

Proposal for the redesign of local exhaust systems

Vanessa Hurtado ^a , Francisco Santoro ^a , José Alejandro Gómez ^a ,
Ángel Almarza–Morales ^{*,b} 

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

^bDepartamento de Computación, Estudios Básicos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.459>

Abstract.- This paper establishes a method focused in an exhaustive diagnosis guide for the subsequent design phase. The methodology is focused in local exhaust systems with tapered ducts and fabric collectors as the filtration component. The “redesigning task” may present higher levels of uncertainty that the development of a new model given the diverse factors implied in the use of existing resources; sometimes, those are already installed and operating. With the aim of settling guidelines that direct the comprehensive analysis of the system and its components, a framework is proposed for a structured and straight-forward process. This process takes into account calculations over each of the system components, by this mean, qualitative and quantitative design variables are combined for a detailed analysis. Also, it is considered a graphic method for pressure loss calculations as an instrument to analyze the system through time.

Keywords: Bag house filter; powder material; redesign; local exhaust system; fabric collector.

Propuesta para el rediseño de sistemas de aspiración por extracción localizada

Resumen.- El presente trabajo desarrolla un método enfocado en establecer una guía de diagnóstico para una posterior etapa de diseño. La metodología se enfoca en sistemas de extracción de diámetro progresivo que disponen de separadores de tejido como elementos de filtración. La labor de “rediseñar” puede presentar mayores incertidumbres que un nuevo prototipo dada la variedad de factores derivados de utilizar herramientas ya existentes; en muchos casos, inclusive actualmente instaladas y ya en operación. Con el objetivo de plantear directrices que encaminen el análisis integral e individual de los componentes, se presenta una estructura para un proceso ordenado y claro soportado en una base de cálculo que considera a cada uno de los componentes. De esta forma se combinan elementos cuantitativos y cualitativos de diseño para un análisis detallado. Asimismo, se considera un método gráfico para los cálculos de caída de presión como instrumento de análisis del sistema en el tiempo.

Palabras clave: filtro de mangas; material particulado; polvos; rediseño; sistema de aspiración; extracción localizada.

Recibido: 07 de enero, 2023.

Aceptado: 24 de abril, 2023.

1. Introducción

Los sistemas de extracción localizada se basan en el principio de la eliminación de contaminantes generados en un área, mediante el barrido de un espacio con grandes cantidades de aire, o muy cerca, de su origen.

La función de un sistema de extracción es la de evitar la dispersión, pérdidas y acumulación de material. La presencia de polvo en el aire representa una clara contaminación del medio, teniendo en cuenta que el material puede aportar características nocivas para el ser humano y los equipos [1]. Los sistemas de extracción se fundamentan en el movimiento del material suspendido en un flujo de aire, entre distancias horizontales y verticales.

En este sentido, Buchelli y Reinoso [2] destacan la importancia de la verificación del cumplimiento de normativas vigentes sobre medioambiente y el estudio de los parámetros característicos del

* Autor para correspondencia:

Correo-e: adalmarza@uc.edu.ve (A. Almarza)

material a desplazar, como la velocidad de captura y transporte, el sistema colector de polvo y la potencia del ventilador. Paralelamente, Carmona [3], coincide en el hecho que los sistemas de extracción son de vital importancia desde el punto de vista de la seguridad y salud en el medioambiente de trabajo, y por tanto requieren un riguroso detalle en términos de su diseño y validación.

En cuanto al diseño de un sistema de extracción, Serrano [4] recomienda que la maquinaria se mantenga en su lugar dentro de la planta, ya que el movimiento de esta puede implicar el cambio total del sistema de tuberías lo cual afecta sustancialmente los costos del proyecto. Por su parte, Zarei y sus colaboradores [5] expresan que el estudio y diseño de este tipo de sistemas debe basarse en principio en los estándares sin dejar de lado la eficiencia económica, teniendo como norte el control de contaminantes.

Chitaru y colaboradores [6], expresan que la optimización de un sistema de aspiración existente puede ejecutarse empleando CFD (Diseño asistido por computador) para evaluar y ponderar la efectividad de las opciones de mejora que se propongan, teniendo como premisa la importancia de estas soluciones para la salud en el medioambiente de trabajo.

2. Metodología

El proceso que permite abordar la problemática de un sistema de extracción que no satisface las características para las cuales fue diseñado en principio o que ha sido alterado en su configuración de forma improvisada, generando por un lado pérdidas que afectan la productividad y paralelamente efectos nocivos para la salud de los trabajadores, consiste en llevar a cabo una serie de etapas secuenciales y lógicas para abordar sistemáticamente cada uno de los elementos constitutivos del sistema de extracción, elaborando un diagnóstico y analizando las opciones de mejora

En principio, debe efectuarse la caracterización del producto que se maneja, atendiendo a dos parámetros claves que permiten la extracción del material particulado presente en el aire sin afectar el

proceso productivo en cuestión, que son el tamaño y diámetro de la partícula. Es decir, las partículas susceptibles al proceso de extracción son aquellas que se encuentran suspendidas.

En base a estos parámetros se sigue la siguiente ruta:

2.1. Fase I. Diagnóstico

El diagnóstico es una fase clave en el rediseño. El éxito del nuevo sistema depende del análisis detallado de las características del sistema previo, las condiciones iniciales de operación y los problemas que se estén presentando. El diagnóstico de un proceso de rediseño debe ser: integral, porque considera todos los componentes y cómo están correlacionados; y exhaustivo, dado que busca la comprensión del sistema y las oportunidades de mejora.

Dada la íntima relación entre cada uno de los componentes del sistema, las alteraciones deben verse bajo la óptica de cada uno de los componentes, es decir, más allá de lo simple que puede ser el diseño de un sistema de aspiración, una de las dificultades de mayor peso es el efecto que puede tener el cambio que sobre el desempeño del sistema tiene el ajuste en las condiciones de operación [7].

En tal sentido los elementos fundamentales que se deben tomar en consideración para el diagnóstico de un sistema de aspiración localizada se muestran en la Figura 1.

2.1.1. Etapa 1. Descripción esquemática del sistema

Para iniciar el estudio del sistema, se recomienda empezar con un esquema general. El objetivo de esta etapa es identificar todos los puntos de captación, líneas, ductos, filtros y ventiladores presentes. Asimismo, se recomienda incluir los aspectos más básicos del proceso productivo, las zonas de acumulación de polvo, las variables fundamentales (caudal, velocidad de aspiración) y variables del proceso conocidas (temperatura, humedad), entre otros aspectos.

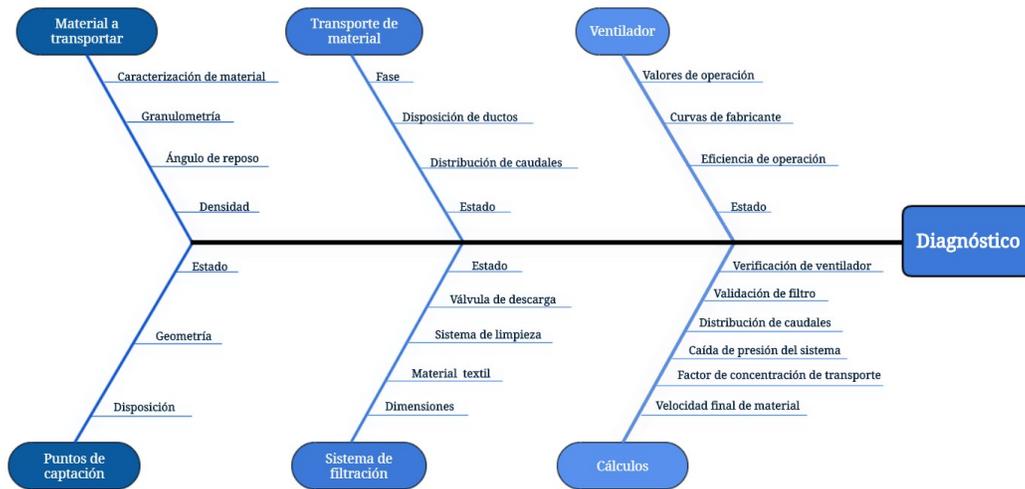


Figura 1: Esquema de diagnóstico

2.1.2. Etapa 2. Caracterización de material y sistema

Características del material particulado

El estudio detallado del material de transporte involucra parámetros clásicos como la densidad, y atributos como: pH, tamaño de grano, ángulo de reposo, abrasión, higroscopicidad, humedad, compactación, explosividad.

