frac{RPM_x^2}{RPM_{nueva}^2}$$

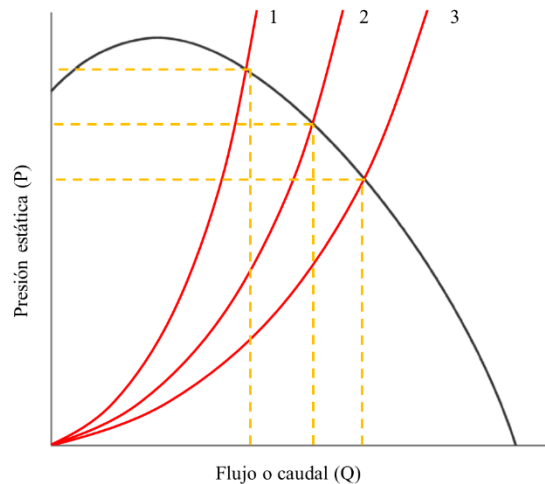
$$\frac{HP_x}{HP_{nueva}} = \frac{CFM_x^3}{CFM_{nueva}^3} = \frac{RPM_x^3}{RPM_{nueva}^3}$$

La siguiente grafica muestra la presión estática contra el flujo o caudal (color negro). Cada ventilador tendrá su propia curva o varias curvas dependiendo de las velocidades del ventilador, estas curvas típicamente incluyen las eficiencias del ventilador y los requerimientos de poder. Las líneas tojas ejemplifican la curva del sistema, esta curva muestra cuanta presión es requerida para superar las pérdidas del sistema y así producir flujo de aire (Rockwell Automation, 2014).

La curva roja 1 muestra la típica curva de sistema para un sistema de colector de polvos con filtro sucio, la curva roja 2 muestra una curva de sistema donde por diseño y la curva roja 3 representa una curva de sistema de un sistema de colector de polvos con filtros nuevos.

De la curva del ventilador centrifugo, tenemos los siguientes interpretaciones para un sistema con motor funcionando a velocidad fija y sin sistema de limpieza: la presión del sistema varía de acuerdo a que tan sucios están los filtros, entre más sucios estén más presión diferencial existirá, ya que al estar las bolsa o filtros más saturados de partículas se genera más presión estática en el sistema, es decir, la presión cambiara con el tiempo ya que inicialmente empezamos con un sistema con filtros limpios.

Se puede dedicar que si el filtro está sucio más velocidad será requerida para alcanzar el flujo adecuado. O de otra manera si el filtro está limpio menos velocidad es requerida para alcanzar el flujo de diseño o que podrá otorgar el servicio adecuado.



(Fig. 5)

Desde el punto de vista de la administración de energía e ingeniería financiera se puede decir que utilizar un ventilador centrífugo a altas revoluciones cercanas superiores al 90% de la velocidad máxima es financieramente incorrecto cuando se controla el motor con un controlador de velocidad variable o VFD. El costo del variador es muy elevado para este tipo de uso, es importante sacar el mayor provecho de la capacidad de control y reducción de la velocidad para que la inversión del variador sea efectiva. Si reducir las velocidades del ventilador no es posible la opción de variador de frecuencia no es la más adecuada, otros métodos como el de propela a la entrada o compuerta variable a la salida es mejor opción por su bajo costo de implementación.

#### Recomendaciones de mantenimiento generales

Para mejorar aún más el proceso de limpieza de los filtros del colector se tiene las siguientes recomendaciones operativas y de mantenimiento.

- Inspeccionar el sistema de colección de polvos
- Factibilidad de cambio de sistema de limpieza de diafragma a carrete
- Cambiar las bolsas (filtros) con más frecuencia
- Limitar el flujo de aire si es innecesario
- Fugas de aire o presión en los ductos

Recurrentemente inspeccionar el sistema de colección de polvos en búsqueda de anomalías que puedan ocasionar el mal funcionamiento del mismo, verificar compuertas, válvulas, presiones neumáticas, presiones negativas, diferenciales, estáticas, estado de filtros, ductos, etc.

Factibilidad de cambio de sistema de limpieza de diafragma a carrete es importante ya que se ha demostrado una mejora en la efectividad de limpieza los filtros en la casa de bolsa del sistema de colectores de polvo, para esto se necesita verificar la factibilidad de cambiar las válvulas de tipo diafragma del sistema de limpieza por tipo carrete. Por si solo este sistema de carrete ofrece ahorro de energía y reducción de costos de mantenimiento.

