

DISMINUCIÓN DE CONTAMINANTES AÉREOS EN UNA PLANTA DE BALANCEADOS MEDIANTE LA PROPUESTA DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE POLVO

Luis Buchelli Carpio^{1,*} y Miguel Reinoso Sánchez.²

Resumen

El presente proyecto trata sobre un sistema de extracción con polvo disperso en el aire, en el Departamento de envasado de una planta de balanceados para animales, ubicada en el Ecuador, y tiene por objetivo disminuir los incidentes de riesgos en la salud de los trabajadores y daños en las máquinas. En primer lugar, se verifica el cumplimiento de las normativas vigentes sobre el medioambiente y luego el estudio de las partículas contaminantes, su velocidad de captura y transporte en las tuberías; en función de estos parámetros se selecciona el sistema colector de polvo más adecuado y se calcula la potencia del ventilador que permita succionar el polvo sin capturar el producto granulado, para ello se utiliza el software libre de ventilación CASALS 60 Hz, para disminuir la concentración de material particulado en el ambiente. En base de los resultados del diseño fluido dinámico, se espera que las partículas capturadas puedan ser transportadas dentro del sistema de tuberías a una velocidad constante y la concentración de polvo en el ambiente se reduzca a niveles permisibles.

Palabras clave: Balanceado, contaminación del aire, extracción de polvo, diseño fluido dinámico.

Abstract

This project is about a system of dust extraction and dust dispersed in the packaging department of animal feed mill, located in Ecuador, our primary aim is to reduce the incidents of health risks for workers and damage to machinery. First meeting the current regulations on the environment, then the study of pollutant particles, speed of capture and transport in pipelines is verified; based on these parameters, the most suitable dust collecting system is selected and the fan power that allows sucking the dust without capturing the granulated product, the Fan CASALS software is used to reduce the concentration of particulate matter is calculated atmosphere. Based on the results of fluid dynamic design, it is expected that captured particles can be transported within the pipe system at a constant rate and the concentration of dust in the environment is reduced to allowable levels.

Keywords: Balanced pet feed, air pollution, dust extraction, fluid-dynamic design.

^{1,*}Diplomado en Seguridad Industrial y Salud Ocupacional - UNEMI, Ingeniero Mecánico, Máster (c) en Automatización y Control Industrial – ESPOL, Director de carrera de Ingeniería Industrial – UNEMI. Autor para correspondencia ✉: luis.buchelli@gmail.com

²Doctor en Física. Docente en las carreras de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Sistemas, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, UNEMI.

Recibido: 03-09-2014, Aprobado tras revisión: 21-10-2014

Forma sugerida de citación: Buchelli, L.; Reinoso, M. (2014). “Disminución de contaminantes aéreos en una planta de balanceados mediante la propuesta de un sistema de extracción de polvo”. INGENIUS. N.º 12, (Julio-Diciembre). pp. 5-14. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Toda planta industrial que envasa producto granulado como balanceado para animales, arroz, azúcar, cemento, entre otros, tendrá problemas de generación de polvo, ya sea en el transporte o en el ingreso a la máquina de envasado [1]. El polvo generado, que se encuentra disperso en el aire, llega a producir riesgos en la salud de las personas que trabajan en ese lugar [2], molestias a los demás departamentos y posiblemente a los vecinos; además, puede acarrear daños en la maquinaria como mal funcionamiento de las tarjetas electrónicas, atascamiento en los elementos mecánicos en movimiento y hasta explosión de material particulado (al haber descargas electrostáticas en el sistema por la fricción de las partículas al moverse dentro de la tubería) [3], en especial a los que están compuestos de aceites como por ejemplo, la harina de pescado.



Figura 1. Trabajadores expuestos a material particulado en la planta de balanceados “MARINER”, Durán, Ecuador.

La inhalación de material particulado de tamaño menor a $10\ \mu\text{m}$ (PM10), afecta negativamente al cuerpo humano, particularmente a los pulmones, la piel y los ojos, además, disminuye el ritmo de trabajo por falta de visión y aumenta el riesgo de accidentes; en la Tabla 1 se puede observar las consecuencias de la inhalación en función de la concentración de material particulado en el ambiente.

Tabla 1. Efectos en la salud humana por exposición de material particulado menor a PM10 [2].

| Concentración (mg/m^3) | Efecto observado | Impacto |
|--|---|-----------|
| 200 | Disminución capacidad respiratoria | Moderado |
| 250 | Aumento de enfermedades respiratorias en ancianos y niños | Moderado |
| 400 | Afecta a toda la población | Grave |
| 500 | Aumento de mortalidad en adulto mayor y enfermos | Muy Grave |

El primer paso para poder llegar a una solución, es determinar el tipo y tamaño de partícula que se está envasando y la cantidad de flujo en masa como contaminante que se emite al ambiente.

Para ello es necesario realizar la limpieza de toda el área contaminada diariamente y registrar la masa sedimentada al final del día mediante balanzas, con lo que se obtiene el flujo másico del contaminante; luego, mediante tamices se procede a cernir las muestras por rangos de diámetros y mediante cálculos estadísticos se determina el diámetro promedio de la partícula a ser capturada.

Las partículas que se emiten como contaminantes se las debe introducir hacia una campana de captación que permitirá succionarlas y enviarlas a la tubería principal a una determinada concentración y velocidad. Un valor muy alto de concentración de polvo para balanceados derivados del maíz mayor al 3.8% ($45\ \text{g}/\text{m}^3$), implica riesgos de explosión [3]. Un valor adecuado para la relación masa de partículas con respecto al aire debe ser menor al 1%.

