

# Cálculo de diseño y modelado de un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand

## Design and modeling calculations of a high efficiency cyclone type Stairmand

Eliel Eduardo Montijo-Valenzuela <sup>a,\*</sup>, Flor Ramírez-Torres <sup>a</sup>, Aureliano Cerón-Franco <sup>a</sup>



## Cálculo de diseño y modelado de un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand

### Design and modeling calculations of a high efficiency cyclone type Stairmand

Eliel Eduardo Montijo-Valenzuela <sup>a,\*</sup>, Flor Ramírez-Torres <sup>a</sup>, Aureliano Cerón-Franco <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Metal-Mecánica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico S/N, Col. Sahuaro, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

Correo electrónico: [elielmontijo@gmail.com](mailto:elielmontijo@gmail.com), [ramirez.flor@gmail.com](mailto:ramirez.flor@gmail.com), [aceronf@gmail.com](mailto:aceronf@gmail.com)

(Recibido: 14 de sep. 2018; Aceptado: 23 de nov. 2018; Publicado: 30 de abr. 2021)

#### RESUMEN

En la siguiente investigación se muestran los cálculos teóricos de diseño para un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand, para la separación de material particulado de cal cuyo proceso opera en condiciones de 500 °C, caudal de entrada de 4.1 m<sup>3</sup>/s, velocidad de entrada (Vi) = 24 m/s, presión de operación (P) = 92.3 kPa y concentración de partículas = 6 g/m<sup>3</sup>, de las cuales el 80% de la concentración fueron partículas de entre 5 y 10 µm, y el restante, de entre 10 y 30 µm. Bajo estos parámetros se realiza un cálculo de la eficiencia del ciclón diseñado, que debe ser igual o superior a un 75%. Finalmente, se realiza el modelo del ciclón bajo los parámetros calculados en software Solidworks®.

**Palabras claves:** Ciclón, diseño, modelado, Stairmand.

#### ABSTRACT

This research shows the theoretical design calculations for a high efficiency Cyclone Stairmand type, for the separation of particulate material of lime whose process operates in conditions of 500 °C, inlet flow of 4.1 m<sup>3</sup>/s, speed inlet (Vi) = 24 m/s, operating pressure (P) = 92.3 kPa and particle concentration = 6 g/m<sup>3</sup>, of which 80% of the concentration were particles between 5 and 10 µm, and the remaining, between 10 and 30 µm. Under these parameters a calculation of the efficiency of the designed cyclone is performed, which must be equal to or greater than 75%. Finally, the cyclone model is performed under the parameters calculated in Solidworks software.

**Keywords:** Cyclone, Design, Modeling, Stairmand

#### 1. Introducción

Los separadores ciclónicos, son un tipo de tecnología utilizada para separar partículas suspendidas en fluidos (aire, gas o incluso líquidos), sin usar ningún tipo de filtro de aire, en donde es usado un vórtice de separación, que aprovecha la fuerza centrífuga generada, método por el cual se logran retener partículas de tamaños pequeños. Los ciclones constan de dos partes importantes; una de forma cilíndrica y la otra cónica, en donde el gas entra por la parte superior del cuerpo cilíndrico de forma tangencial, y se mueve en espiral por el cuerpo del cilindro hacia la parte inferior del cono (como si fuera un remolino), en este punto la dirección del flujo cambia, subiendo por la parte interna y girando por el centro de otro remolino, en este movimiento, la fuerza centrífuga hace que las partículas suspendidas en el

gas, sean depositadas en la pared del ciclón, precipitando al fondo por efecto de la gravedad y dirección [1].

Los separadores de tipo ciclón son muy utilizados a nivel industrial, y sus objetivos básicos son: limpiar aire y clasificar el material particulado [2]. La clasificación de los ciclones es muy amplia, dependiendo de las proporciones geométricas de sus partes, siendo el más utilizado el de tipo Stairmand, ya que experimentalmente ha demostrado una buena eficiencia de separación [3], además, presentan simplicidad de construcción, economía y robustez, con operaciones de trabajo extremas, que van desde elevadas temperaturas y resistencia a incendios y no requieren mantenimiento.

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5 µm, pero se ha observado

que partículas menores a estas dimensiones, en ciertos casos, pueden ser también separadas [4]. La naturaleza de la problemática se centra en un proceso de molienda de piedra caliza, en donde se pretende reducir en un 75% el material particulado expuesto al ambiente. El alcance de esta investigación es realizar los cálculos teóricos para determinar el dimensionamiento de un separador ciclónico de partículas tipo Stairmand, calcular su eficiencia de recolección de material particulado y realizar el modelo en un software CAD (Diseño Asistido por Computadora).