Características de los puntos de captación

Cada proceso productivo en que exista la necesidad de manejar material particulado posee diferentes focos de dispersión a los cuales debe corresponder un punto de captación. Es necesario atender a la geometría de las campanas, número y disposición. Cualquier aspecto que pueda afectar la aspiración requiere ser identificado, igualmente, todos los datos necesarios para el cálculo de la caída de presión asociada a la campana.

Características del sistema de ductos

Deben detallarse todas las líneas, accesorios, tramos y diámetros del sistema, considerando también el material de los ductos y si existen zonas recurrentes de taponamiento. Deben incluirse accesorios como: entradas de aire falso (bleed-ins), compuertas de limpieza, dämpers, entre otros, todo lo cual estará relacionado con el cálculo de las caídas de presión.

Características del separador de filtros de tejido

Para estos separadores debe contarse con la siguiente información: dimensiones de la estructura externa del filtro; la cantidad, disposición y tamaño de los tejidos (mangas); la longitud y diámetro de los soportes (jaulas); el material del textil; y el sistema de limpieza. Este último es una variable fundamental en el desempeño del filtro, el tipo, la frecuencia y el estado del sistema, el cual se examina junto con la instrumentación del filtro. Generalmente, estos dispositivos cuentan con un manómetro de presión diferencial. Sobre este instrumento, debe verificarse su fecha de calibración, conexiones y funcionamiento. A excepción de condiciones especiales (toxicidad del material, inflamabilidad, temperaturas extremas de proceso, entre otros), los filtros presentan la posibilidad de ser fácilmente inspeccionados internamente. Esta es una actividad relevante siempre que sea posible, prestando atención al estado de compresión de las jaulas y la capa de polvo sobre las mangas.

Adicionalmente, los filtros cuentan con un mecanismo que permite la deposición del polvo y su descarga (llamadas válvulas de descarga) en un silo de almacenamiento o hacia una línea de recirculación al proceso productivo. Algunas válvulas de descarga comunes son: tornillos sinfín, esclusas de aire (airlock valve), “válvulas de doble descarga” o una combinación de dispositivos. El

parámetro a considerar es la efectividad en el control de la salida del material, esto se refleja en la deposición del polvo durante el ciclo de apertura/cierre de la válvula, la recurrencia de atascos y la existencia de alguna condición en la que el sistema de descarga esté inhabilitado.

Ventilador

Conforme al ventilador deben conocerse los datos de placa del motor, principalmente la velocidad de giro (rpm) y potencia, el diámetro del rotor, la orientación de los álabes y caudal de operación; estos datos suelen estar presentes en la hoja técnica del equipo. Otra información relevante son las curvas del ventilador dadas por el fabricante, este elemento es de gran importancia para la evaluación de eficiencia y selección posterior de parámetros. En este punto, es oportuno inspeccionar el área de salida de aire limpio del ventilador en busca de material.

2.1.3. Etapa 3. Cálculos de diagnóstico

Una vez recabada toda la información, se realizan los siguientes cálculos:

Cálculo de la Velocidad Final

La velocidad final puede ser entendida como: “la velocidad mínima para que el material particulado pueda ser suspendido en el aire” [8]. Para su cálculo se utilizan los parámetros adimensionales “Número de Reynolds para material particulado” (Re_{ds}) y “Coeficiente de arrastre” (Cd).

Utilizando la ecuación (1) [8], se ingresa en la Figura 2 para obtener el Re_{ds} .

$$Cd \cdot Re_{ds}^2 = \frac{4gd_s(\gamma_s - \gamma_a)}{3v_a^2\gamma_a} \quad (1)$$

Donde:

V_f : velocidad final [m/s]

g : aceleración de gravedad [9,81 m/s²]

ds : diámetro de partícula [m]

γ_s : peso específico del material particulado [kgf/m³]

γ_a : peso específico del aire [kgf/m³]

Cd : coeficiente de arrastre [adimensional].

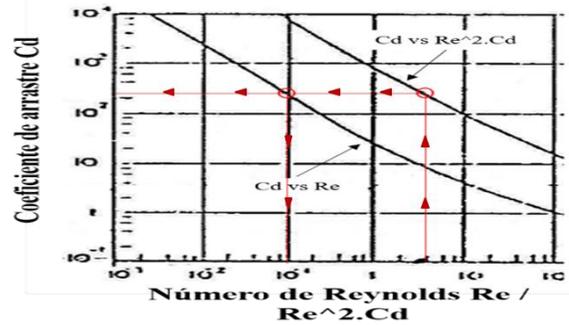


Figura 2: Gráfico Cd vs $Re_{ds}/Re_{ds}^2.Cd$ [6]

En función del orden de magnitud del Re_{ds} se emplea la ecuación (2) o (3) según corresponda [8].

El coeficiente de arrastre (Cd), se determina de acuerdo al número de Reynolds para el material particulado (Re_{ds}). Para $10^{-3} < Re_{ds} < 1,0$:

$$Cd = \frac{24}{Re_{ds}} \quad (2)$$

Donde:

Cd : coeficiente de arrastre [adimensional]

Re_{ds} : número de Reynolds para el material particulado

Para $2,0 < Re_{ds} < 5 \times 10^2$:

$$Cd = \frac{18,5}{(Re_{ds})^{3/5}} \quad (3)$$

Finalmente, se obtiene la velocidad final por medio de la ecuación (4) [8]:

$$V_f = \sqrt{\frac{4gd_s(\gamma_s - \gamma_a)}{3Cd\gamma_a}} \quad (4)$$

Cálculo del factor de concentración de transporte

El factor de concentración es una variable que permite clasificar los sistemas de transporte neumático.

Este parámetro es usualmente ignorado en los sistemas de extracción debido a que el flujo másico de producto será mucho menor al flujo másico de aire. No obstante, ante condiciones de atascos o taponamientos, comparar la cantidad de producto aspirado por unidad de tiempo y la del aire es oportuno. Asimismo, este factor puede

utilizarse como indicador de posibles mejoras para el sistema, por ejemplo, en función de la fase y las características del material es posible realizar consideraciones significativas en cuanto a si el sistema necesita ser de presión negativa, alta presión, mixto, o circuito cerrado.

Para el cálculo del factor de concentración debe conocerse cuánto producto se está dispersando en el aire (mermas de proceso), luego dicho valor se descompone en cuánto se está acumulando en el área de trabajo y cuánto se está aspirando.

El factor de concentración se presenta en la ecuación (5) [8]:

$$\mu = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a} = \frac{\dot{G}_s}{\dot{G}_a} \quad (5)$$

Donde:

μ factor de concentración [adimensional]

\dot{m}_s : flujo másico del sólido transportado [kg/s]

\dot{m}_a : flujo másico del aire [kg/s]

\dot{G}_s : peso del sólido transportado por unidad de tiempo [kgf/s]

\dot{G}_a : peso del aire por unidad de tiempo [kgf/s]

De acuerdo a este criterio existen lo siguientes sistemas de transporte neumático:

- Sistemas de baja concentración: $\mu < 15$.
- Sistemas de alta concentración: $\mu > 15$.

Cálculo de caída de presión

La caída de presión debe ser determinada mediante un estudio en campo utilizando las herramientas adecuadas. La instrumentación del estudio dependerá del proceso, material y puntos de inspección, para esta aplicación comúnmente se emplean tubos de Pitot o anemómetros. Se recomienda la utilización de anemómetros térmicos considerando los numerosos equipos cuyas lecturas pueden verse afectadas por el polvo transportado.