Con la relación masa partícula/masa de aire, se determina la cantidad de caudal de aire que debe transportar a las partículas y mediante cálculos físicos o mediante un software se encuentra la presión que hay que vencer para trasladar a las partículas.

Existen varios sistemas que atrapan el material particulado y expulsan el aire a la atmósfera en forma limpia; se pueden clasificar en: sedimentación por gravedad, impacto, fuerza centrífuga, intercepción directa, efectos electrostáticos; los mismos que determinan el tipo de equipo de recolección adecuado para la aplicación requerida [1]. A continuación se presentan las cinco clases básicas de equipos de colección de partículas con sus características principales de operación [4].

1.1. Cámaras de sedimentación por gravedad

Son equipos que sirven como paso previo de una depuración más fina, extraen polvo mayor a $50\ \mu\text{m}$; el esquema del funcionamiento puede verse en la Figura 2; el aire con polvo, entra en la cámara, disminuyendo

su velocidad, con lo que una parte de las partículas abandonan la corriente de aire debido a la fuerza gravitatoria cayendo al fondo del recipiente.

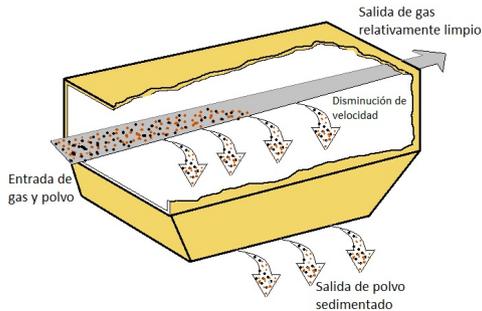


Figura 2. Sistema de sedimentación de polvo [1].

1.2. Separadores por fuerza centrífuga, ciclones

Este tipo de sistema puede ser representado en la Figura 3, el aire cargado de polvo entra en forma tangente por la parte superior cilíndrica. El aire contaminado, sigue una trayectoria en espiral, hacia el fondo del cono, separando las partículas del aire, luego asciende aire depurado por el centro del mismo hacia la parte superior [5].

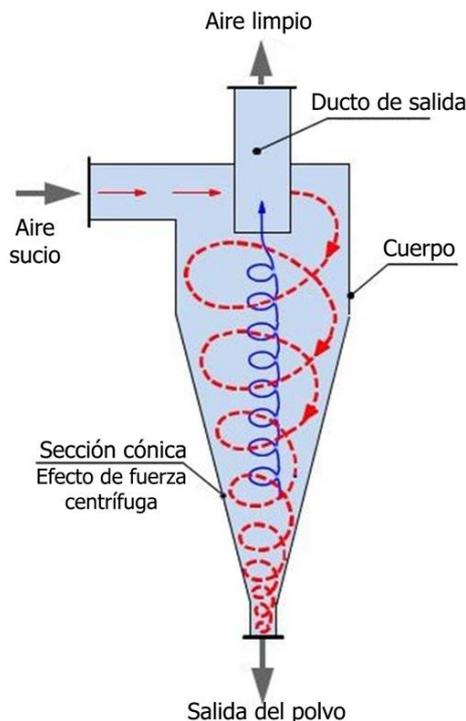


Figura 3. Funcionamiento de un ciclón [2].

1.3. Intercepción directa, filtros de tela

Su mecanismo de colección, es a través de intercepción directa e impacto y por inercia [6], por lo que puede

separar una gama amplia de tipos de polvos como puede verse en la Figura 4.

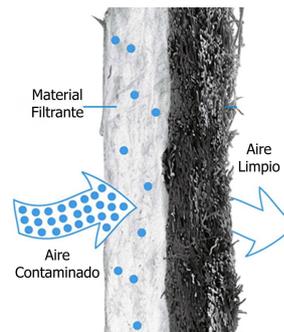


Figura 4. Funcionamiento de los filtros de tela [7].

1.4. Precipitadores electrostáticos

Su mecanismo de colección es por fuerzas electrostáticas inducidas por una carga eléctrica y un electrodo colector de polaridad opuesta y representado en la Figura 5. Se usa para remover partículas de diámetros entre 0.05 y 20 μm , con una alta eficiencia; pero para partículas de resistencia magnética apreciable, los costos se elevan y se torna ineficiente [8].

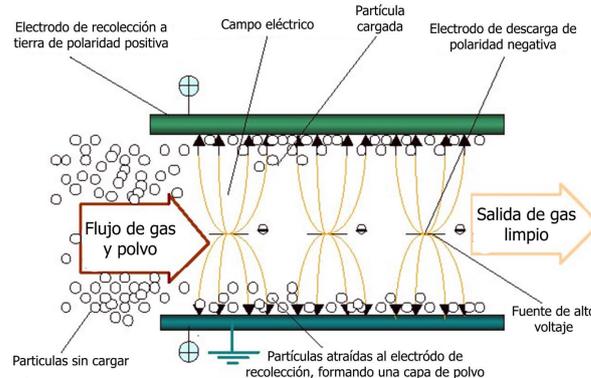


Figura 5. Esquema de un filtro electrostático [1].

1.5. Tipo de limpieza para los filtros de mangas

El tipo de limpieza para los filtros de mangas puede ser clasificado en los siguientes métodos principales: agitación por vibración mecánica, aire reverse con inversión del caudal del ventilador, chorro pulsante de aire comprimido desde la parte superior de la manga, limpieza por bocinas sónicas [9].

La normativa vigente indica que ningún contaminante debe salir del establecimiento [10], por lo que es necesario seleccionar un equipo que permita capturar el polvo contaminante, contenerlo y colocarlo en zona de tratamiento de desechos o su re procesamiento; a la vez que permita a la máquina limpiarla en forma continua. Los pasos se ilustran en la Figura 8.