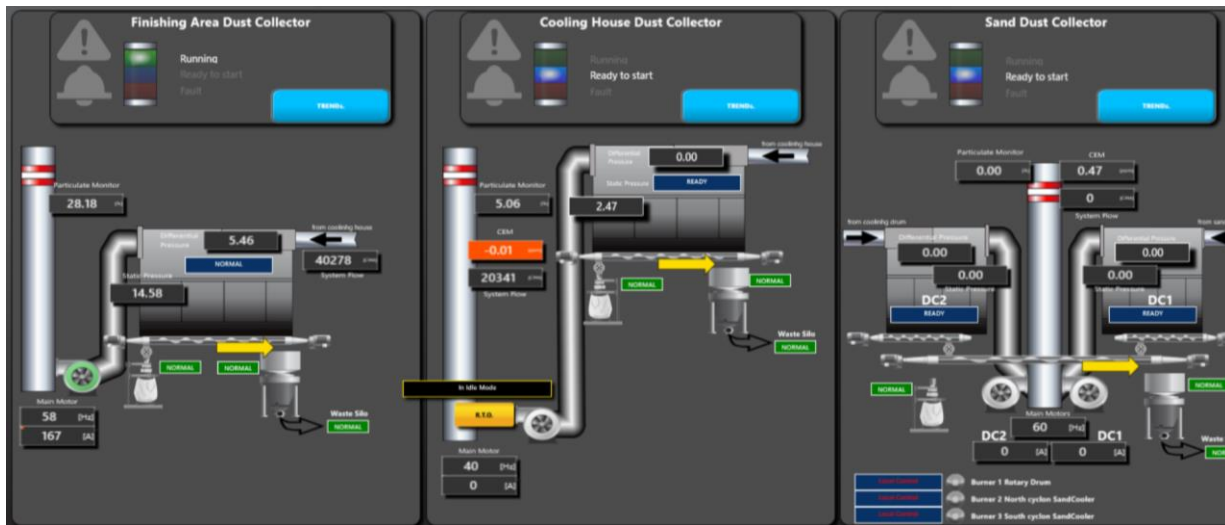
Cambiar las bolsas (filtros) con más frecuencia, es necesario inspeccionar las bolsas o filtros periódicamente para detectar problemas, como mala instalación, daños, etc. Además es recomendable cambiar con más frecuencia las bolsas sucias por nuevas.



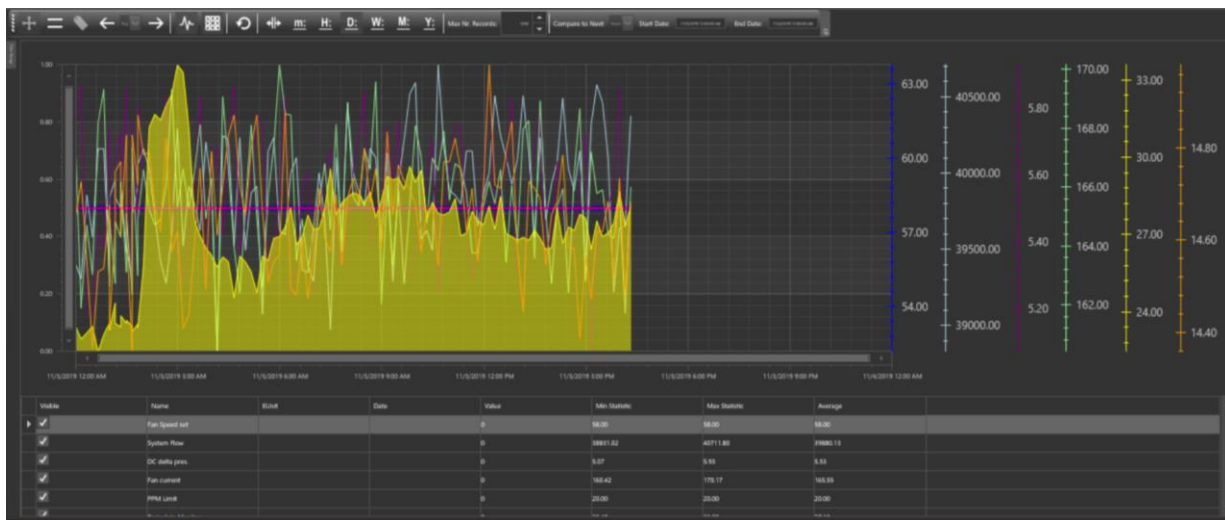
Limitar el flujo de aire si es innecesario, ya la vida de los filtros se disminuye si no se el nivel de CFM es el adecuado, si se excede ese nivel de flujo de aire se proyectaran las partículas de polvo más profundo de otro de los filtros innecesariamente reduciendo así su vida útil. Además entre más polvo se sople con fuerza excesivamente innecesaria más se saturara más rápidamente el filtro.