A pesar que algunos instrumentos poseen filtros, estos también afectan la precisión del instrumento y generan dispersión en los resultados. Las mediciones deben realizarse en cada ramal y línea del sistema de aspiración, de esta forma es posible detectar desbalances en la aspiración y fugas de caudal. Una vez determinada la caída de presión

y el flujo volumétrico del sistema, se visualizan dichos valores en las curvas del ventilador para validar la operación y eficiencia del mismo. En el caso de no poder realizar dicho estudio en campo, en función de los datos recopilados, puede realizarse una aproximación teórica a las pérdidas del sistema. Bajo estas circunstancias se recomienda:

1. Definir una ruta de cálculo.

Fungiendo como guía de cálculo, establece el punto de partida. En sistemas complejos, con numerosos puntos de captación, ramales y líneas, el decidir dónde empezar e integrar cada punto con el ramal, el ramal con la línea y las líneas entre sí, puede ser confuso. El desglose esquemático planteado pretende descomponer el sistema en un estudio paso a paso, tramo a tramo. Cada sección y elemento debe ser debidamente identificado.

2. Selección de método de cálculo.

Conociendo el material de los ductos y sus accesorios, es posible hallar ecuaciones, tablas o gráficas que permitan calcular la caída de presión asociada al elemento en función del diámetro y caudal, principalmente.

Dependiendo del componente, será necesario conocer otros parámetros como la longitud (ductos), radios (codos) o ángulo (ampliaciones). Para ductos circulares, de chapa metálica galvanizada, nuevos, el Manual de Ventilación Industrial [7] establece la ecuación (6) para las pérdidas de carga en términos de presión dinámica por metro.

$$\frac{\Delta p}{\gamma \cdot m_{fl}} = \frac{27,8}{Q^{0,079} D^{1,066}} \quad (6)$$

Donde:

$\frac{\Delta p}{\gamma \cdot m}$: factor de pérdida por metro de conducto [mm c.a/m]

Q : flujo volumétrico [m³/s]

D : diámetro de ducto [mm]

Para los accesorios se utiliza la ecuación (7), Mills [8] presenta una serie de gráficos (Figuras 3 y 4) de donde se extrae un factor “ k ” que se multiplica por la presión dinámica para obtener las

pérdidas.

$$\frac{\Delta p}{\gamma_{acc}} = k \cdot p_d \quad (7)$$

Donde

$\frac{\Delta p}{\gamma}$: pérdidas en accesorio [mm c.a.]

k : factor de accesorio [adimensional]

Donde:

p_d : presión dinámica [mm c.a.]

Q : flujo volumétrico [m³/s] D : diámetro de ducto [mm]

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (7) se obtiene la ecuación (11):

$$\frac{\Delta p}{\gamma_{acc}} = k \cdot \left(\frac{Q}{1,01\pi D^2} \right)^2 \quad (11)$$

Donde:

$\frac{\Delta p}{\gamma}$: pérdidas en accesorio [mm c.a.]

k : factor de accesorio [adimensional]

Q : flujo volumétrico [m³/s]

D : diámetro de ducto [mm]

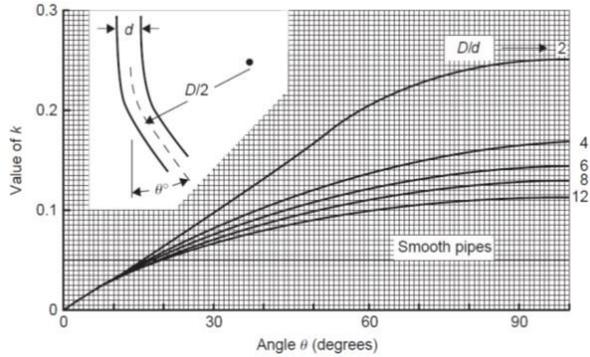


Figura 3: Gráfico de factor k para codos [8]

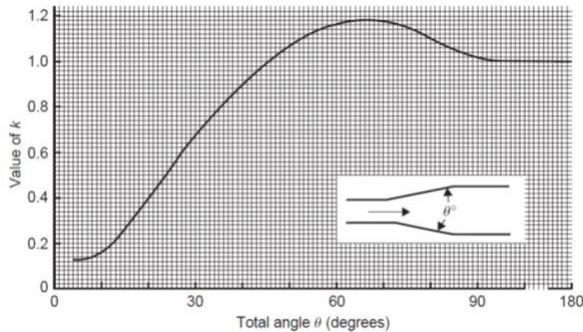


Figura 4: Gráfico de factor k para expansiones [8]

Con la definición de presión dinámica para el aire standard del Manual de Ventilación Industrial [7], ecuación (8):

$$p_d = \left(\frac{V}{4,043} \right)^2 \quad (8)$$

Considerando la ecuación de caudal para conductos circulares, ecuación (9):

$$Q = \frac{\pi V D^2}{4} \quad (9)$$

Tomando la ecuación anterior y colocándola en función del flujo volumétrico, ecuación (10):

$$p_d = \left(\frac{Q}{1,01\pi (1000D)^2} \right)^2 \quad (10)$$

En el caso de las pérdidas de carga debido al filtro de mangas, dicha caída de presión se puede tomar como constante y asignarle el valor tomado del manómetro de presión diferencial, una vez verificado el correcto funcionamiento de este instrumento.

3. Tabular los tramos para obtener las curvas de pérdidas de tramo

Considerando que no se tiene el valor del flujo volumétrico, se seleccionará un rango, se tabularán los valores de caudal y los valores de caída de presión del tramo en función de dicho rango.

Partiendo de las tablas a realizar, es posible obtener las curvas de pérdidas aproximadas.

4. Obtener el punto de operación del sistema.

Una vez culminada la ruta de cálculo, el resultado se plasma en la curva de pérdidas del sistema. Esta curva se intercepta con la curva del ventilador para hallar el punto de operación del sistema.

Determinación de la distribución de caudales

Un aspecto fundamental es que el sistema debe estar balanceado para ofrecer una aspiración uniforme, en las situaciones en las que no lo esté, dicho desbalance debe ser deliberado para suplir algún requerimiento específico.

La distribución de caudales puede obtenerse indirectamente del estudio de pérdidas en campo.

Si este no pudo realizarse, puede tomarse el punto de operación teórico y el “plan de trabajo”. Operando en sentido inverso, es posible obtener los valores de flujo volumétrico para cada tramo al ya tener las curvas de pérdidas de cada uno. En cualquiera de los casos, es oportuno ilustrar la distribución de caudales y hacer comparaciones porcentuales; estas herramientas permiten enfocar el rediseño de los tramos a las áreas más necesitadas.

Validación de filtro

Los separadores por filtro de tejido poseen una variable característica denominada “velocidad de filtración”. Echeverri-Londoño [9], establece que “una filtración eficiente requiere que la velocidad de filtración esté en el intervalo de 0,005 a 0,050 m/s”, para ello en la Tabla 1 se muestran de valores recomendados en función del material particulado y material textil.

Tabla 1: Velocidades de filtración recomendadas [9]

Partículas	V_{fil} (m/s)	
	Agitación / Contracorriente (tela tejida)	Aire a presión (fieltro)
Alimento de ganado	0,018	0,071
Almidón	0,015	0,041
Alúmina	0,013	-
Cal	0,013	0,051

Si bien el filtro ya se encuentra instalado, tomando la velocidad de filtración y el caudal conocido, es posible calcular el “área de filtración”, ecuación (12) [9]:

$$A_{fil} = \frac{Q}{V_{fil}} \quad (12)$$

Donde:

A_{fil} : área de filtración [m²]

Q : flujo volumétrico [m³/s]

V_{fil} : velocidad de filtración [m/s]

Obtenida el área total de filtración y conociendo las dimensiones de los textiles instalados, se procede a calcular la superficie individual de cada

uno, ecuación (13) [9]:

$$A_u = \pi DL + \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (13)$$

Donde

A_u : área de separador [m²]

D : diámetro de separador [m]

L : longitud de separador [m]

Finalmente, el número de separadores se calcula dividiendo el área de filtración entre el área de separador, ecuación (14) [9]:

$$N^{\circ}_{sep} = \frac{A_{fil}}{A_u} \quad (14)$$

Donde

N°_{sep} : número de separadores [adimensional]

A_u : área de separador [m²]

A_{fil} : área de filtración [m²]

Los separadores de polvo (mangas) se ordenan en arreglos matriciales, generalmente cuadrados. De verificar que el filtro es adecuado para el sistema actual, es una buena práctica el determinar con la metodología anterior un rango de caudales que permitan mantener el dispositivo.