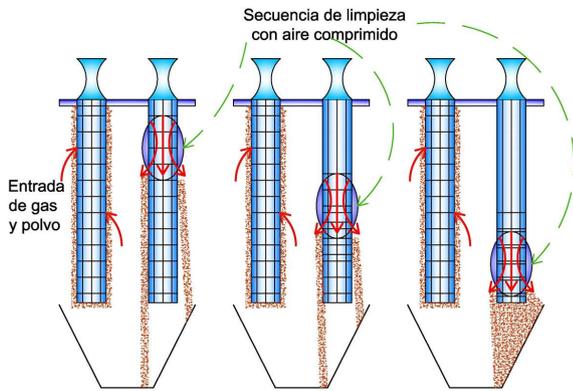


Figura 6. Funcionamiento del sistema de limpieza por chorro pulsante.

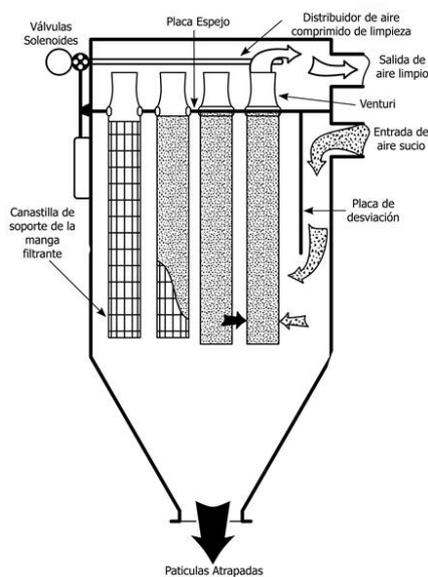


Figura 7. Colector de polvo de mangas filtrantes y limpieza chorro pulsante [11].

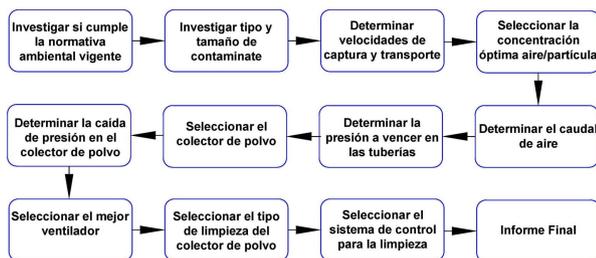


Figura 8. Metodología de diseño.

2. Materiales y métodos

2.1. Determinar el tipo y tamaño de contaminante

Para determinar la concentración de partículas en el aire se utiliza el equipo Micro Dust Pro; realizando

el análisis en el sitio; se encontró que incumple la normativa ambiental local vigente [10] con un valor de 303 mg/m^3 , donde máximo puede ser 150 mg/m^3 . Por lo que se justifica que se instale un sistema de extracción de polvo.

El promedio de la concentración de material particulado PM10 de todas las muestras en un año no deberá exceder de 50 mg/m^3 . La concentración máxima en 24 horas de todas las muestras recolectadas no deberá exceder de 150 mg/m^3 , y no podrá ser excedida más de dos veces en el año.

Tabla 2. Datos de medición de polvo en el departamento de envasado.

| Área | | Departamento de Envasado (entrada) | |
|-----------------|-----------------|------------------------------------|--|
| Fecha: | | 01/08/2013 | |
| Tiempo: | | 15 minutos | |
| Hora de inicio: | | 10:45 | |
| Hora Final | | 11:01 | |
| Sensor | PM 10 | ST | |
| Unidades | mg/m^3 | mg/m^3 | |
| Mínimo | 0 | NR | |
| STEL | 0 | NR | |
| Medios | 205 | NR | |
| PICO | 303 | NR | |

| Área | | Departamento de Envasado (fondo) | |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|--|
| Fecha: | | 01/08/2013 | |
| Tiempo: | | 15 minutos | |
| Hora de inicio: | | 11:05 | |
| Hora Final | | 11:16 | |
| Sensor | PM 10 | ST | |
| Unidades | mg/m^3 | mg/m^3 | |
| Mínimo | 0 | NR | |
| STEL | 0 | NR | |
| Medios | 180 | NR | |
| PICO | 220 | NR | |

Se realizó la recolección de polvo en diferentes días de todo el Departamento de envasado, el cual es totalmente cerrado, por medio de limpieza mecánica a las paredes y pisos, en la Tabla 3, se muestra el registro de los datos encontrados.

Tabla 3. Polvo recogido en la limpieza al final del día.

| Fecha | Total recogido/día (kg) | Fecha | Total recogido/día (kg) |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 26/09/2013 | 87,5 | 11/10/2013 | 97,5 |
| 27/09/2013 | 86,5 | 15/10/2013 | 86,5 |
| 28/09/2013 | 76 | 17/10/2013 | 102 |
| 29/09/2013 | 83 | 19/10/2013 | 105 |
| 30/09/2013 | 86 | 20/10/2013 | 82 |
| 03/10/2013 | 71 | 21/10/2013 | 91 |
| 04/10/2013 | 90,5 | 22/10/2013 | 90,5 |
| 08/10/2013 | 87 | 23/10/2013 | 87 |
| Promedio recogido/día | 88,2 | Flujo máscico/20h (kg/h) | 4,4 |

Tabla 4. Porcentaje de producción diaria en cada una de las envasadoras [12].

| Cantidad | Máquina | Promedio de producción diaria (kg) | Porcentaje (%) |
|-------------------|-----------------|------------------------------------|----------------|
| 1 | Envasadora 10kg | 4813 | 9,6 |
| 1 | Envasadora 10kg | 8806 | 17,6 |
| 1 | Envasadora 20kg | 11364 | 22,8 |
| 1 | Envasadora 20kg | 11060 | 22,1 |
| 2 | Envasadora 40kg | 13899 | 27,8 |
| Total (kg) | | 49942 | 100 |

Con las muestras de polvo recolectadas se realiza el tamizado en una máquina granulométrica que tenga diferentes tipos de mallas y se mide su masa en cada tamiz, encontrándose lo siguiente:

Para ciertos tipos de material particulado, la distribución de su tamaño se acerca a una distribución normal o gaussiana [13].