Fugas de aire o presión en los ductos, es importante verificar y mantener adecuadamente toda los ductos del sistema de recolección de polvos, algunos detectores ultrasónicos de vacío pueden apuntar a fugas de presión. También se deben verificar las puertas y estructuras que están sometidas a presión de succión, sellos, etc.

Monitoreo SCADA, tecnología de control de supervisión y adquisición de datos (Boyer, 2009). Esto permitirá experimentar y analizar los datos de los equipos de colección de polvos de manera más eficiente. La figura 6 y 7 muestran ejemplos de monitoreo SCADA de los colectores de polvos de las planta A y B.



(Fig. 6) 3 sistemas de recolección de polvos



(Fig. 7) Monitoreo de parámetros en el tiempo.

## MÉTODO 1: DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD A UNA VELOCIDAD FIJA

Tenemos la hipótesis de que es posible encontrar reducciones de velocidad fija y no demeritar el servicio de los sistemas de recolección de polvos, ya que en sistemas más antiguos se logra esto por medio de sistemas mecánicos de obstrucción de flujo, la desventaja de obstruir el flujo es que se trabaja de manera ineficiente en términos energéticos. Nuestra ventaja es que tenemos los motores principales equipados con variador de frecuencia.

En un principio, estos sistemas se encontraron siendo manejados a las velocidades máximas de operación, esto es sin hacer uso del variador de frecuencia, siendo así se podía decir que se estaba desperdiciando la ventaja del variador de frecuencia y además estaban trabajando con cierta ineficiencia ya que los variadores de frecuencia presentan pérdidas en calor en su electrónica de poder. No tiene sentido usar variador de frecuencia al el 100% de la velocidad, inclusive es mejor no usar el variador.

Antes de reducir la velocidad del ventilador principal, se optó por explorar otras alternativas para mejorar el desempeño del sistema, se verificaron las juntas en los ductos, se efectuaron limpiezas, inspección de las bolsas de filtrado además se mejoró el sistema de limpieza automático de las bolsas del colector de polvos, es recomendable hacer pruebas para aumentar la periodicidad de los ciclos de limpieza para que la presión diferencial se mantenga baja el mayor lapso de tiempo posible comparado con cualquiera que fuese he estado anterior a la prueba. Manejar la limpieza de los colectores de polvos por medio de la presión diferencia es el método más efectivo, para la mayoría de los colectores de polvos de tipo bolsa es importante tomar en cuenta que cuando el filtro o bolsa está limpio la presión diferencia será baja típicamente 1 o 2 pulgadas de columna de agua, cuando la presión diferencial alcanza 5 pulgadas de columna de agua es un punto ideal para iniciar ciclo de limpieza y cuando regresas a 3 se detiene el ciclo de limpieza.

<b>inWC</b>	<b>mmWC</b>	<b>kPa</b>	<b>Estado de los filtros</b>
1	25.4	0.2	Filtro nuevo o limpio
2	50.8	0.5	Filtro nuevo o limpio
3	76.2	0.7	Punto en el cual se detiene la limpieza después de que esta comenzó.
4	101.6	1	
5	127	1.2	Punto de inicio de limpieza de la bolsa
6	152.4	1.5	
7	177.8	1.7	Filtro en mala condición
8	203.2	2	Filtro en mala condición
9	228.6	2.2	Filtro en mala condición
10	254	2.5	Filtro en mala condición