Como resultado de esta investigación, se propone un modelo elaborado en Solidworks® con el dimensionamiento calculado, con una eficiencia de colección de 86.42%, del cual el 66.96% corresponde a colección de material particulado con dimensiones de entre 5 y 10 µm, y el 19.46% para material de entre 10 y 30 µm.

**2. Métodos y materiales**

Se analizó la problemática relacionada con un proceso de mezclado de cal, en donde la contaminación por material particulado de entre 5 y 30 µm, superaba lo establecido por la NOM-025-SSA1-2014, por lo que era necesario, reducir en un 75%, este contaminante.

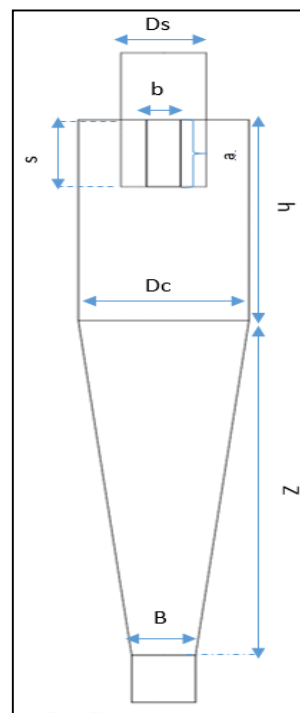
Derivado de las condiciones de la problemática, se realizó una recopilación de las principales variables para determinar una solución óptima. Las variables registradas fueron; densidad del material particulado,  $\rho_{cal} = 1100 \text{ kg/m}^3$ , temperatura de operación de la mezcla aire y material particulado,  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , caudal de corriente de entrada,  $Q_i = 4.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , velocidad de entrada,  $v_i = 24 \text{ m/s}$ , presión de operación,  $P = 92.3 \text{ kPa}$  y concentración de partículas =  $6\text{g/m}^3$ , de las cuales el 80% de la concentración fueron partículas de entre 5 y 10 µm, y el restante, de entre 10 y 30 µm.

Bajo los parámetros y variables de operación, se revisó literatura para determinar la tecnología más apropiada para la captación de las partículas, y se optó por diseñar un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand, ya que se pueden remover partículas de 5 micras con alta eficiencia (hasta un 90%), pudiendo alcanzar un mayor rendimiento con partículas de mayor tamaño [5].

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó la metodología empleada en [6], en donde se utilizaron las siguientes ecuaciones para determinar a) el diseño

del ciclón tipo Stairmand y b) el porcentaje de eficiencia de separación del material particulado.

Para el dimensionamiento del ciclón las ecuaciones vienen dadas por el área (A), la altura de entrada del ciclón (a), ancho de la entrada del ciclón (b), diámetro del ciclón (Dc), altura de salida del ciclón (S), diámetro de salida del ciclón (Ds), altura de la parte cilíndrica del ciclón (h), altura total del ciclón (H), altura de la parte cónica del ciclón (z) y diámetro de salida del polvo (B), esquematizado en la figura 1.



*Fig. 1 Parámetros dimensionales de un ciclón tipo Stairmand.*

Los parámetros dimensionales serán aplicados en las siguientes ecuaciones:

$$A = a * b = \frac{Q}{v_i} \tag{1}$$

$$a = 0.5Dc \tag{2}$$

$$b = 0.2Dc \tag{3}$$

$$S = 0.5Dc \tag{4}$$

$$D_s = 0.5Dc \tag{5}$$

$$h = 1.5Dc \tag{6}$$

$$H = 1.5Dc \tag{7}$$

$$z = 2.5Dc \tag{8}$$

$$B = 0.375Dc \tag{9}$$

Dónde: Q= Caudal de entrada y  $v_i$ = Velocidad de entrada. La velocidad es definida como una magnitud vectorial, relacionada con el desplazamiento realizado por una partícula, dividido entre el tiempo que tarda en recorrerlo [7], juega un papel muy importante en el diseño, ya que velocidades muy bajas en la entrada del ciclón permiten la sedimentación de partículas y neutralizan el efecto de la fuerza centrífuga, generando disminución en la colección. Por lo contrario, a velocidades muy altas, se pueden suspender partículas ya colectadas, disminuyendo también la eficiencia, por lo que se recomiendan velocidades de 15.2 a 27.4 m/s [6].