Validación de ventilador

El punto de operación del sistema permite conocer la eficiencia del ventilador y conocer si la turbomáquina actual es la más apropiada para el sistema. Si se están operando en intervalos de baja eficiencia, pueden considerarse modificaciones del equipo o el reemplazo del mismo.

Previo a sopesar el reemplazo por una máquina más grande o más pequeña, un simple cálculo puede dilucidar si se está empleando el tipo de ventilador adecuado. Por defecto, para la aspiración suelen utilizarse ventiladores centrífugos, sin embargo, ante altos requerimientos de caudal pueden seleccionarse ventiladores axiales. Mediante una serie de cálculos simples, por medio de factores adimensionales, es posible determinar utilizando el diagrama de Cordier qué tipo de máquina es la más apta.

Convirtiendo la caída de presión de milímetros de columna de agua a disponibilidad para ser expresada en metros, ecuación (15):

$$h = \frac{\rho_{aire} \Delta p}{\rho_{agua} \gamma} = 830,941 \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (15)$$

Donde

$\frac{\Delta p}{\gamma}$: caída de presión [mm c.a.]

h : disponibilidad [m]

Con la disponibilidad se calcula la velocidad específica para entrar en el diagrama de Cordier (Figura 5), ecuación (16) [10]:

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(gh)^{3/4}} \quad (16)$$

Donde

N_s : velocidad específica [adimensional].

N : velocidad de rotación [rad/s].

Q : caudal [m³/s].

g : aceleración de gravedad [9,81 m/s²].

h : disponibilidad [m]

Por medio de la ecuación (17) [10] que establece la relación entre el diámetro específico y el diámetro real, es posible verificar si las dimensiones del filtro son apropiadas para los requerimientos del sistema.

$$D_s = \frac{D(gh)^{1/4}}{Q^{1/2}} \quad (17)$$

Donde

D_s : diámetro específico [adimensional].

g : aceleración de gravedad [m/s²].

h : disponibilidad [m].

D : diámetro del rotor [m].

Para calcular el diámetro teórico del rotor, se despeja de la ecuación (17) y se obtiene, ecuación (18) [10]:

$$D = \frac{(gh)^{1/4}}{D_s Q^{1/2}} \quad (18)$$

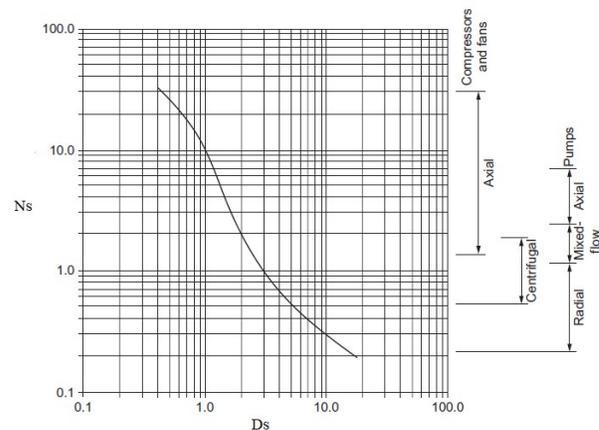


Figura 5: Diagrama de Cordier [10]

2.2. Fase II. Diseño

Esta fase considera individualmente cada componente que se ha determinado necesario rediseñar. En aras de simplificar el proceso, la interacción del componente con el sistema más allá de su función es considerado en la fase posterior.

2.2.1. Diseño de elementos de captación

La forma, disposición y número de puntos de captación son variables condicionadas por el proceso al que pertenezca el sistema de extracción. En algunos casos, la aspiración se realiza sobre una máquina la cual presenta (por diseño de fábrica) puntos de aspiración propios. En otros casos, la aspiración es considerada separada de la operación en cuestión. La recomendación general para cualquier circunstancia consiste en contener el material particulado en un espacio cerrado y colocar los puntos de captación tan cerca del foco de difusión de polvo como sea posible. La geometría de la campana se diseña en función de las velocidades requeridas a desarrollarse en ella.

Es necesario seleccionar un valor de velocidad de captación teniendo en cuenta las velocidades de aspiración recomendadas y la velocidad de transporte del material. La posición del punto de captación debe considerarse para asegurar que la velocidad de aspiración en el foco de dispersión (velocidad de captación) supere o iguale la velocidad final del material, recordando que la velocidad disminuye en función de la distancia (Figura 6). El número de campanas se determina en

función del caudal y la caída de presión asociada, si bien a mayor número, menor caída de presión, el costo de la inversión adicional puede ser demasiado grande en comparación a los beneficios de dicha solución.

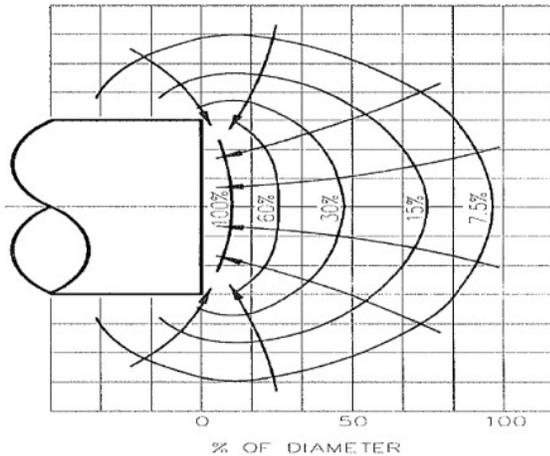


Figura 6: Disminución porcentual de la velocidad en función de la distancia medida en porcentajes de diámetro [7]

De considerarse que los elementos de captación actuales son alternativas viables para el sistema, los mismos pueden ser estudiados en función de los parámetros desarrollados a continuación. Si bien el planteamiento se enfoca en el diseño, es útil igualmente para evaluación y comparación con otras propuestas de solución. El esquema de diseño para la campana se muestra en la Figura 7.

Definición de premisa de diseño

La premisa de diseño es un concepto que engloba las consideraciones preliminares, requerimientos básicos y necesidades fundamentales que debe cumplir la campana. Debe ser una definición densa para ser un punto de partida sólido para los prototipos, a su vez, es menester que sea lo suficientemente simple para guiar el proceso de pensamiento creativo sin limitarlo.

Identificación de las limitantes

Se realiza un listado de las limitaciones existentes como aspectos que el prototipo debe sobrellevar desde el momento de su concepción. Estos no son elementos de descarte, por el

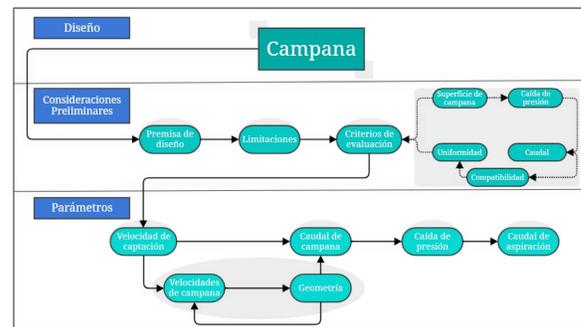


Figura 7: Esquema de diseño de campana

contrario, son esquemas a los que la campana debe adaptarse.

Establecimiento de criterios de evaluación

Los “criterios de evaluación” son los parámetros de desempeño teórico de cada alternativa de solución. Tomando dichos conceptos como punto de partida, el objetivo es analizar exhaustivamente el prototipo en cuestión. Esta metodología plantea los siguientes criterios:

- Superficie total de campana
Este criterio procura estimar el costo económico del dispositivo. De acuerdo a este concepto, aquella opción que comprenda la mayor superficie tendrá un mayor costo.
- Caída de presión de la campana
Este criterio requiere cuantificar la pérdida de carga, este es un factor de relevante al comparar la eficiencia entre prototipos. Al considerar velocidades de captación similares, aquél que desarrolle la menor caída de presión, tendría mejor valoración conforme a este criterio. Si bien todo sistema de presión negativa requiere un mínimo de caída de presión para operar de forma óptima, en esta etapa solo se tomará en cuenta el diseño con menor valor en aras de un sistema más pequeño.
- Caudal derivado total
De acuerdo al tipo y geometría de la campana es posible establecer una ecuación que permita conocer el caudal que determinada velocidad de captación produciría (ver Manual de Ventilación Industrial [7], capítulo 3). Este caudal, multiplicado por la cantidad de

dispositivos y la cantidad de máquinas, establecerá el caudal del sistema; variable fundamental en la selección del ventilador y dimensionamiento de los ductos.