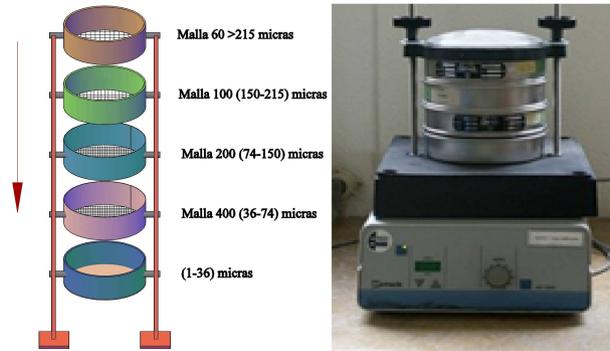


Figura 9. Proceso de tamizado en maquina vibratoria granulométrica para determinar rangos de partículas [14].

Se conoce que muchas partículas como polvos muestran una distribución logarítmica normal, cuando el logaritmo del porcentaje acumulado de las masas muestreadas de las partículas se traza contra el logaritmo del diámetro de la partícula [15] y por lo tanto, los diámetros medios y medios aritméticos son iguales; la cual está caracterizada por dos parámetros: el medio geométrico (diámetro medio) y su desviación estándar geométrica que están relacionados entre sí a través de:

$$\log(d_{84.13}) = \log(d_{50}) + \log(\sigma_\epsilon) \quad (1)$$

$$\log(d_{15.9}) = \log(d_{50}) - \log(\sigma_\epsilon) \quad (2)$$

Donde:

$d_{84.13}$: Diámetro de las partículas que constituyen el 84.1% en masa.

d_{50} : Diámetro medio geométrico.

$d_{15.9}$: Diámetro de las partículas que constituyen el 15.9% en masa.

σ_ϵ : Desviación estándar.

Las ecuaciones pueden escribirse juntas:

$$\sigma_\epsilon = \frac{d_{84.13}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{15.9}} \quad (3)$$

Los datos de las seis muestras de la Tabla 5, de tamaños de partículas y de porcentaje de fracción de masa acumulada obtenidos, se grafican en el con ejes logarítmicos y se procede a leer el diámetro que corresponde al 50% de la fracción de masa acumulada (d_{50}) y el valor en $d_{84.13}$ para obtener la desviación estándar que pueden verse en la Figura 10.

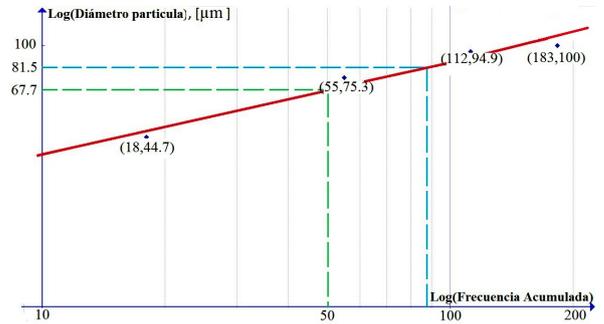


Figura 10. Gráfico log(porcentaje acumulado) vs. log(diámetro medio).

Encontrándose que el diámetro promedio es 67.7 µm y la desviación estándar de 1.2 µm (81.5/67.7) µm.

2.2. Determinación de velocidades de captura y transporte

Las partículas contaminantes para que puedan ingresar a la tubería y ser aspiradas, necesitan una determinada velocidad de captura; la misma que se la puede obtener mediante la Figura 11; la velocidad mínima es de 0.15 m/s para una partícula de balanceado con densidad relativa cercana a 1.

La velocidad de transporte se obtiene por medio de la Figura 12, con un valor de 10.2 m/s para que las partículas sean conducidas y no se sedimenten dentro de las tuberías.

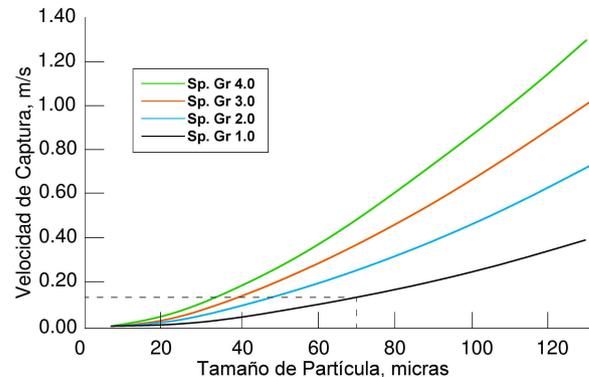


Figura 11. Velocidad de captura para diferentes tamaños de partículas y densidades relativas [16].