Para el cálculo del rendimiento del ciclón, se utilizaron las ecuaciones de velocidad equivalente ( $v_{eq}$ ), velocidad de saturación ( $v_{sat}$ ), tiempo de relajación ( $t_i$ ), exponente de vórtice ( $n$ ) y eficiencia ( $n_i$ ), siguiendo la metodología empleada por [6].

$$v_{eq} = \sqrt[3]{\frac{4(Gr)(\mu)(\rho_p - \rho)}{3\rho^2}} \tag{9}$$

$$v_{sat} = \frac{4.913(v_{eq})(K_b^{0.4})(D_c^{0.067})(\sqrt{v_i^2})}{\sqrt[3]{K_b}} \tag{10}$$

$$n = 1 - (1 - 0.67(Dc^{0.14})\left(\frac{T}{283}\right)^{0.3}) \tag{11}$$

$$t_i = \frac{(\rho_p)(Dp_i^2)}{18\mu} \tag{12}$$

$$n_i = 1 - e\left(2\left(\frac{Gr + t_i * Q(n+1)}{Dc^3}\right)^{0.5/(n+1)}\right) \tag{13}$$

Donde  $\mu$ = viscosidad dinámica del aire,  $G_r$ = gravedad de la tierra,  $\rho_g$ = densidad del aire,  $\rho$ = material particulado,  $Dp_i$ = diámetro de partícula y  $T$ = temperatura expresada en K. De [8] se obtuvieron las condiciones de  $\mu$  y  $\rho_g$ , siendo  $3.563 \times 10^{-5}$  kg/ms y  $0.4565$ kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, para una temperatura de 500 °C. La tabla 1 muestra características generales de diseño de un ciclón tipo Stairmand [9].

**Tabla 1 Características de los ciclones de alta eficiencia tipo Stairmand.**

Dimensión	Relación dimensional	Stairmand
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1
Altura de entrada	a/Dc	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5
Altura de la parte cilíndrica	h/Dc	1.5
Altura de la parte cónica	z/Dc	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4
Diámetro de salida de polvo	B/Dc	0.375

Factor de configuración	G	551.22
Número de cabezas de velocidad	NH	6.4
Número de vórtices	N	5.5

Una vez obtenidos los cálculos de dimensionamiento y realizada la demostración de eficiencia, se realizó el modelo en CAD, con ayuda del software Solidworks®.

### 3. Resultados y discusión

Los resultados de dimensionamiento para el vórtice aplicando las ecuaciones y consideraciones de las variables del proceso, se muestran a continuación. En la tabla 2 se muestran las comparaciones entre los parámetros calculados de diseño y las características generales de diseño de un ciclón tipo Stairmand.

$$A = \frac{4.1 \frac{m^3}{s}}{24 \frac{m}{s}} = 0.1708 \text{ m}^2 \tag{Ecuación 1}$$

De ecuación 1, 2 y 3, se obtiene el valor del diámetro del ciclón.

$$Dc = \sqrt{\frac{0.1708 \text{ m}^2}{(0.5)(0.2)}} = 1.304 \text{ m}$$

$$a = 0.5(1.304 \text{ m}) = 0.652 \text{ m} \tag{Ecuación 2}$$

$$b = 0.2(1.304 \text{ m}) = 0.260 \text{ m} \tag{Ecuación 3}$$

$$S = 0.5(1.304 \text{ m}) = 0.652 \text{ m} \tag{Ecuación 4}$$

$$Ds = 0.5(1.304 \text{ m}) = 0.652 \text{ m} \tag{Ecuación 5}$$

$$h = 1.5(1.304 \text{ m}) = 1.956 \text{ m} \tag{Ecuación 6}$$

$$H = 4(1.304 \text{ m}) = 5.216 \text{ m} \tag{Ecuación 7}$$

$$z = 2.5(1.304 \text{ m}) = 3.26 \text{ m} \tag{Ecuación 8}$$

$$B = 0.375(1.304 \text{ m}) = 0.489 \text{ m} \tag{Ecuación 9}$$

Los incrementos de velocidad, generan resuspensión de partículas, por lo que, en base a los parámetros de operación, se calcula la velocidad de saltación, a partir de la relación entre  $v_{eq}$  y  $v_{sat}$ .