- **Compatibilidad del caudal con el sistema**
En función de las conclusiones de la etapa de diagnóstico y las dimensiones preliminares del proceso, es oportuno considerar si el caudal derivado del dispositivo es congruente en magnitudes con las dimensiones del sistema. Es importante tomar en cuenta este criterio tras decisiones como utilizar el filtro o ventilador instalado.
- **Uniformidad de aspiración**
La aspiración no-uniforme conlleva a acumulaciones de material particulado en determinadas áreas. Siempre que sea relevante, la dispersión de los valores de aspiración debe ser tan pequeña como sea posible.

2.2.2. *Diseño de sistema de ductos*

Así como la función de las campanas es captar el material, el propósito del sistema de ductos es el transporte del mismo. De esta manera, el diseño se basa en la conexión de los puntos de captación con el elemento de filtración. Esta etapa inicia con la progresiva incorporación de las campanas desde las áreas de dispersión de polvo, dicha unión formará una ramificación del sistema, seguidamente las ramificaciones se vincularán conformando las líneas. En este punto debe tomarse la decisión: si se desea utilizar una línea central que conecte con el filtro; varias líneas que se junten a la entrada de este componente; o utilizar múltiples colectores de polvo. En términos de procedimientos de cálculo, el diseño de ductos se basa en el ajuste de los valores de caudal, velocidad de transporte y área de sección transversal. El área varía para mantener la velocidad de transporte ante incrementos de caudal controlando las pérdidas por fricción, en la mayoría de los casos.

2.2.3. *Diseño de separador de tejido*

El procedimiento de diseño del filtro sigue el procedimiento descrito en la sección 2.1.3 (validación de filtro) a través de las ecuaciones (12), (13), (14), empezando con la selección de la

velocidad de filtración. Con el caudal utilizado en los apartados en anteriores y la velocidad de filtración, se calcula el área de filtración (ecuación (12)). Con dicho valor, se realizan iteraciones de la ecuación (14) con tamaños comerciales de separadores (mangas) hasta hallar la configuración que cumpla con la disponibilidad de espacio y requerimientos del proceso; este número debe ser entero y corresponder a una matriz cuadrada o rectangular. Con esta matriz, puede establecerse el rango de caudales adecuado para el filtro, es decir, si se tiene un arreglo de 100 mangas, el rango de caudales es aquel que requiera de entre 91 (mayor a 9×10) y 109 mangas (menor a 9×11). Una vez dimensionada la matriz de separadores, continua con el diseño de la tolva de descarga, para lo cual se recomienda tomar en cuenta el ángulo de reposo del material. Finalmente se selecciona la válvula de descarga y el sistema de limpieza.

En este momento es oportuno estimar la caída de presión debido al filtro, Echeverri–Londoño [9] comenta: “puede esperarse una caída de presión máxima de 127 a 254 mm”, por lo que se recomienda seleccionar un valor entre dicho rango. Si se desea un valor más exacto puede considerarse la metodología implementada por Peralta [11], recordando que la caída de presión debido al filtro varía en función de la suciedad de este y se incrementa con el tiempo.

2.2.4. *Selección de ventilador*

A excepción de aplicaciones especiales, los ventiladores generalmente son diseñados en función de guías, herramientas y catálogos de fabricante. Para ello es necesario contar con el punto de operación del sistema, el cual se recomienda se sitúe a la derecha del punto nominal del ventilador, de manera que la eficiencia incremente con la adición de pérdidas; antes de disminuir. Se tiene la posibilidad de seleccionar el ventilador dimensionándolo por medio de las ecuaciones (16), (18) y el Diagrama de Cordier (Figura 5).

3. **Presentación de resultados**

En función a la propuesta mostrada en la metodología se procedió a hacer la implementación

en el contexto de una industria de detergente en polvo, obteniéndose los siguientes resultados.

3.1. Fase I

3.1.1. Caracterización del material

El detergente presente en el proceso estudiado es un producto alcalino e higroscópico, cuya granulometría depende del control de las variables presión de entrada y temperatura del aire a contra corriente de la “Torre de secado”. En ese sentido, en la Tabla 2 se muestran las características físico-químicas estándar del detergente de estudio.

Tabla 2: Características físico-químicas estándar del detergente de estudio

Propiedad	Rango
Densidad [kg/m ³]	[400;600]
pH	[9;11]

Para el analizar el proceso de captación debe definirse una densidad y diámetro de partícula que permitan extraer el material particulado disperso en el aire sin perjudicar el proceso de llenado y empacado del producto.

De acuerdo con Salager [12] el polvo de detergente no debe contener “polvillo”. El polvillo se genera debido a la fractura del grano de detergente durante el proceso de secado en consecuencia de condiciones inadecuadas de presión y temperatura. Así mismo, puede dársele el tratamiento de “partícula suspendida” de acuerdo al decreto presidencial 638 (1995) “Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica”, en este decreto también se establecen las concentraciones permisibles para el aire limpio en el caso de presencia de partículas suspendidas. Reflejándose en la Tabla 3 las características de dicho material.

Tabla 3: Características físico-químicas estándar del material particulado de estudio

Propiedad	Valores
Densidad [kg/m ³]	400
Tamaño de grano [μm]	60
Ángulo de reposo (°)	35

A fines de este estudio, se consideró polvo fino de detergente a todo material particulado derivado

con una densidad de 400 kg/m³ y un tamaño de grano de 60 μm

3.1.2. Caracterización de los puntos de captación

En el caso de estudio la zona de mayor acumulación de polvo es la que corresponde a las llenadoras gravimétricas, este material particulado cae directamente sobre componentes de las empacadoras no diseñados para recibirlo. Las llenadoras poseen la siguiente disposición de aspiración: una campana de aspiración sobre la tolva principal, luego dos líneas laterales de sección cuadrada (80 × 80 mm) de donde se originan conexiones a pequeñas campanas dispuestas sobre las cubetas más inferiores. Los puntos de captación están ubicados de forma lateral.

La Figura 8 permite visualizar la configuración interna, se detalla el reducido espacio libre interno y los componentes de las máquinas.

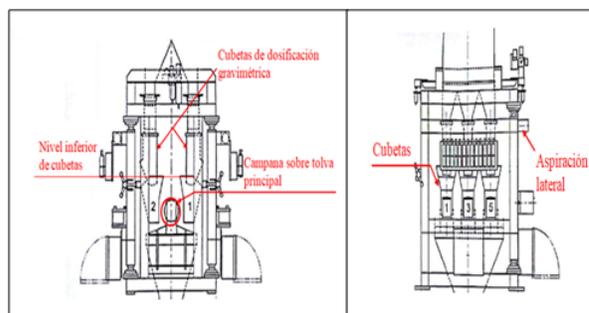


Figura 8: Descripción de llenadoras gravimétricas

3.1.3. Caracterización del sistema de ductos

El sistema de ductos constituye una ampliación progresiva de diámetro desde 75 mm hasta 450 mm (3 in – 18 in), los ductos son de acero galvanizado de 1,5 mm de espesor. Cada ramal correspondiente a las líneas de producción posee una trifurcación cuyas salidas se conectan a la llenadora y a la empacadora respectiva. Los ductos poseen puntos de muestreo para mediciones de velocidad y caída de presión. Así la Figura 9 muestra una distribución del sistema de ductos.