Tabla 5. Tamizado de las muestras de polvo recolectadas.

| Tamiz (μm) | Diámetro (μm) | Diámetro medio (μm) | Muestra (g) | | | | | | Promedio masa (g) | Porcentaje | Porcentaje acumulado |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|------------|-------------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | |
| 60-100 | 150-215 | 183 | 316 | 296 | 306 | 302 | 292 | 322 | 305 | 44,7 | 44,7 |
| 200 | 74-150 | 112 | 216 | 206 | 212 | 218 | 204 | 196 | 209 | 30,6 | 75,3 |
| 400 | 36-74 | 55 | 143 | 130 | 135 | 121 | 117 | 158 | 134 | 19,6 | 94,9 |
| < 400 | 0-36 | 18 | 25 | 45 | 36 | 31 | 33 | 37 | 35 | 5,1 | 100,0 |
| | | | 700 | 677 | 689 | 672 | 646 | 713 | 683 | 100,0 | |

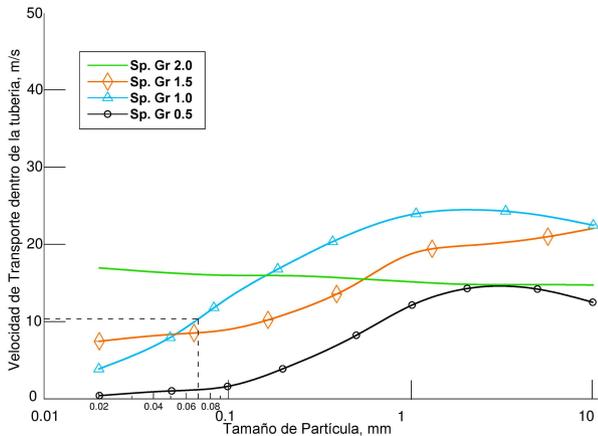


Figura 12. Velocidad de transporte en conductos para diferentes tamaños y densidades específicas de partículas [16].

3. Diseño del colector de polvo

3.1. Concentración óptima partícula/aire y caudal de aire requerido

Una buena relación para que las partículas sean transportadas sin ningún tipo de problema es una relación de concentración de 0.15% en masa [17].

$$R = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} \quad (4)$$

$$Q_f = \frac{\dot{m}_p}{\rho R} \quad (5)$$

Donde:

R : Es la relación en masa de las partículas y el aire de transporte.

\dot{m}_p : Flujo de masa de partículas de contaminante a extraer.

\dot{m}_f : Flujo de masa de aire que permite extraer el contaminante.

Q_f : Caudal total de aire necesario para extraer el contaminante.

ρ : Densidad del aire a la presión y temperatura.

Como el lugar se encuentra al nivel del mar y temperatura de 27 °C, la densidad del aire es

1.17 kg/m³ [18], el caudal de aire total es de 2507 m³/h. De acuerdo con la Tabla 2, el caudal debe ser proporcional a la cantidad de producción de cada máquina, por lo que se encuentra:

3.2. Presión a vencer en las tuberías de transporte

Para seleccionar los diámetros de las tuberías en el sistema se necesita de las dimensiones del lugar y restringir que las velocidades en las tuberías no sean menores a 10 m/s.

Con el software libre de ventilación CASALS 60 Hz [18], se obtienen los diámetros comerciales y también la caída de presión total del sistema en las tuberías con un valor de 72.56 mm H₂O, de tal manera que el software lo calcula por el método de velocidad constante.

Tabla 6. Cantidad de caudal requerida en cada máquina para aspirar las partículas.

| Máquina ensasadora (kg) | Porcentaje (%) | Caudal necesario (m ³ /h) |
|----------------------------|----------------|---|
| 1/2 | 9,6 | 241,6 |
| 1 | 17,6 | 442,1 |
| 2 | 22,8 | 570,5 |
| 5 | 22,1 | 555,2 |
| 25 | 27,8 | 697,7 |
| | 100 | 2507 |

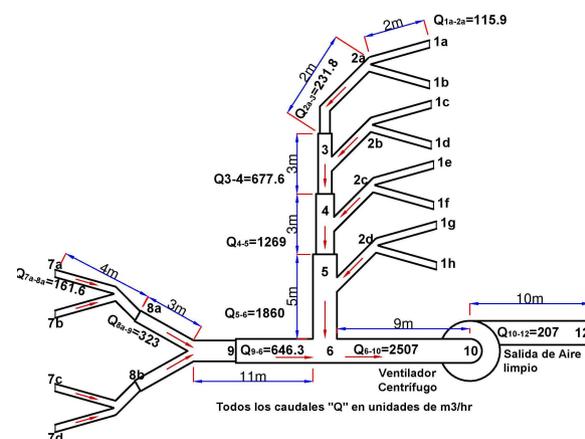


Figura 13. Dimensiones para el sistema de extracción de la fábrica de balanceados.

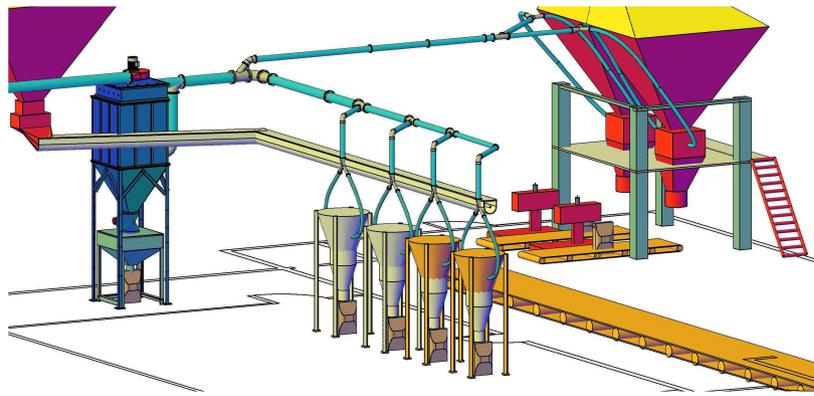


Figura 14. Propuesta de instalación para el sistema de extracción de polvo realizada en AutoCad®.

Con toda la información recabada tanto analítica, experimental y numérica, se propone el siguiente diseño para el sistema de extracción de polvo, ver Figura 14.