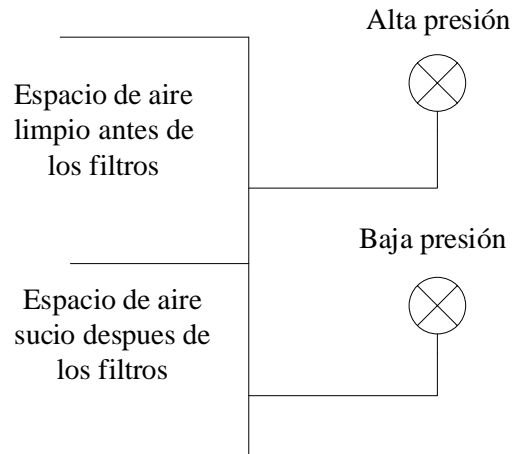
(Tabla 1)

La tabla 1 muestra equivalencias de diferencial de presión en unidades más usadas en Norte America, columnas de agua en pulgadas inWC, columnas en milímetros de agua mmWC y miles de Pascales kPa. El estado de los filtros es la situación de limpieza de estos la cual es medida por la diferencia de presión.



Las configuraciones finales de presión diferencial podrían ajustarse ligeramente para cada caso o sistema de colector de polvos se requiere un proceso de experimentación y prueba. La idea fundamental de este método es estresar el ciclo de limpieza y tener el mayor tiempo posible la menor presión diferencial posible.

La presión diferencial puede ser medida con sensores digitales de presión uno en la cámara de aire limpio del sistema de colección de polvos o casa de bolsas y el otro en la cámara sucio o salida. Estas mediciones serán entradas para el sistema electrónico de control de limpieza y también para el control del ventilador centrífugo (Método 2).



(Fig. 8) Diagrama de medición de presión diferencial (Firing Industries Ltd., 2017)

En la siguientes imagen (Fig. 9 y Fig. 10) se muestra un controlador automático de limpieza de colectores de polvo tipo casa de bolsa de estudio y un medidor de presión electrónico con comunicación Ethernet.



(Fig. 9) PLC del sistema de limpieza típico y (Fig. 10) medidor de presión industrial inteligente

Estando implementada la mejora del sistema de limpieza y manteniendo los filtros limpios el mayor tiempo posible, se descubrió también que el sistema de limpieza funciona mejor cuando las líneas productivas están fuera de servicio y los colectores no están sujetos a las presiones de succión. Se extendieron los ciclos de limpieza 30 minutos después que los motores principales de succión fueron apagados.

Se empezó a experimentar con los sistemas bajando del 100% de la velocidad del ventilador en intervalos de 5%, es decir, se redujo de 100% a 95%, de 95% a 80% y así sucesivamente. Se encontró que cada colector de polvos se podía reducir su velocidad en el motor principal a un punto de velocidad diferente y esto estaba relacionado con el nivel de servicio PPM medidos o humos percibidos en la planta.

Este método es el que hemos estado utilizando en los colectores de polvo a lo largo de 2019 y el único inconveniente es que hay momentos en que las variaciones de presión por suciedad en los filtros originada por condiciones puntuales de contaminación en los materiales hace que las condiciones de los humos dentro de la planta se incrementen, cuando esto sucede reactivamente y de manera manual se incrementan las velocidades de extracción para eliminar el problema. Esto nos hace ver que aunque si existe cierta relación entre la velocidad fija encontrada y el servicio del sistema, pero que podría ser mejorado.

#### MÉTODO DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ACUERDO A DIFERENCIA DE PRESIÓN

En el método de velocidad fija se encontró que se necesitaban en ocasiones modificaciones manuales a la velocidad fija de aumento de velocidad cuando el servicio no era óptimo, pero también se encontró momentos en los que la succión seguía siendo elevada, esto último sucedía a menudo cuando los materiales de proceso no estaban tan sucio o no generaban polvos y humos como regularmente sucedía. Entonces surgió la idea que podría haber un método en el cual el ventilador principal siguiera a la presión diferencial de la misma manera que el sistema de limpieza por pulsos. La nueva hipótesis es que se puede mejorar el desempeño energético controlando los variadores de frecuencia de manera escalonada comparado con solo una velocidad fija.