3.1.4. Caracterización del separador de filtros

El filtro del área de empacado es un filtro de mangas de limpieza exterior, contiene 100 mangas de polipropileno distribuidas en un

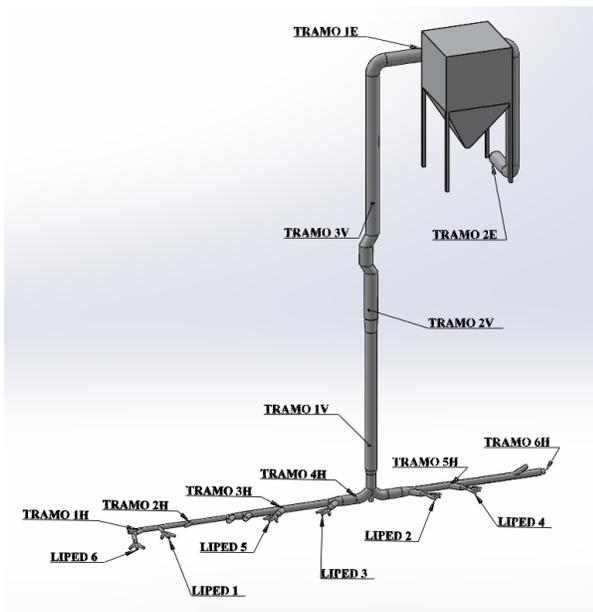


Figura 9: Sistema de ductos instalado

arreglo de 10 × 10 (filas por columnas), dado su considerable tamaño este se ubica en una terraza, las dimensiones del cuerpo del filtro se estiman en 2,34 × 2,34 × 5 m posee un sistema de limpieza tipo pulse-jet y una presión de limpieza de 413,68 kPa (60 psi). La Tabla 4 resume las características de las mangas del filtro junto con sus dimensiones del cuerpo del filtro.

Tabla 4: Características del filtro de mangas

Arreglo de mangas	10 × 10
Diámetro y longitud de mangas	139,7 mm x 2,43 m (5,5 in x 8 ft)
Área filtrante	1,066 m ²
Material de las mangas	Polipropileno
Técnica de limpieza	Pulse-jet
Presión de limpieza	413,68 kPa (60 psi)
Tiempo entre disparos	6 s
Dimensiones del cuerpo del filtro	2,58 × 2,58 × 5 m

3.1.5. Características del ventilador

El ventilador instalado es un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás fabricado por la empresa nacional CO-IN C.A modelo HTM 4019, de diámetro de impulsor 900 mm. La placa del motor acoplado al ventilador establece una potencia de 34,5 kW (46 hp).

3.1.6. Cálculo de la Velocidad Final

Se determina la velocidad final del detergente estándar conforme a no excederla con los parámetros de operación a definir (caudal y caída de presión), los parámetros para el polvillo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Cálculo de velocidad final del polvillo (material particulado)

Coefficiente de arrastre por el cuadrado del Reynolds para el diámetro esférico ($C_d Re_{ds}^2$)	4,085 ≈ 4
Número de Reynolds para el diámetro esférico de partícula (Re_{ds})	0,1
Coefficiente de arrastre (C_d)	240
Velocidad final del polvillo (V_f) [m/s]	0,03

El polvillo de detergente posee una velocidad mínima baja, este aspecto es un indicio conforme al dimensionamiento del sistema y velocidades de transporte. La Tabla 6 muestra los parámetros para el cálculo de la velocidad final del detergente

Tabla 6: Cálculo de la velocidad final para el detergente estándar

Coefficiente de arrastre por el cuadrado del Reynolds para el diámetro esférico ($C_d Re_{ds}^2$)	3194 ≈
Número de Reynolds para el diámetro esférico de partícula (Re_{ds})	20
Coefficiente de arrastre (C_d)	3,1
Velocidad final del polvillo (V_f) [m/s]	0,98

De acuerdo con la norma COVENIN 2250:2000 [13] que establece un rango recomendado de velocidades de aspiración, el detergente requiere del límite superior del rango de velocidades recomendadas para ser transportado. Teniendo en cuenta el diferencial entre ambas velocidades, se infiere que es posible aspirar polvillo sin comprometer el sistema gravimétrico de llenado.

3.1.7. Estimación de las pérdidas

En función de la metodología mostrada se evalúan las pérdidas en cada tramo. En la Tabla 7 se muestran las pérdidas totales según el sistema en estudio.

En la Figura 10 se visualiza la curva general de pérdidas del sistema instalado y su ecuación aproximada.

Tabla 7: Pérdidas totales del sistema instalado

Caudal, Q [m^3/s]	Pérdida, hf [mm.c.a]
0,01	0,003
0,05	0,082
0,10	0,323
0,50	7,901
1,00	31,301
1,50	70,041
2,00	124,036

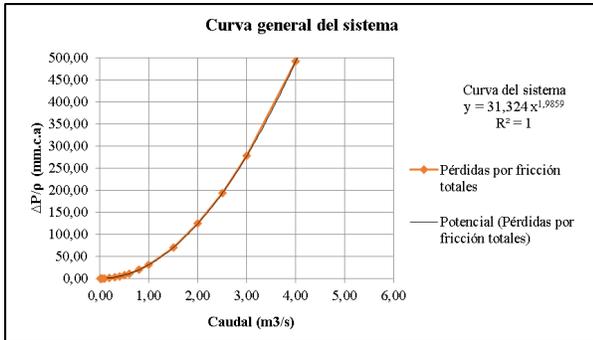


Figura 10: Curva de pérdidas del sistema

3.1.8. Distribución de caudales

Evaluando las curvas características del ventilador, seleccionando puntos de interés y graficando estos, se obtiene la curva del ventilador la cual se intercepta con la curva general del sistema para obtener el punto de trabajo. La curva general del sistema presenta una adición de 127 mm.c.a. (5 in c.a), con esto se busca tomar en consideración las pérdidas derivadas del filtro de mangas estableciendo un valor común según Echeverri-Londoño [9]. La intersección de las curvas establece que el caudal de trabajo es de $2,512 m^3/s$ ($150,72 m^3/min$), la disponibilidad $322,72 mm.c.a$ y la eficiencia de operación del ventilador es del 82,9 %.

Una vez hallado el punto de trabajo del sistema se realiza el estudio del caudal que pasa a través de cada tramo, evaluando la fracción en cada entrada, especialmente aquellas cuya función no está determinada. El estudio de caudales, al igual que el de pérdidas, se establece hasta las salidas sin conexión y trifurcaciones como se observa en la Figura 12.

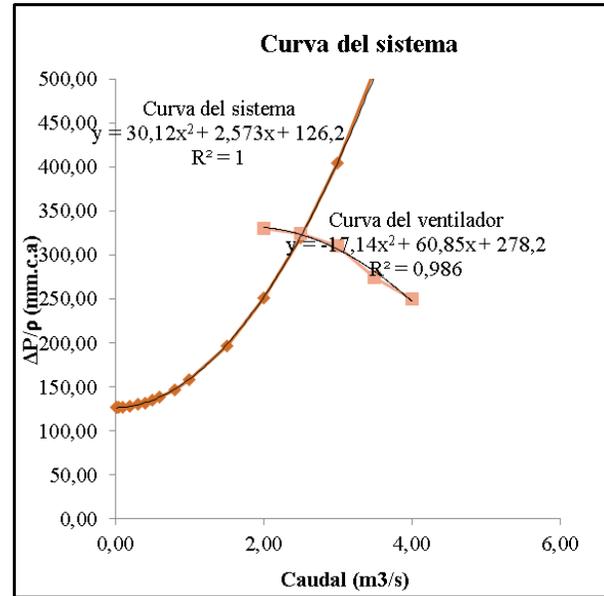


Figura 11: Curva general del sistema considerando las pérdidas del filtro y curva del ventilador

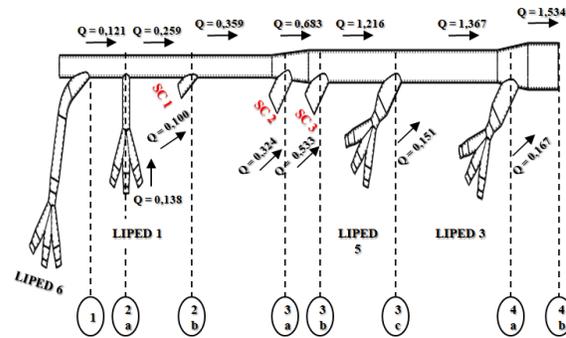


Figura 12: Distribución de caudales tramo 1-4

3.1.9. Validación de los filtros

Se determina un rango tanto de presión como de caudal que estén dentro de los valores manejados por estos dispositivos, en la Tabla 8 se muestran los valores de flujo volumétrico para que el filtro se mantenga dentro del arreglo de 100 mangas con las dimensiones de 5,5 in (0,1397 m) de diámetro y 96 in (2,43 m) de altura. La velocidad de filtración seleccionada es de 0,025 m/s ya que esta pertenece al polvo (detergente, jabón) el cual es el contaminante estudiado en este trabajo.

