

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UN SEPARADOR CICLÓN PARA LIMPIEZA DE AIRE

RESUMEN

Los separadores tipo ciclón, también conocidos como ciclones, son ampliamente conocidos por su utilización en la separación de partículas transportadas por una corriente de gas. Algunas de las aplicaciones más comunes de estos dispositivos se encuentran en la industria petroquímica y de procesamiento, para separar polvo de una corriente de gas o para recuperación de producto, y en ocasiones para la clasificación del material recuperado de acuerdo al tamaño de las partículas. La simplicidad de su geometría, su relativamente bajo consumo de energía debido a la carencia de partes móviles, y su flexibilidad con respecto a condiciones de alta temperatura y presión explican fácilmente lo adecuado de su uso en aplicaciones industriales de colección y separación de polvos y partículas transportadas por una corriente de gas.

En este proyecto se llevó a cabo el desarrollo de una metodología de diseño de los separadores tipo ciclón a partir del estudio de la geometría de la partícula y de los efectos que tienen sobre la eficiencia de separación algunas dimensiones de los mismos y las propiedades tanto del gas como de las partículas que se desean capturar.

INTRODUCCION

Los separadores tipo ciclón son dispositivos usados para separar materiales sólidos de líquidos y gases. Esto se lleva a cabo transformando la corriente sólido-gas en un vórtice de alta velocidad dentro de su estructura, la cual consiste en una salida, una descarga de sólidos y una entrada, en la cual se produce la rotación necesaria para crear el vórtice, en la figura 1 se muestra el esquema de un ciclón con entrada tangencial.

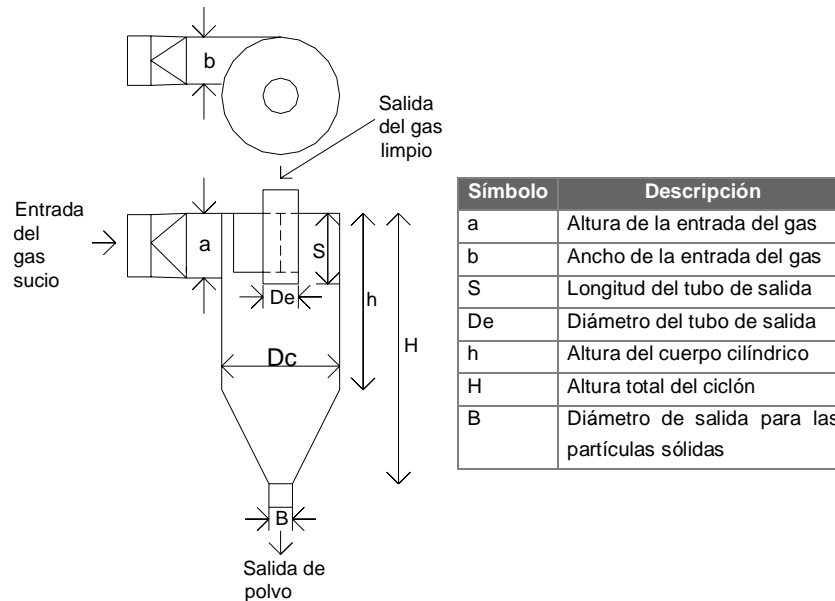


Fig. 1 Diagrama de un ciclón típico

Se han realizado un gran número de investigaciones para determinar la influencia de las dimensiones geométricas de los componentes del ciclón en su funcionamiento. Se han propuesto varias configuraciones, que han sido utilizadas ampliamente, pero a la fecha no se dispone de un diseño normalizado. En estas configuraciones todas las dimensiones están relacionadas con el diámetro del cuerpo cilíndrico del ciclón. En la tabla 1.1 se muestran las relaciones más utilizadas en el dimensionamiento de los ciclones, dadas por diferentes autores.

Relación	Descripción	Lapple (1939)	Stairmand (1951)	Swift (1969)
$Ka=a/Dc$	Altura de la entrada del gas	0.5	0.5	0.44
$Kb=b/Dc$	Ancho de la entrada del gas	0.25	0.2	0.21
S/Dc	Longitud del tubo de salida	0.625	0.5	0.5
De/Dc	Diámetro del tubo de salida	0.5	0.5	0.4
h/Dc	Altura del cuerpo cilíndrico	2.0	1.5	1.4
H/Dc	Altura total del ciclón	4.0	4.0	3.9
B/Dc	Diámetro de salida para las partículas sólidas	0.25	0.375	0.4

Tabla 1.1. Configuraciones utilizadas en el dimensionamiento de ciclones.