Este método se empezó a experimentar en algunos de los colectores de polvos a continuación del método anterior de reducción a velocidad fija. Ahora se trató de ajustar la velocidad del motor principal de manera similar a el ciclo de limpieza, por medio de la presión diferencial, para empezar a experimentar con este método es recomendable seguir la siguiente tabla como punto inicial. La información de esta tabla con respecto a la velocidad del variador puede ser ajustada dependiendo para cada sistema de extracción o colección de polvos. El objetivo es probar experimentalmente que se logra el servicio deseado con las reducciones de acuerdo a al seguimiento y medición de la presión diferencial.

La siguiente tabla 1 al igual que la tabla 1 muestra las presiones diferenciales típicas de funcionamiento de un colector de polvos, aunque estas pueden tener variación de interpretación de un sistema a otro, se puede tomar como base de referencia para definir ciclos de limpieza y velocidades del ventilador centrifugo. En la columna velocidad se expresa en porcentaje la la velocidad máxima del ventilador síncrono o porcentaje de la frecuencia máxima del sistema eléctrico en el caso de México 60 Hz (CFE, 2005).

<b>inWC</b>	<b>mmWC</b>	<b>kPA</b>	<b>Velocidad</b>
<b>1</b>	25	0.2	65%
<b>2</b>	51	0.5	68%
<b>3</b>	76	0.7	72%
<b>4</b>	102	1.0	75%

<b>5</b>	127	1.2	78%
<b>6</b>	152	1.5	82%
<b>7</b>	178	1.7	85%
<b>8</b>	203	2.0	88%
<b>9</b>	229	2.2	92%
<b>10</b>	254	2.5	95%

(Tabla 2)

La presión diferencia se puede medir de la misma manera que en el método 1, (Fig. 8).

Esto quiere decir que a un determinado valor de las columnas de agua en pulgadas se deberá ajustar la velocidad del ventilador como muestra el porcentaje de la tabla. Es importante aclarar que el resultado de servicio de los colectores de polvo puede ser medido y se cuenta con detector de partículas o de emisiones se podría saber la efectividad del sistema de recolección de polvos antes y después de la prueba de experimentación. Un proceso de ajuste de valores será requerido y se puede diseñar una curva de comportamiento en vez de una tabla, todo esto dependiendo de las características del controlador a disposición. Los valores de porcentaje de velocidad son linealmente proporcionales a los valores de presión diferencial.

Ya teniendo la tabla inicial para empezarla experimentación se programó en el motor principal y se inició un proceso de ajuste de la curva. Como primer paso se trató de descubrir la velocidad mínima posible cuando el sistema estaba limpio es decir cuando la presión diferencial era la mínima posible, entonces el valor de la tabla 65% fue ajustado de acuerdo a este proceso, para encontrar este punto de estado más limpio se estreso el ciclo de limpieza al máximo posible. De esta misma manera se buscó el punto donde el sistema estuviera lo más sucio posible sin comprometer la integridad de los filtros, este valor fue típicamente entre los 8 y los 10 inWC. Para mejorar los ahorros de energía se tomó como 95% la máxima velocidad posible en la tabla, es decir, esa fue la velocidad máxima de partida para la tabla de velocidades.

<b>inWC</b>	<b>mmWC</b>	<b>kPA</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Ajuste de Velocidad</b>	<b>Nuevas Velocidades</b>
<b>1</b>	25	0.2	65%	75%	75%
<b>2</b>	51	0.5	68%		78%
<b>3</b>	76	0.7	72%		80%
<b>4</b>	102	1.0	75%		83%
<b>5</b>	127	1.2	78%		85%
<b>6</b>	152	1.5	82%		88%
<b>7</b>	178	1.7	85%		90%
<b>8</b>	203	2.0	88%		93%
<b>9</b>	229	2.2	92%	95%	95%
<b>10</b>	254	2.5	95%		98%

(Tabla 2.1)

Por ejemplo en el ajuste de velocidad menor se encontró el 75% y para la velocidad mayor 95% se obtuvo para 9 inWC de presión diferencial. Las nuevas velocidades están dadas bajo la siguiente función línea:

$$\underbrace{Velocidad\ del\ Motor = f(P_{Diferencial})}_{P_{Diferencial} \rightarrow 1\ a\ 10\ [inWC]} = Velocidad_{Menor} + (P_{Diferencial} - 1) \times (Velocidad_{Mayor} - Velocidad_{menor})$$

De esta manera se busca una tabla adecuada para cada sistema de colector de polvos, es importante mencionar que para la planta B en 3 sistemas no se logró aplicar ni el método de velocidad fija ni el método de velocidad variable, lo cual nos hace pensar y deducir que estos sistemas están dimensionados por debajo de las necesidades reales de la aplicación, otras opciones de inversión en equipamiento serán evaluadas para mejorar su servicio.