3.3. Selección del colector de polvo

El criterio de selección del equipo va orientado a la recolección continua y seca, de pequeñas dimensiones, fácil mantenimiento a un costo no muy elevado y captación de partículas de hasta 5 μm . Se escoge a los filtros de manga como los más adecuados de acuerdo con nuestra matriz de decisión.

3.4. Tipo de limpieza del colector de polvo

El criterio para seleccionar la limpieza de la manga, considerando que el filtro opere continuamente y ocupe un espacio relativamente pequeño con un costo moderado, es el tipo chorro pulsante; de acuerdo con el criterio de selección, como se muestra en la Tabla 9.

3.5. Dimensionamiento del colector de polvo

Los colectores de polvo, con filtros de mangas tipo chorro pulsante, son diseñados de acuerdo con las siguientes variables: la caída de presión a través de las mangas, la relación aire/tela, caudal requerido y eficiencia de colección, la cual normalmente es mayor que 99.9%, recolectando un tamaño de partículas mayor a 5 μm .

3.6. Parámetros de diseño del colector

El conjunto de manga y canastilla, que se va a usar es del tipo cilíndrico de diámetro 5" y 50" de longitud, debido a su mayor uso en el mercado ecuatoriano; además, el colector se lo diseñará en forma rectangular, dado el poco espacio en el lugar seleccionado y su facilidad de construcción. Otro parámetro necesario son las condiciones de entrada del flujo de aire a filtrar, como caudal, concentración de partículas, temperatura, el diámetro de partículas y el tipo de partículas a colectar; datos resumidos en la Tabla 10.

3.7. Número de mangas

El área total de filtrado de las mangas, será igual a la relación entre el caudal filtrado y la velocidad de filtración o relación gas/tela dado en la Tabla 11.

Tabla 9. Selección del sistema de limpieza del colector.

| Tipo de limpieza | Funcionamiento continuo | Colección continua | Costo | Tamaño reducido | Total |
|----------------------|-------------------------|--------------------|-------|-----------------|-------|
| Calificación máxima | 30 | 30 | 15 | 25 | 100 |
| Vibración mecánica | 15 | 15 | 4 | 45 | 79 |
| Aire reverso | 15 | 15 | 11 | 4 | 45 |
| Chorro aire pulsante | 30 | 30 | 7 | 19 | 86 |
| Bocina sónica | 30 | 22 | 7 | 19 | 78 |

Tabla 10. Condiciones del aire a filtrar.

| | |
|------------------------|--|
| Tipo de polvo: | Balanceado |
| Diámetro de partícula: | 67 μm |
| Caudal requerido: | 2507 m^3/h (1503 cfm) |
| Concentración asumida: | 2,2 grano/ m^3 (1.0 grano/ pie^3) |
| Temperatura del gas: | 27°C (80°F) |

Tabla 11. Valores para velocidad de filtración gas/tela [19].

| Material contaminante | Pulso de aire (pie/min) | Vibración mecánica (pie/min) |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| Alúmina | 8 | 2,5 |
| Asbesto | 10 | 3 |
| Carbón | 5 | 1,5 |
| cemento | 8 | 2 |
| Arcilla | 9 | 2,5 |
| Hulla | 8 | 2,5 |
| Cocoa | 12 | 2,8 |
| Granos | 14 | 3,5 |
| Fertilizante | 8 | 3 |
| Harina | 12 | 3 |
| Cenizas | 5 | 2,5 |
| Grafito | 5 | 2 |
| Yeso | 10 | 3 |
| Polvo de cueros | 12 | 3,5 |

Tabla 7. Matriz de decisión de selección del equipo colector de polvo.

| Tipo de colector | Captura partículas menor a 100 μ | Eficiencia | Colección continua y seca | Tamaño del colector | Mantenimiento | Costo | Total |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------|---------------------------|---------------------|---------------|-------|-------|
| Calificación máxima | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 | 100 |
| Cámara de sedimentación | 10 | 6 | 7 | 0 | 15 | 15 | 53 |
| Ciclón | 15 | 18 | 15 | 11 | 11 | 11 | 81 |
| Colector húmedo | 20 | 18 | 0 | 11 | 11 | 7 | 67 |
| Precipitador electrostático | 15 | 18 | 7 | 10 | 9 | 5 | 64 |
| Filtro de mangas | 20 | 25 | 15 | 12 | 12 | 7 | 91 |

Tabla 8. Resumen de diámetros calculados por cada tramo de tubería para velocidad constante no menor a 10.3 m/s.

| Tramo | Long (m) | Diámetro (mm) | Presión total (mm H ₂ O) | Velocidad en el conducto (m/s) | Caudal calculado (m ³ /h) | Caudal mínimo (m ³ /h) | Máquina | Diferencia de caudal (%) |
|-----------------------------|----------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------|--------------------------|
| 1a-2a/1b-2a | 4 | 63 | -13.88 | 10.3 | 115.9 | | | |
| 1c-2b/1d-2b | 2 | 80 | -8 | 12.3 | 222.9 | | | |
| 1e-2c/1f-2c | 2 | 80 | -13.91 | 16.3 | 295.7 | | | |
| 1g-2d/1h-2d | 4 | 80 | -17.18 | 16.4 | 295.8 | | | |
| 2a-3 | 4 | 80 | -29.18 | 12.8 | 231.8 | 241.6 | 1/2 Kg | -4.1 |
| 2b-3 | 4.5 | 100 | -28.01 | 15.8 | 445.9 | 442.1 | 1 Kg | 0.9 |
| 2c-4 | 3 | 125 | -36.34 | 13.4 | 591.4 | 570.5 | 2 Kg | 3.7 |
| 2d-5 | 4 | 125 | -43.8 | 13.4 | 591.7 | 555.2 | 5 Kg | 6.6 |
| 3-4 | 3 | 150 | -49.83 | 10.7 | 677.6 | | | |
| 4-5 | 3 | 200 | -52.79 | 11.2 | 1269.1 | | | |
| 5-6 | 5 | 250 | -55.62 | 10.5 | 1860.7 | | | |
| 6-10 | 9 | 250 | -69 | 14.2 | 2507.0 | | | |
| 9-6 | 11 | 150 | -59.83 | 10.2 | 646.3 | 697.7 | 25 Kg | -7.4 |
| 8a-9 | 4 | 100 | -37.69 | 11.4 | 323.1 | | | |
| 7a-8a / 7b-8a 7c-8b / 7d-8b | 4 | 63 | -18.34 | 14.4 | 161.6 | | | |
| 10-12 | 10 | 250 | 15.17 | 14.2 | 2507.0 | | | |