Es importante operar con velocidades lo más altas posibles, para el aprovechamiento de la aceleración centrífuga, sin implicar fenómenos de resuspensión [6], en donde  $(v_i/v_{sat}) < 1.35$ , por lo que se obtuvieron los siguientes resultados empíricos.

$$V_{eq} = \sqrt[3]{\frac{4(9.81 \frac{m}{s^2})(3.563 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})(1100 \frac{kg}{m^3} - 0.4565 \frac{kg}{m^3})}{3(0.4565 \frac{kg}{m^3})^2}} = 1.846 \frac{m}{s}$$

(Ecuación 9)

$$V_{sat} = \frac{4.913(1.846 \frac{m}{s})(0.2^{0.4})(1.304 \frac{kg}{m^3})^2 \sqrt[3]{(24 \frac{m}{s})^2}}{\sqrt[3]{1-0.2}} = 43.467 \frac{m}{s}$$

(Ecuación 10)

Como:

$$\frac{V_i}{V_{sat}} = \frac{24}{43.467} = 0.5521,$$

Por lo que no existe posibilidad de resuspensión de material particulado.

Para determinar la eficiencia del ciclón, es necesario realizar los cálculos de n y T, dando los siguientes resultados.

$$n = 1 - (1 - 0.67(1.304^{0.14})(\frac{392.5}{283})^{0.3}) = 0.767$$

(Ecuación 11)

Para  $t_i$ , realizaremos dos cálculos; uno basado en un diámetro de partícula de 7.5 micras (que está en el rango medio de la muestra de partículas de diámetro de 5 a 10 micras), y el otro basado en un diámetro de partícula de 20 micras (que está en el rango medio de la muestra de partículas de diámetros de 10 a 30 micras).

$$t_{i(7.5)} = \frac{((1100 \frac{kg}{m^3})(7.5 \times 10^{-7} \text{ m}))^2}{(18)(3.56 \text{ kg/ms})} = 9.656 \times 10^{-7} \text{ s} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$t_{i(20)} = \frac{((1100 \frac{kg}{m^3})(20 \times 10^{-7} \text{ m}))^2}{(18)(3.56 \text{ kg/ms})} = 6.866 \times 10^{-8} \text{ s} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Tabla 2 Características de los ciclones de alta eficiencia tipo Stairmand y parámetros de diseño calculados.

Dimensión	Relación dimensional	Parámetros de diseño	Stairmand
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.304	1
Altura de entrada	a/Dc	0.652	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.260	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.625	0.5
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.652	0.5
Altura de la parte cilíndrica	h/Dc	1.956	1.5
Altura de la parte cónica	z/Dc	3.260	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	5.216	4

Diámetro de salida de polvo	B/Dc	0.489	0.375
Factor de configuración	G	-	551.22
Número de cabezas de velocidad	NH	-	6.4
Número de vórtices	N	-	5.5

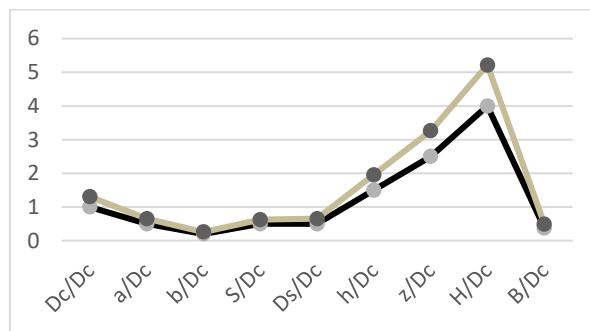


Fig. 2 Dimensiones convencionales de un ciclón de alta eficiencia (trayectoria negra), comparadas con las dimensiones calculadas para nuevo diseño (trayectoria gris).

Para determinar la eficiencia de colección de las partículas de diámetro 7.5 y 20 micras (ver tabla 3), se procedieron a realizar los siguientes cálculos:

$$n_{i7.5} = 1 - e \left( 2 \left( \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * 9.656 \times 10^{-7} \text{ s} * 4.1 \frac{m^3}{s} (0.767+1)}{1.304 \text{ m}^3} \right)^{0.5/(0.767+1)} \right) = 0.8370 \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$n_{i20} = 1 - e \left( 2 \left( \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * 6.866 \times 10^{-8} \text{ s} * 4.1 \frac{m^3}{s} (0.767+1)}{1.304 \text{ m}^3} \right)^{0.5/(0.767+1)} \right) = 0.9230 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Tabla 3 Eficiencia de colección del ciclón diseñado.

Tamaño (µm)	Dp (µm)	masa (mi)	Ti (s)	ni	ni*mi (%)
5-10	7.5	80	9.656x10 <sup>-7</sup>	0.8370	66.96
10-30	20	20	6.866x10 <sup>-8</sup>	0.9230	19.46
<b>TOTAL EFICIENCIA</b>					<b>86.42</b>

Finalmente, garantizando una eficiencia superior a la requerida, y en base a los parámetros de diseño de tabla 2, se procedió a realizar el modelado del ciclón en el software Solidworks®. (ver figuras 3 y 4).