Con el método de reducción de velocidad de acuerdo al diferencial de presión se logró mejorar entre un 3% y un 15% los ahorros de energía, aunque siguen existiendo momentos en los que es necesario sobrescribir manualmente las velocidades bajo eventos puntuales como exceso de humos en la planta o exceso de succión. Pero el resultado es mejor que el método de velocidad fija.

Es importante verificar a lo largo del tiempo de los niveles de caudal se mantengan dentro de los parámetros de diseño en los puntos de extracción con los parámetros ajustados de velocidad de la Tabla 2, es decir, se debe de verificar que el servicio de los extractores sea el deseado, si no es así se tendrá que ajustar los parámetros hasta encontrar el servicio adecuado.

#### Caso Planta A y Planta B

En los casos de planta A y planta B solo se implementó el método de reducción fija de la velocidad y método variación de la velocidad de acuerdo a la presión diferencial. En las tablas están listados los equipos de colección de polvos, la potencia de su motor principal, la frecuencia, los días de trabajo, el tiempo de labor, la velocidad antes de la mejora (Vel 1) y la velocidad después de la mejora (Vel 2). Como resultados los consumos de energía en los dos niveles de velocidad, la diferencia es un ahorro en MWh anualizado. Estos son los resultados al aplicar el método de reducción a velocidad fija:

#### Planta A

Equipo	kW	Hz	Dias	Tiempo	Vel 1	Vel 2	Ener 1	Ener 2	Savings
Fundición	450	60	290	16	100	70	2088	716	1372
Fomet	200	60	290	16	100	80	928	475	453
Planta de arena	500	60	290	16	100	85	1691	1425	267
Drum	250	60	290	16	100	80	846	594	252
Granalladora	150	60	290	16	100	85	507	427	80
	1550							Total MWh	2423

(Tabla 3)

Para la Planta A, aparentemente por tener equipos correctamente dimensionados el ahorro de energía es mayor 2423 MWh anual después de implementar las reducciones de velocidad y mejorar los sistemas de limpieza. La capacidad instalada es de 1550 kW, el ahorro de energía anualizado es del 39.9% del consumo de energía.

Estos son los resultados al aplicar el método de reducción a velocidad fija:

Planta B

Equipo	kW	Hz	Dias	Tiempo	Vel 1	Vel 2	Ener 1	Ener 2	Ahorro
Granalladora	185	60	290	24	100	97	1288	1163	125
Planta de arena 1	300	60	290	24	100	67	2088	619	1469
Planta de arena 2	300	60	290	24	100	100	2088	2088	0
Fundición 1	185	60	290	24	100	100	1288	1288	0
Fundición 2	185	60	290	24	100	100	1288	1288	0
	1155						Total MW		1594

(Tabla 4)

En la planta B se hicieron intentos de bajar la velocidad pero el resultado en el servicio no fue óptimo, se siguió con iteraciones adicionales reduciendo la reducción de la velocidad y se llegó a la siguiente conclusión. Solo 2 colectores se les pudo hacer reducción de velocidad inclusive después de la optimización del ciclo de limpieza. El colector de Granalladora se pudo reducir 3% de su velocidad y el de Planta de arena 1 se redujo 33%. En conjunto los dos colectores se perfila para dar un ahorro comparado con su estado anterior de 1594 MWh anuales equivalente al 19.8% del consumo total a velocidad máxima de los ventiladores.

El método de reducción a velocidad fija es fácil estimar el consumo ya que se aplican formulas sobre leyes de afinidad a la velocidad fijada. Para el caso del método de variación de velocidad de acuerdo a la presión diferencial tiene que ser medido por un medidor de consumo de energía eléctrica convencional, en general se encontraron ahorros de entre 3% y 15%, comparado con el método de velocidad fija y se encontró que estos resultados fluctúan por la naturaleza del sistema.