Por lo tanto, se tiene que el rango del caudal para mantener la configuración del filtro de 100 mangas se encuentra entre $2,44 m^3/s - 2,7 m^3/s$.

La Tabla 9 muestra los parámetros asociados al

Tabla 8: Estimación de caudales para filtro de mangas actual

Velocidad de filtración recomendada, V [m/s]	0,025
Área de filtración, A [m ²]	98
Área de filtración por cada manga, A_b [m ²]	1,0818
Número total de mangas, N	90,21 \cong 91 mangas
Área de filtración, A [m ²]	108
Área de filtración por cada manga, A_b [m ²]	1,0818
Número total de mangas	99,83 \cong 100 mangas

cálculo de la caída de presión debida al filtro de mangas.

Tabla 9: Cálculos de pérdidas de presión debido al filtro de mangas

Parámetro	Valor
Relación Dennis - Klemm	1,7614
Coefficiente de resistencia específico del polvo, K_s [inc aminft/lb]	7
Caída de presión del filtro, Δp [in c.a]	1,7619
Caída de presión del filtro, Δp [mmc.a]	44,7519

El material textil de las mangas del filtro corresponde al “fieltro de polipropileno”, el cual es uno de los materiales actualmente disponible en el mercado nacional. En las referencias halladas no se encontraron los datos de este textil en específico, sin embargo, se considera para el cálculo de la caída de presión por medio de la relación Dennis – Klemm [14] que las propiedades del material disponible son semejantes al “Dacrón” en los parámetros correspondientes.

Validación del ventilador

Se establece la selección del tipo de turbomáquina adecuada según las características pertenecientes al dispositivo y dependientes de los parámetros requeridos por el sistema. En la Tabla 10 se muestran las relaciones para el dimensionamiento del ventilador

Los resultados de la determinación del diámetro del rotor aproximado indican un valor de 0,8 m, y se tiene que para este valor cumple las condiciones de un ventilador centrífugo.

Tabla 10: Relaciones para el dimensionamiento del ventilador

Parámetro	Valor
Equivalencia de presión a disponibilidad, h [m]	263,62
Velocidad específica, N_s [RPM]	0,8015
Diámetro específico D_s	\approx 3,6
Diámetro aproximado del rotor, D [m]	0,8

A pesar de que estos valores satisfacen la validación del ventilador se probará con un valor de diámetro del rotor de 0,9 m siendo este el diámetro del ventilador actualmente instalado.

Calculando nuevamente el diámetro específico se introduce en el diagrama de Cordier para verificar si este diámetro y los requerimientos del sistema cumplen las condiciones del mismo tipo de turbomáquina.

Tabla 11: Cálculo del diámetro específico con el diámetro del ventilador actual

Diámetro específico, D_s	4,04
----------------------------	------

Con este nuevo valor de diámetro específico y los datos de operación del sistema se determina en la Figura 13 si cumple con las condiciones de la turbomáquina para su validación.

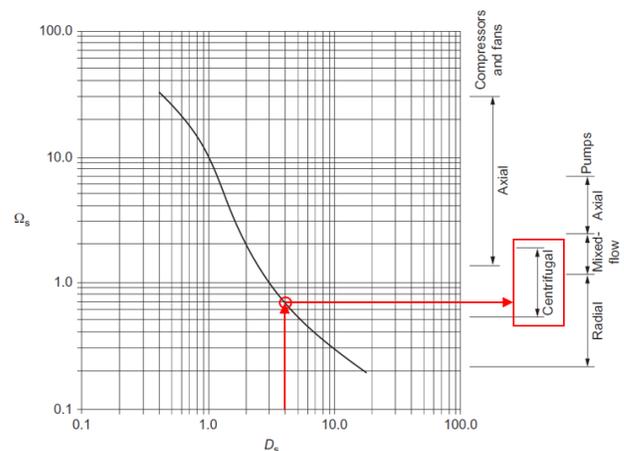


Figura 13: Validación del tipo de turbomáquina con el diámetro del ventilador actual y los requerimientos del sistema (Dixon [10])

El diámetro del ventilador centrífugo actual satisface la validación para el tipo de turbomáquina requerida por el sistema de aspiración.

3.2. Fase II. Diseño

En el caso de estudio particular sobre el cual se efectuó la fase de diagnóstico se procedió a realizar el diseño, centrado en dos aspectos fundamentales, el primero es la campana como elemento de captación y el segundo refiere al sistema de ductos.

En cuanto a la campana se configura la extracción mediante semi-cabinas en cubetas, tal como se muestra en la Figura 14.

Esta solución posee un ducto central de 75 mm (3 in) de diámetro, ductos laterales de 25 mm de diámetro y campanas de extracción identificadas como 1, 2 y 3 respectivamente tomando como “1” el par de cubetas más alejadas de la aspiración y “3” el par más cercano (ya que las cubetas en un mismo par son iguales), de 100 mm x 45 mm con una amplitud de 90°. La longitud de las campanas varía en un intervalo constante de 15 mm desde el par 1, cuya longitud es 70 mm, hasta el par 3, cuya longitud es 40 mm; esta disposición asegura una velocidad de captación semejante por cada cubeta.

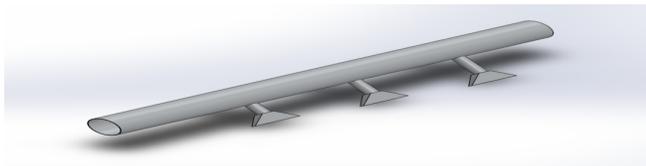


Figura 14: Visualización de extracción mediante semi-cabinas en cubetas

La disposición de esta alternativa de solución instalada en el sistema se visualiza en la Figura 15.

Se procede a realizar el estudio de pérdidas para lo cual se efectúa el cálculo de los caudales, cuyos resultados se observan en la Tabla 12.

En tal sentido, la solución de la simulación numérica computacional de la opción de diseño, se observa en la Figura 16 y muestra las líneas de flujo a través de cada campana en donde la mayor velocidad de aspiración se encuentra en las cubetas 1 y 2. Los resultados de la simulación muestran una caída de presión de 24,342 mm c a, comparando este valor se tiene un error del 32 %.

En cuanto al sistema de ductos la propuesta consta de 2 tramos principales divididos en lados izquierdo y derecho, empezando desde el tramo izquierdo, abarca las llenadoras desde LIPED

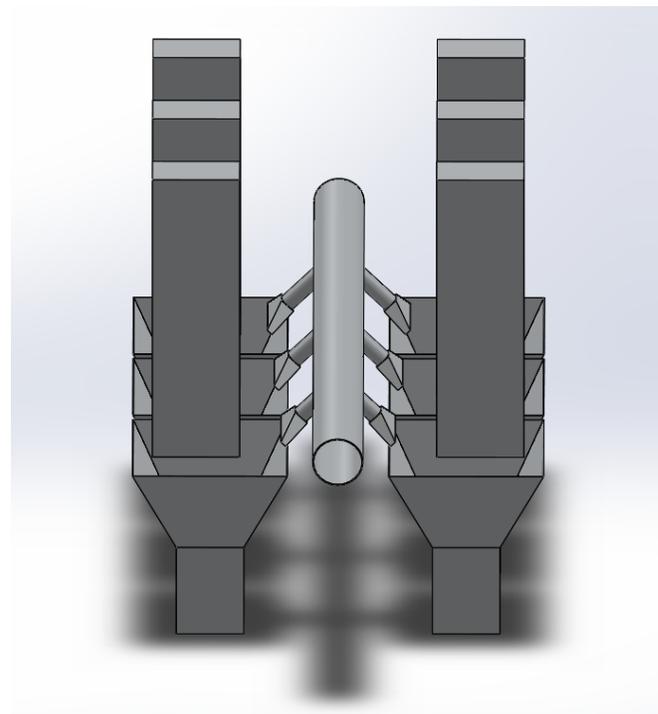


Figura 15: Visualización de la instalación de la extracción mediante semi-cabinas en cubetas