Sin embargo, las relaciones de diseño han sido obtenidas de manera empírica lo cual dificulta el establecimiento de una metodología única para el diseño de estos. Debido a esto, una mejor modelación de los parámetros utilizados para modelar el comportamiento de los ciclones es necesario y se llevó a cabo en este proyecto.

MÉTODOS Y MATERIALES

1. Identificar los parámetros principales para la evaluación de la operación de los ciclones.

Los parámetros utilizados para la evaluación del comportamiento de un ciclón son: diámetro de corte (D_{50}), eficiencia de separación ($\eta_{(D_p)}$) y caída de presión a través del mismo (ΔP).

El **diámetro de corte** se define como el diámetro de partícula para el cual se tiene un 50% de eficiencia de separación. Es decir, el 50% de las partículas de este diámetro que entran al ciclón transportadas por la corriente de gas son capturadas. En otras palabras, las partículas de ese tamaño tienen igual oportunidad de ser arrastradas y salir con la corriente de gas a través del tubo buscador de vórtices, que de ser capturadas por el ciclón. En la figura 2 se muestra una gráfica donde se representa al D_{50} .

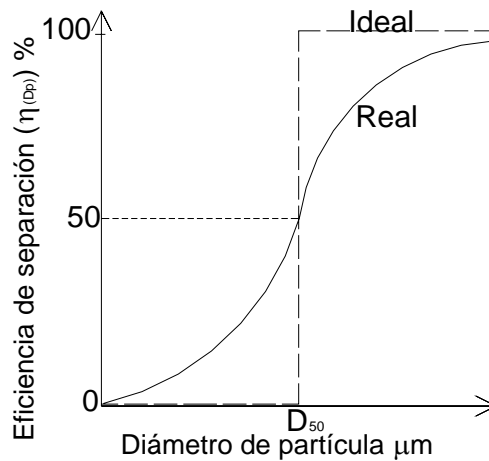


Fig. 2 Curvas del comportamiento ideal y real del ciclón para la eficiencia de separación

Otro de los factores utilizado en la evaluación del comportamiento de un ciclón es la **eficiencia de separación**. Existen varias definiciones de este concepto, entre los que se pueden considerar los siguientes:

- La fracción del peso o porcentaje de cada tamaño de partícula, que puede ser finalmente capturada por el ciclón.
- Otros autores definen la eficiencia de separación como la relación de la masa de las partículas con un diámetro D_p capturadas por en ciclón entre la masa total de las partículas con un diámetro D_p que entran al ciclón transportadas por el gas.

De los modelos de eficiencia de separación de los ciclones, se observa que los parámetros de los cuales depende la eficiencia son:

- 1) Distribución del tamaño de las partículas.
- 2) Cantidad de partículas a la entrada del ciclón.
- 3) Temperatura de la corriente del gas a la entrada.
- 4) Gravedad específica del gas y de los sólidos.
- 5) Pérdida de presión a través del ciclón.

Sin embargo, ninguno de los modelos matemáticos encontrados considera la geometría de la partícula por lo que se decidió introducirla como parámetro en un nuevo modelo matemático.

La **pérdida de presión** a través del ciclón es uno de los factores más importantes que afectan la eficiencia de separación y el diseño de estos equipos.

La pérdida de presión total a través del ciclón se compone de varias partes, que son las siguientes:

- a) Pérdida de presión originada en el ducto de entrada.
- b) Pérdida de presión originada por los vórtices.
- c) Pérdida de presión originada en el ducto de salida.

La evaluación correcta de la pérdida de presión a través del ciclón se hace necesaria para poder evaluar el comportamiento energético de estos equipos. El rango aceptable para la caída de presión total a través de un ciclón es de un valor máximo 25.4 cm columna de agua.

2. Obtener un nuevo modelo matemático para el cálculo de la eficiencia de separación y para el D_{50} .

Partiendo del balance entre la fuerza centrífuga y la fuerza de arrastre ejercidas sobre una partícula esférica dentro del separador se tiene:

$$\frac{\pi}{6} D_e^3 (\rho_p - \rho) \frac{V_t^2}{r} = 3\pi D_e \mu V_r \quad (1)$$

Donde:

r: Radio de rotación del centro del separador al punto de posición de la partícula(m)

D_e : Diámetro de la partícula con geometría esférica (m)

La ecuación (1) es válida solo para partículas esféricas; sin embargo, en la realidad muchas aplicaciones de los ciclones manejan partículas con otras geometrías, muchas de ellas irregulares, por lo que es necesario tomar esto en consideración.