$$A_{\text{total}} = \frac{\text{Caudal requerido}}{\text{Velocidad de filtración}} \quad (6)$$

$$A_{\text{total}} = \frac{1503 \text{ pie}^3/\text{mm}}{14 \text{ pie}/\text{min}} \quad (7)$$

$$A_{\text{total}} = 107.3 \text{ pie}^2 \quad (8)$$

El área de una sola manga, de diámetro 125 mm (5") y 1.27 m (50") de longitud, será la siguiente:

$$A_{\text{manga}} = \frac{150 \pi D L}{144} \quad (9)$$

Donde:

A_{manga} : Área de la tela filtrante (pie²)
 D : aire de transporte.
 \dot{m}_p : Diámetro de la manga filtrante (")
 L : Longitud de la manga filtrante (")

$$A_{\text{manga}} = 5.45 \text{ pie}^2 \quad (10)$$

Entonces, el número de mangas que se requiere es:

$$N_{\text{mangas}} = \frac{A_{\text{total}}}{A_{\text{manga}}} \quad (11)$$

$$N_{\text{mangas}} = 19 \quad (12)$$

Por el número de mangas requeridas y como el colector va a ser de forma rectangular, se determina que el arreglo será de 4 x 5 mangas.

3.8. Caída de presión en el colector

Para determinar la caída de presión en el colector de polvo se recurre al modelo matemático [20]:

$$\Delta P = 6.08 V_f P_j^{-0.65} + K_2 V_f^2 C_i / \Delta t \quad (13)$$

Donde:

P_j : Caída de presión en el colector (” H₂O).
 V_f : Velocidad de filtración gas/tela (adimensional).
 P_j : Presión de aire comprimido del chorro pulsante (psig).
 K_2 : Coeficiente de resistencia específico del polvo. [(” H₂O/pie)/(pie/min)/(lb/pie²)].
 Δt : Tiempo de filtración en minutos.
 C_i : Concentración del polvo de entrada al filtro (lb/pie³).

Los valores típicos para K_2 pueden variar de 1 a 10, se asumirá un valor de 10 [19]. Las concentraciones típicas de entrada varían desde 0.5 granos/pie³ a más de 10 granos/pie³, se asumirá 1 grano/pie³ (7000 granos = 1 lb).

Los tiempos de filtración típicos que se encuentran con mayor frecuencia varían de 3 a 30 minutos, se asumirá 5 minutos. Tomando un tiempo de filtración de 5 minutos, y los valores seleccionados por la válvula de 250 ms de limpieza y 110 psi de presión de pulso:

$$\Delta P = 6.08 \cdot 12 \cdot 110^{-0.65} + 10 \cdot 12^2 \cdot \frac{5}{7000} \quad (14)$$

$$\Delta P = 4.46'' \text{ H}_2\text{O} \quad (113.3 \text{ mm H}_2\text{O}) \quad (15)$$

Este valor corresponde a la caída de presión a lo largo del colector, el cual incluye caídas de presión en las tuberías, en el colector de polvo, a través de la tela y en la capa de polvo; como la velocidad de filtración en el interior del colector es muy pequeña, la caída de presión a través de la estructura es despreciable; obteniéndose una presión total a vencer de 185.9 mm H₂O.

3.9. Selección del ventilador

Con los datos de presión total y caudal requerido por el sistema, por medio del software libre de CASALS, se selecciona el ventilador centrífugo de máximo rendimiento, de 3 HP de potencia (2.2 KW), marca CASAL MZRU350, el cual entrega una presión total de 186 mm H₂O cuando produce un caudal de 2507 m³/h, y máxima eficiencia (75.86%).

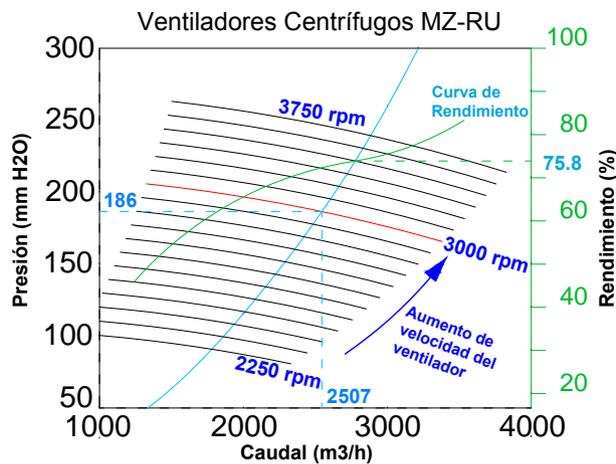


Figura 15. Ventilador seleccionado con sus curvas características [18].

4. Resultados y discusión

La planta envasadora no cumple en un 202% las normas locales vigentes, según mediciones realizadas con el instrumento micro Dust-Pro, certificado hasta el año 2014.