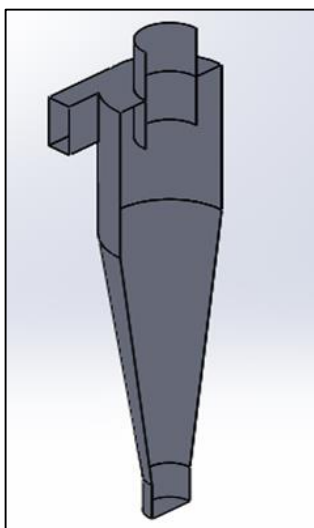


Fig. 3 Diseño de ciclón en vista isométrica seccionada a la mitad.

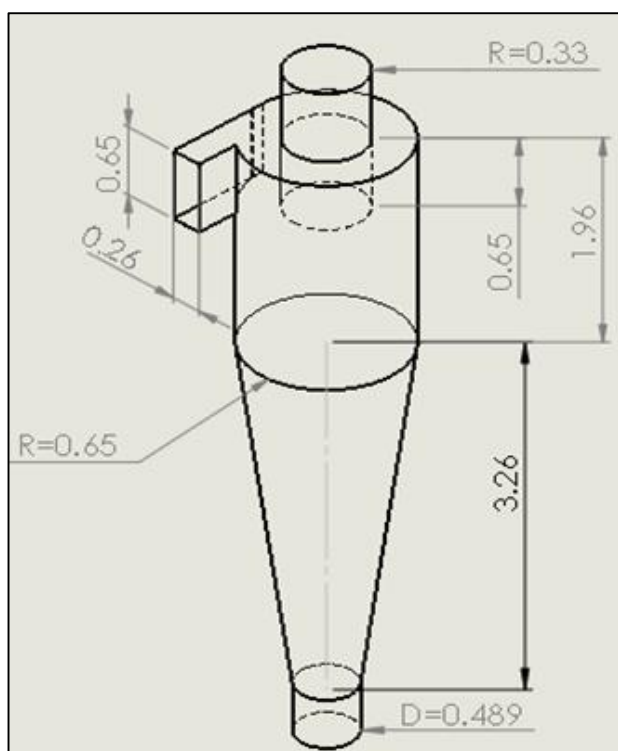


Fig. 4 Diseño de ciclón con medidas obtenidas.

#### 4. Conclusiones

Partiendo de los alcances de la investigación, se comparan las dimensiones convencionales de un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand con las dimensiones obtenidas en la parte teórica de diseño (ver figura 2), se observa una similitud en las dimensiones de los parámetros de diseño para ambos casos. Las discrepancias observables entre ambos modelos, en los parámetros del diámetro del ciclón, la altura de la parte cilíndrica y la altura de la parte

cónica, se deben a las operaciones de velocidad de entrada y flujo del proceso.

Bajo las condiciones de diseño obtenidas, se tiene un ciclón tipo Stairmand con una eficiencia de colección de 86.42%, del cual el 66.96% corresponde a colección de material particulado con dimensiones de entre 5 y 10 micrómetros, y el 19.46% para material de entre 10 y 30 micrómetros.

Se obtiene el modelo en 3D del ciclón bajo los parámetros obtenidos, de lo cual se recomienda realizar una simulación de mecánica de fluidos computacional, que puede ser realizada con el complemento de Solidworks Flow Simulation®, antes de ser fabricado e instalado en planta.

Para esta investigación se obtiene un modelo teórico de diseño cuya eficiencia de captación es superior en 11.42% al recomendado para la disminución de contaminantes particulados presentes en la problemática. Este dato se podría tomar como un margen de seguridad, en caso de que las variables del proceso cambien o sean modificadas.

Tecnológicamente, los captadores de partículas del tipo ciclónico presentan bajos costos de inversión y operación, no requieren mantenimiento, las caídas de presión son relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas, las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción y requisitos espaciales relativamente pequeños [6], por lo que son una opción viable en la separación de material particulado.

#### 5. Referencias

- [1] Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México. 2nd ed. México: Limusa, p.380.
- [2] Petit, H. A. y Barbosa, M. R., Mecánica computacional, pp. 3705-3714, 2013.
- [3] Hoffmann, A.C. & Stein, L.E., Gas Cyclones and Swirl Tubes, Springer-Verlag, 2002.
- [4] García, J. A., Efectos de la variación de dimensionamiento del buscador de vórtices en el desempeño de un separador ciclónico, p. 4, 200