Para partículas no esféricas es necesario considerar un diámetro equivalente. El diámetro equivalente de una partícula se define como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen de la partícula no esférica. El procedimiento para obtener este diámetro se muestra a continuación:

$$V_{\text{esf}} = \frac{\pi}{6} D_{\text{eq}}^3$$

Si $V_{\text{esf}} = V_{\text{partícula}}$, entonces

$$V_p = \frac{\pi}{6} D_{\text{eq}}^3$$

Despejando D_{eq} , se tiene

$$D_{eq} = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Se considera que la partícula puede tener cualquier tipo de geometría, se toma como diámetro de la partícula a la longitud mayor correspondiente a cualquiera de las dimensiones de la misma por lo que ésta se multiplicará por un factor de corrección ψ , el cual es una constante que depende de la geometría de la partícula y que se obtendrá a partir de la ecuación (3)

$$D_{eq} = \psi D_p \quad (3)$$

Donde:

D_{eq} : Diámetro equivalente de la partícula(m)

ψ : Factor de proporcionalidad propio de cada geometría de la partícula.

D_p : Diámetro de la partícula esférica(m)

Sustituyendo el valor del diámetro equivalente en la ecuación (1) se puede utilizar esa ecuación para partículas de cualquier geometría.

$$\frac{\pi}{6} (\psi D_p)^3 (\rho_p - \rho) \frac{V_t^2}{r} = 3\pi (\psi D_p) \mu V_r \quad (4)$$

Despejando el valor de la velocidad radial de la ecuación (4), se tiene una relación de la velocidad radial con respecto a la velocidad tangencial.

$$V_r = \frac{(\psi D_p)^2 (\rho_p - \rho) V_t^2}{18\mu r} \quad (5)$$

Se sabe que la ecuación que describe el comportamiento para el flujo en un vórtice es

$$V_t r^n = \text{constante}$$

Suponiendo que el flujo es ideal y no viscoso, la ecuación toma la forma de la ecuación de vórtice libre (n=1).

$$V_t r = \text{constante}$$

Debido a la disposición tangencial de la entrada del gas al separador tipo ciclón, se puede considerar que la velocidad promedio del gas a la entrada es igual a la velocidad tangencial en el punto en que el radio de rotación es igual al radio del ciclón, por lo que

$$V_c r_c = \text{constante} \quad (6)$$

Donde:

r_c : Radio del cuerpo cilíndrico principal del ciclón (m).

Se considera que la velocidad tangencial en el interior del ciclón varía en función del radio, desde el radio interior hasta el radio exterior, se tiene:

$$V_t r = \text{constante} \quad (7)$$

Donde:

V_t : Velocidad tangencial en cualquier punto(m/s)

r : Radio de rotación(m).

Igualando (6) y (7) se tiene

$$V_c r_c = V_t r \quad (8)$$

Despejando la velocidad tangencial de (8) se tiene que la velocidad tangencial en cualquier punto en el interior del ciclón es una función de la velocidad del gas a la entrada, del radio exterior del ciclón y del radio al cual se quiere calcular la velocidad, como se expresa en la ecuación 9.

$$V_t = V_c \left(\frac{r_c}{r} \right) \quad (9)$$

Sustituyendo $r_c = D_c/2$, en la ecuación (9), se tiene

$$V_t = V_c \left(\frac{D_c}{2r} \right) \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (5) se obtiene la velocidad radial en función de la velocidad del gas a la entrada del ciclón, como se observa en la ecuación (11)

$$V_r = \frac{(\psi D_p)^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \left(\frac{D_c^2}{4r^3} \right) V_c^2 \quad (11)$$

La separación de las partículas de la corriente de gas que las transporta ocurre en el momento en que éstas chocan contra la pared del ciclón, es decir cuando el valor del radio de rotación es igual al radio del ciclón, por lo que se sustituye el radio por el valor del radio del ciclón

$$V_r = \frac{(\psi D_p)^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \left(\frac{D_c^2}{4r_c^3} \right) V_c^2 \quad (12)$$

Sustituyendo el valor de r_c por $D_c/2$ en la ecuación (12) se relaciona la velocidad radial con el diámetro del ciclón.

$$V_r = \frac{(\psi D_p)^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \left(\frac{D_c^2}{\left(\frac{D_c}{2} \right)^3} \right) V_c^2$$

$$V_r = \frac{(\psi D_p)^2 (\rho_p - \rho)}{9\mu D_c} V_c^2 \quad (13)$$

Si las partículas no golpean contra la pared del ciclón recorrerán una trayectoria igual a la magnitud de la longitud del vórtice exterior dentro del ciclón, siendo finalmente arrastradas por el vórtice interior hacia la salida del gas a través del buscador de vórtices. Esta longitud se expresa en la ecuación (14)

$$L = N\pi D_c \quad (14)$$

Donde:

L: Longitud del vórtice exterior (m)

Para el cálculo de la longitud del vórtice exterior se toma en cuenta el número de vueltas completas que la corriente de gas da a lo largo del vórtice exterior (N), se considera que el diámetro del vórtice exterior es igual al diámetro del cuerpo

cilíndrico principal del ciclón y que la velocidad de las partículas al recorrer el vórtice exterior, es igual a la velocidad del gas a la entrada del ciclón.