En un día completo se recolectan en promedio 87.7 kg de polvo que se precipitan al suelo, sin considerar lo que se adhiere a las paredes.

El diámetro de la partícula promedio encontrada es de 67 μm y se requiere una velocidad de captura de 0.15 m/s, en la práctica es suficiente una velocidad de

captura de 0.25 m/s; por lo que es necesario que en los lugares donde se conecten las bocas de aspiración el valor de velocidad de captura no sea menor al sugerido.

La velocidad de transporte debe ser mayor a 10 m/s para que las partículas no se sedimenten; se debe también adicionar un variador de frecuencia al motor eléctrico del ventilador para graduar el caudal real para transportar las partículas, y medir las velocidades mediante sonda Pitot o anemómetros.

El *software* libre utilizado permite realizar el diseño rápidamente y encontrar las presiones totales del sistema, su velocidad, el caudal de aire requerido y sus diámetros comerciales.

La presión a vencer en el colector es 56% más grande que la presión total de las redes de las tuberías.

No usar registros de regulación de caudal en las tuberías; la presión calculada para el sistema de extracción es la correcta para mantener la velocidad en los conductos y bocas de captación.

5. Conclusiones

El sistema de extracción de polvo de mangas filtrantes, puede recolectar partículas de hasta 5 μm , permitiendo que las 12 personas que se encuentran en este lugar disminuyan los riesgos de contraer enfermedades ocupacionales del tipo pulmonar, problemas en los ojos y en piel, con lo cual permitirá cumplir la normativa legal vigente del medio ambiente de trabajo.

Para concentraciones por encima de 45 g/m³ de polvo y aire en el interior de la tubería, esta se torna explosiva y es conveniente añadir un sistema anti explosión en el cuerpo del colector; además, las tuberías deben ser en acero galvanizado, aterrizada y evitar la producción de chispas.

La caída de presión en la red de tuberías es de 72.56 mm H₂O y en el colector de polvo 113.3 mm H₂O, por lo tanto, para diseñar un sistema de extracción, se debe tener en cuenta las caídas de presión en la red de tuberías, determinar el flujo másico de polvo que se libera al ambiente y la producción de las máquinas envasadoras, logrando determinar el flujo de aire requerido en el sistema y en los equipos.

Es necesario incluir un PLC, que permita de manera automática, inyectar en el tiempo exacto la presión de chorro de aire pulsante para realizar la limpieza, que debe ser medida por la presión diferencial entre la parte externa de la manga y el interior del colector de polvo.

Referencias

- [1] S. Escoda, *Manual práctico de ventilación*. Barcelona: Soler & Palau, 2014.
- [2] A. Muñoz, C. Quiroz, and J. J. Paz, “Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos,” Master’s thesis, Universidad de Antioquia, Colombia, 2006.
- [3] N. Botta. (2002) Explosiones polvo en plantas de cereales. Red Proteger. Argentina. [Online]. Available: <http://www.redproteger.com.ar/>
- [4] Environmental Protection Agency (EPA). (2010) Mechanical collectors. [Online]. Available: <http://www.epa.state.oh.us/portals/27/engineer/eguides/mechanic.pdf>
- [5] ——. (2012) Cyclones. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/ttnecat1/dir1/fcyclon.pdf>
- [6] ——. (2012) Fabric filter - pulse-jet cleanes type. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/ttnchie1/mkb/documents/ff-pulse.pdf>
- [7] General Electric. Benefits of surface vs. depth filtration. [Online]. Available: http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/air_filtration/benefits_of_surface_vs_depth_filtration.jsp
- [8] Environmental Protection Agency (EPA). (2012) Dry electrostatic precipitator (esp) - wire-plate type. [Online]. Available: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1008OHL.PDF?Dockey=P1008OHL.PDF>
- [9] ——. (2012) Paper / nonwoven filters. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/ttnecat1/dir1/ff-cartr.pdf>
- [10] Ministerio del Medio Ambiente del Ecuador. (2010) Legislación secundaria del medio ambiente del Ecuador. Ministerio del Medio Ambiente del Ecuador. Quito.
- [11] NESCO. Jet III type dust collectors. Nesco - India. [Online]. Available: <http://www.nesco.in/documents/JET%20III%20DUST%20COLLECTORS.pdf>
- [12] Mariner - Departamanto de producción, “Producción diaria de balanceado en las envasadoras,” 2013.
- [13] M. Fernández. (2014) Sólidos pulvurentos. [Online]. Available: http://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/polvos.pdf
- [14] ESPOL. (2013) Máquina tamizadora granulométrica. Ciencias de la Tierra, Ingeniería Civil. Guayaquil.
- [15] Universidad de Piura. (2008) Sedimentación. Perú.
- [16] A. Khamal. (2001) Classify particles using fluidized beds. AIChE. [Online]. Available: <http://www.aiche.org/resources/publications/cep/2001/september/classify-particles-using-fluidized-beds>
- [17] Universidad Nacional de la Plata, Departamento de Química. (2009) Transporte neumático. [Online]. Available: http://www.ing.unlp.edu.ar/dquimica/paginas/catedras/iofq809/apuntes/Transporte_Neumatico.pdf
- [18] CASALS. (2012) Programa de cálculo y selección de ventiladores. [Online]. Available: <http://www.casals.tv/descargas.html>
- [19] GRAPH. (2012) GRAPH. GNU General Public License (GPL) v 4.4.2. [Online]. Available: <https://www.padowan.dk/download/>
- [20] Environmental Protection Agency (EPA). (1998) Controles de materia particulada. New York. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/ttnecat1/dir1/pmcontech2.pdf>