De:

$$\frac{HP_x}{HP_{nueva}} = \frac{CFM_x^3}{CFM_{nueva}^3} = \frac{RPM_x^3}{RPM_{nueva}^3}$$

Tenemos que:

$$Ahorros\ de\ energía\ [MWh/año] = \frac{(HP_x[kWh] - HP_{nueva}[kWh])}{1000} \times Dias \times Tiempo\ [Hrs]$$

Donde las revoluciones por minuto pueden ser sustituidas por el porcentaje de velocidad.

## ESTADO FUTURO - METODO DE CONTROL DE POR VARIADOR DE FRECUENCIA DE ACUERDO FLUJO EN LA ENTRADA DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN

Ahora bien en un estado futuro y para mejorar el servicio y desempeño energético pensamos que podemos controlar a los motores principales siguiendo un parámetro medible que nos brinde mejor resultados de servicio y este parámetro es conocido por diseño, esto es el flujo en cada entrada de aire de los sistemas de extracción de polvo, actualmente no contamos con medición de flujo en ningún punto de extracción, ya que representa un reto de ingeniería por las condiciones de temperatura, suciedad, química y presiones a los cuales se someterían los sensores. Recomendación para determinar la presiones del sistema podría ser la instalación de transductores de presión en estas entradas.

La forma más fácil (práctica) de determinar la velocidad de flujo es medir la presión de velocidad en el conducto con un conjunto de tubo pitot conectado a un sensor de presión diferencial. El conjunto de tubos pitot incluye una sonda de presión estática y una sonda de presión total. Una sonda de presión total, alineada en el flujo de aire, detecta la presión de velocidad del conducto y la presión estática, lo que equivale a la presión total. Una sonda de presión estática alineada en un ángulo recto con respecto al flujo de aire detecta solo la presión estática. La diferencia entre la lectura de presión total y la lectura de presión estática es la presión de velocidad (Building Automation Products, Inc., 2015). Es recomendable hacer esta medición a la entrada del sistema de extracción para poder calcular con la medición de presión de velocidad el flujo o caudal y compararlo con el caudal de diseño o requerido en ese punto de extracción.

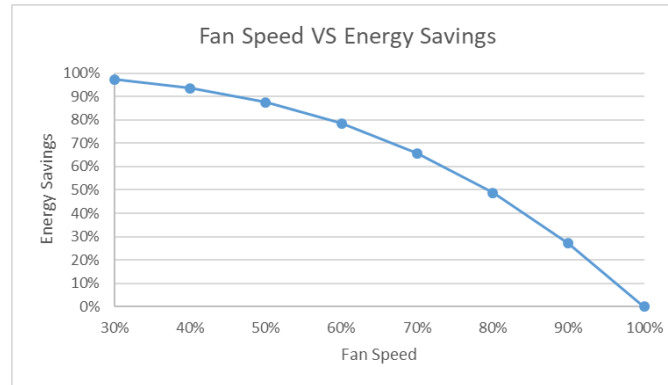
El objetivo de controlar la velocidad del variador por medio del caudal de salida es en un principio similar a la del método de variación de velocidad de acuerdo a la diferencia de presión, también se necesitan lectura de presión total y estática pero en el punto de extracción, con esto se garantiza el servicio del sistema de colección de polvos y por otro lado se facilita la automatización del controlador (PLC) ya que este podrá tener un control donde las entrada es el nivel de caudal requerido y medido en el punto de extracción y el bloque de control ajustara la velocidad del variador para alcanzar este punto de servicio óptimo bajando o subiendo la velocidad del variador. Esto con un modelo PID de control donde se busque suavizar la reacción de la velocidad del motor, no queremos que el motor reaccione tan rápido al cambio de caudal en la entrada. Un PID bien implementado requerirá filtrado de ruido en las comunicaciones en particular de la retroalimentación de los sensores de presión en la entrada del ducto; ajustes adecuados finos adecuados (Astrom, 2002). La capacidad de los controladores integrales proporcionales (PI) y de derivados integrales proporcionales (PID) para compensar la mayoría de los procesos industriales prácticos ha llevado a su amplia aceptación en aplicaciones industriales (O'Dwyer, 2009).