El tiempo que tarda la partícula en recorrer el vórtice exterior es el tiempo durante el cual tiene oportunidad de chocar contra la pared del ciclón y por lo tanto de ser capturada, y se expresa en la ecuación (15).

$$t_1 = \frac{L}{V_c} = \frac{N\pi D_c}{V_c} \quad (15)$$

Donde:

t_1 : Tiempo durante el cual la partícula puede ser capturada (s)

La velocidad de sedimentación toma el valor de la velocidad radial. Se considera que el vórtice exterior mantiene un área transversal constante, igual a la de la entrada de gas al ciclón, la partícula que recorre el vórtice exterior, puede encontrarse en una posición cercana a la pared del ciclón o bien en el punto más lejano a esta dentro del vórtice, se puede calcular una distancia en la dirección radial que tiene que recorrer la partícula antes de chocar con la pared del ciclón, a partir del tiempo en que la partícula tiene oportunidad de ser capturada y la velocidad radial.

$$\text{Distancia de sedimentación} = t_1 V_r = \frac{N\pi D_c V_r}{V_c} \quad (16)$$

La entrada de la corriente de gas al ciclón tiene un área rectangular y se considera, que el vórtice exterior del ciclón mantiene esta área transversal constante.

Para obtener la fracción de partículas capturadas, se divide la distancia de sedimentación calculada en función de la velocidad radial, entre la distancia máxima de sedimentación, lo que corresponde a la eficiencia de separación en un ciclón.

$$\eta(D_p) = \frac{N\pi D_c V_r}{b V_c} \quad (17)$$

Sustituyendo en la ecuación (17) el valor de V_r de la ecuación (13) y el valor de $b = K_b D_c$, se tiene

$$\eta(D_p) = \frac{N\pi(\psi D_p)^2 (\rho_p - \rho) V_c}{9\mu K_b D_c} \quad (18)$$

La ecuación (18) es el modelo general propuesto para el cálculo de la eficiencia de separación en un ciclón de entrada tangencial.

Aunque algunos autores consideran que para todos los ciclones el número de vueltas que recorre una partícula de gas N es igual a 5, es conveniente utilizar para su cálculo la ecuación (19) debido a que este valor se relaciona con las dimensiones de cada ciclón en particular.

$$N = \frac{H+h}{2a} \quad (19)$$

A partir del modelo GQJM para el cálculo de la eficiencia de separación de un ciclón, puede obtenerse un modelo generalizado para el cálculo del D_{50} en un ciclón.

Se sabe que el D_{50} es el diámetro de partícula para el cual se tiene un 50% de eficiencia de separación en un ciclón, por lo que para obtener el valor del D_{50} debe sustituirse el valor de la eficiencia de separación (50%) correspondiente a este diámetro de partícula en la ecuación (18) se obtiene:

$$0.5 = \frac{N\pi(\psi D_{50})^2(\rho_p - \rho)V_c}{9\mu K_b D_c}$$

Despejando para D_{50}

$$D_{50} = \sqrt{\frac{4.5\mu K_b D_c}{N\pi(\Psi)^2(\rho_p - \rho)V_c}} \quad (20)$$

La ecuación (20) muestra el modelo general GQJM para el cálculo del D_{50} .

3. Comparación de los modelos matemáticos obtenidos con resultados experimentales.

Los modelos matemáticos obtenidos para el D_{50} y la eficiencia de separación ($\eta_{(D_p)}$) se aplicaron en un separador tipo ciclón. El ciclón tiene las dimensiones geométricas que se muestran en la tabla 2.

Dimensión	Descripción	Longitud (m)
a	Altura de la entrada de gas	0.165
b	Ancho de la entrada de gas	0.11
S	Longitud del tubo de salida	0.195
De	Diámetro del tubo de salida	0.16
h	Altura del cuerpo cilíndrico	0.35
H	Altura total del ciclón	1.05
B	Diámetro de salida para las partículas sólidas	0.18

Tabla 2. Dimensiones del ciclón.