Tabla 12: Caudales y pérdida total

Parámetro	Valor
Caudal en campanas del par 1, Q_1 [m ³ /s]	0,0065
Velocidad en campanas del par 1, V_1 [m/s]	0,5892
Caudal en campanas del par 2, Q_2 [m ³ /s]	0,0065
Velocidad en campanas del par 2, V_2 [m/s]	0,3919
Caudal en campanas del par 3, Q_3 [m ³ /s]	0,0067
Velocidad en campanas del par 3, V_3 [m/s]	0,3034
Pérdidas totales en campana, h_t [mmc a]	16,619

6 hasta LIPED 5 aumentando el diámetro del ducto progresivamente con cada línea añadida al mismo. El tramo derecho toma a LIPED 4 y LIPED 2, ambas líneas finalmente convergen en el punto de unión UTP (unión de tramos principales) el cual se ubica en la mezanine de las llenadoras, posteriormente se conectan a la succión del sistema.

Los aumentos de diámetro se realizan con expansiones en los puntos de unión con las líneas

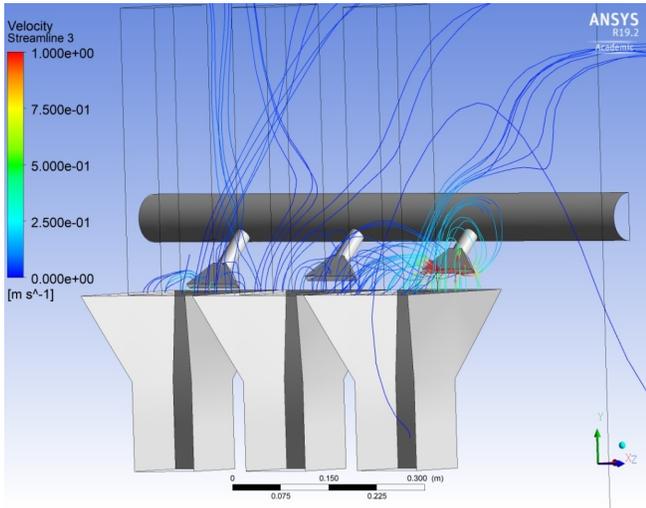


Figura 16: Simulación de la opción de diseño de las campanas

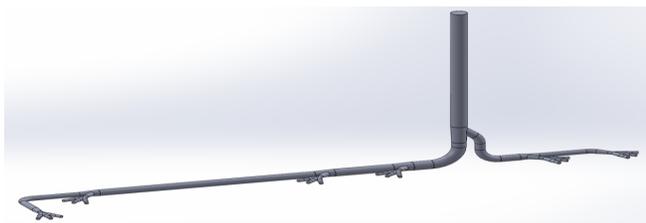


Figura 17: Vista isométrica de alternativa de solución de ductos en línea central

de las llenadoras y los cambios de dirección se efectúan con codos de 90° y 45° con una relación de radio y diámetro de dos ($r/D = 2$). En la Figura 17 se muestra un esquema de la alternativa de solución.

En la Figura 18 se muestra la curva de pérdidas del sistema de ductos

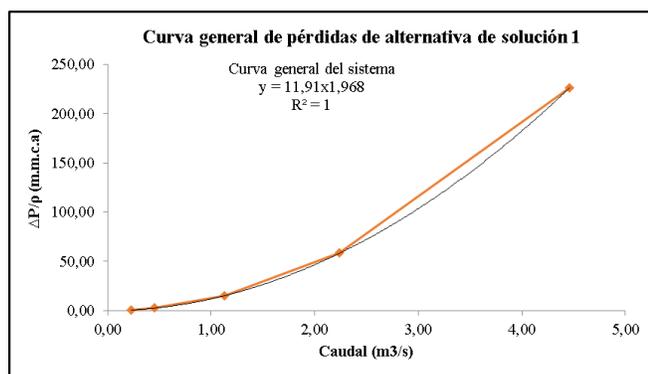


Figura 18: Visualización de alternativa de solución de sistema de ductos 1

La Tabla 13 describe la distribución de caudales y cálculo de la desviación estándar entre líneas.

Tabla 13: Velocidad inducida en las cubetas debido a la primera alternativa de solución

Línea de producción	Caudal [m ³ /s]
4	0,446
2	0,469
3	0,512
5	0,478
1	0,401
6	0,391
Promedio	0,45
Desviación estándar	0,046

4. Conclusiones

El abordaje del rediseño de un sistema de extracción localizada pasa necesariamente por un diagnóstico que en principio puede consumir una cantidad considerable de recursos y tiempo, pero que a su vez es la clave para definir las condiciones necesarias para la operación, e incluso determinar cuáles elementos del sistema existente pueden ser reutilizados para dar una respuesta que permita soluciones que den lugar a mejoras sustanciales. En ese sentido son aspectos claves a incluir en el diagnóstico las características del material a transportar, los puntos de captación, el filtrado, el sistema de ductos y el ventilador presente.

Una vez definidas las premisas a través del diagnóstico, la fase de diseño seguirá un protocolo estricto que debe acompañarse de los métodos de validación adecuados, como por ejemplo la implementación de la simulación, vista como una herramienta que permite proyectar el comportamiento de las mejoras sugeridas frente a una problemática dada.

5. Referencias

- [1] F. Santoro and J. A. Gómez, “Rediseño del sistema de aspiración del área de empaclado de un proceso productivo de detergente en polvo,” Trabajo Especial de grado para optar al título de ingeniero Mecánico, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2019.
- [2] L. Buchelli and M. Reinoso, “Disminución de contaminantes aéreos en una planta de balanceados mediante la propuesta de un sistema de extracción

- de polvo,” *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 12, pp. 5–14, 2014. <https://doi.org/10.17163.ings.n12.2014.01>
- [3] D. Carmona, “Diseño de dos sistemas de extracción para humos y polvos en la empresa Cristar S.A.” Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia, 2020.
- [4] R. Serrano, “Recomendaciones para el mejoramiento de los sistemas de extracción neumática de residuos de madera,” *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 3, no. 8, pp. 1–6, 2006.
- [5] A. Zarei, M. Jahangiri, A. Koohpaei, A. Zolfaghari, A. Barkhordari, and M. Mortezaei, “Exhaust Ventilation System for the Control of Total Dust and Crystalline Silica in a Tile Manufacturing Factory,” *Journal of Health Sciences & Surveillance System*, vol. 6, no. 4, pp. 165–172, 2018.
- [6] G. Chitaru, M. Sandy, C. Croitoru, and F. Bode, “Local exhaust ventilation solutions for an industrial hall – Part 1 CFD analysis of the local exhaust systems,” in *E3S Web of Conferences 85*, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198502012>
- [7] American Conference of Governmental Industrial Hygienist, *Industrial Ventilation*, 23 ed., Estados Unidos, 1998.
- [8] D. Mills, *Pneumatic Conveying Design Guide*, 2 ed. Butterworth-Heinemann. Reino Unido: Elsevier, 2004.
- [9] C. Echeverri-Londoño, “Diseño de filtros de talegas,” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 7, no. 12, pp. 43–60, 2008.
- [10] S. Dixon and C. Hall, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 7 ed. Oxford, Reino Unido: Elsevier Inc, 2014. <https://doi.org/>
- [11] G. Peralta, “Cálculo y diseño fluido dinámico de un filtro de mangas (tipo pulse-jet) para partículas minerales de origen industrial,” Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. Ecuador, 2001.
- [12] J. Salager, *Detergentes: Componentes, fabricación, fórmulas*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, 1988.
- [13] COVENIN, *Norma venezolana de ventilación de los lugares de trabajo COVENIN 2250*, COVENIN, Venezuela, 2000.
- [14] A. Laya, *Manejo de fluidos*. Naguanagua, Venezuela: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, 2005.