La nueva hipótesis de trabajo es encontrar un modelo automático de control de los motores principales siguiendo los flujos mínimos requeridos en las entradas de las extracciones y así poder garantizar el mejor servicio y además el ahorro de energía requerido.

## CONCLUSIONES



Es importante recordad que la finalidad es proveer un CFM cercano al de diseño, es decir, el enfoque número uno es el servicio del sistema, en segundo lugar se pone el consumo de energía en el punto más eficiente posible. Teniendo lo anterior como base se puede decir que los ahorros en los sistemas de colección de polvos son significativos por tener involucradas en sus leyes de afinidad la relación cubica del flujo y la potencia o capacidad del motor del ventilador centrifugo.



(Fig. 11) ahorros de energía por reducción de velocidad en el VFD

Se lograron ahorros significativos en la planta A y por tener menos capacidad instalada algo menores en la planta B, 39.9% para la planta A y 19.8% para la planta B.

Este tipo de implementación requiere en primer lugar la medición de los parámetros del sistema antes de aplicar algún método de ahorro, es importante monitorear y analizar datos. También es recomendable implementar los métodos por etapas o fases. El método 1 por ejemplo nos servirá para identifica la factibilidad de la reducción de la velocidad en el ventilador centrifugo, el método 2 no ayudara a identificar la relación entre las presiones del sistema y la velocidades de reducción y el método 3 para proporcionar automatización total del sistema y garantizar el servicio en todo momento.

Cada sistema debe de tener un acercamiento diferente, no se puede hacer transversalidad entre los parámetros de un sistema con otro por más parecidos que estos sean.

En un estado futuro podemos esperar ahorros adicionales en los sistemas de recolección de polvos con la implementación del método 3. Además esta referencia será de utilidad para implementar las mismas metodologías en las distintas plantas el grupo después de demostrar el ahorro y su efectividad. Además los sistemas de filtros y sistemas de limpieza están en constante evolución, es importante estar pendientes de las mejoras en los sistemas y el estado del arte de estos.

## BIBLIOGRAFÍA

Astrom, K. J. (2002). *PID control*. Control System Design.

Boyer, S. A. (2009). *Scada: Supervisory Control And Data Acquisition*. ACM Digital Library.

- Building Automation Products, Inc. (2015). *Determining Air Flow in Cubic Ft./Min.* Gays Mills: BAPI - Application Note.
- CFE. (2005). *Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica.* México: Comisión Federal de Electricidad de México.
- Dolandson - Filtration Solutions. (s.d.). *Dolandson - Filtration Solutions.* Recuperé sur Presión diferencial: Qué Es y Por Qué Debe Tenerlo en Cuenta: <https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/technical-articles/differential-pressure-what-why-you-should-care/>
- Firing Industries Ltd. (2017). *5 Key Baghouse Maintenance Steps to Optimize Dust Collector Operations.* Edmonton: Firing Industries Ltd.
- Food, R. W. (2011). Affinity Laws. *Ashrae Journal*, 42.
- Glacier Technology, Inc. (s.d.). *Industrial Dust Collection.* Recuperé sur Engineered Solutions for: <https://www.glacier-technology.com/industrial-dust-collection/>
- IEEE. (1994). Are you certain you understand the economics for applying ASD systems to centrifugal loads? *Proceedings of 1994 IEEE/IAS Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference.*
- Johnson, C. D. (1997). *Process Control Instrumentation Technology.* Prentice Hall.
- O'Dwyer, A. (2009). *Handbook PI of PID controller tuning rules - 3rd edition.* Dublin: Imperial College Press.
- Rockwell Automation. (2014, August). Energy Savings with Adjustable Frequency Drives for Centrifugal Fans. *DRIVES-WP009D-EN-P – August 2014.* Milwaukee, Wisconsin, United States: Rockwell Automation, Inc.
- Salvador Escoda S.A. (s.d.). *Manual Práctico de Ventilación, 2da edición.* Barcelona: S & P Catálogo Técnico.
- Secretaría de Gobernación. (2019). *Diario Oficial de la Federación.* Recuperé sur Leyes y Reglamentos: <http://dof.gob.mx/>
- Streeter, V. (1971). *Fluid Mechanics 4th edition.* McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- Wayne C. Turner, S. D. (2007). *Energy Management Handbook.* Lilburn: The Fairmont Press, Inc.