El ciclón utilizado se muestra en la figura 3.



Fig. 3. Ciclón utilizado en la experimentación.

Para este caso se inicia calculando el número de vueltas que corresponden a este ciclón que se designa por c-350.

$$N = \frac{H+h}{2a} = \frac{1.05 + 035}{2(0.165)} = 4.24$$

El factor de corrección para las partículas que fueron utilizadas en la experimentación es ψ es 0.211.

Sustituyendo valores en la ecuación (18), se obtiene un constante que incluye el diámetro equivalente, π , N, $K_b=0.31$ (para este ciclón en específico).

$$\eta(D_p) = 0.21 \frac{(D_p)^2 (\rho_p - \rho) V_c}{\mu D_c} \quad (21)$$

Siguiendo la metodología utilizada en la aplicación que se muestra, se puede particularizar la ecuación general propuesta para el cálculo de la eficiencia de separación en cualquier ciclón.

Para obtener el D_{50} correspondiente a este ciclón, se sustituyeron los valores requeridos en la ecuación (2), obteniéndose:

$$D_{50} = 1.53 \sqrt{\frac{\mu D_c}{V(\rho_p - \rho_g)}} \quad (22)$$

En la figura 4 se muestra una comparación de la curva experimental de la eficiencia de separación obtenida experimentalmente y la obtenida por la ecuación propuesta, considerando la forma de la partícula para una velocidad de entrada de 14.9 m/s.

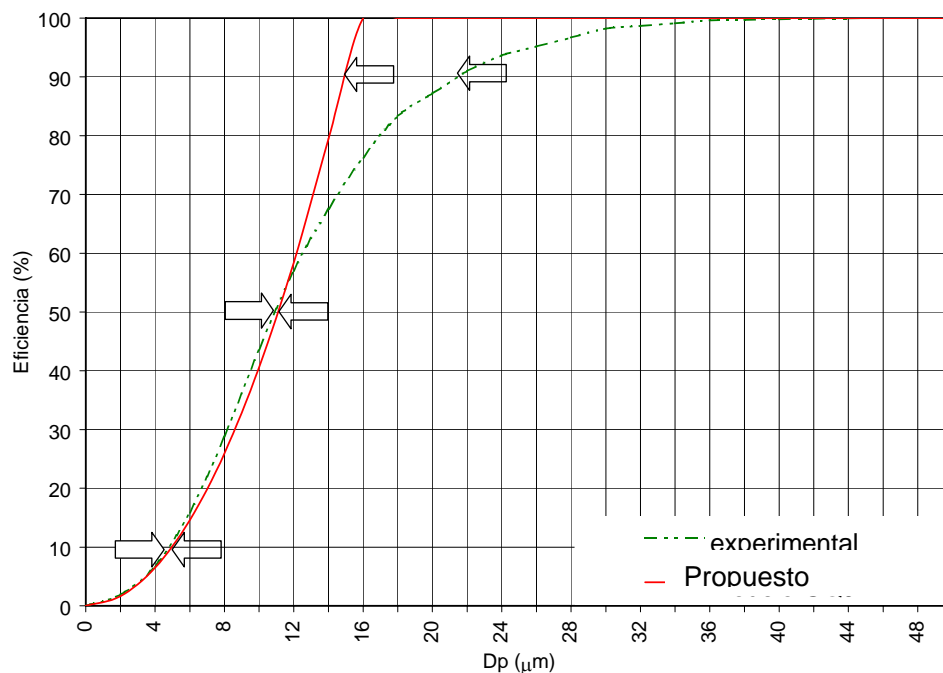


Fig. 4 Comparación de la eficiencia de separación para resultados experimentales y calculados.

En la tabla 3 se muestran los valores calculados y medidos y el error correspondiente para diversos valores de eficiencia en el ciclón.

	RESULTADOS EXPERIMENTALES	RESULTADOS DEL MODELO PROPUESTO	ERROR (%)
D ₁₀	4.78μm	4.915μm	2.82%
D ₅₀	10.91μm	11.10μm	1.74%
D ₉₀	21.35μm	14.74μm	30.96%

Tabla 3. Comparación entre los resultados experimentales y los resultados obtenidos con el modelo propuesto.

A partir de la comparación realizada, se concluye que es posible utilizar los modelos propuestos con mayor confiabilidad que los modelos previamente encontrados en la literatura, por lo que se puede crear una metodología para el diseño de los ciclones basada en estos modelos y además se pueden estudiar los efectos de diversos parámetros que intervienen en el desempeño de los ciclones. Dichos resultados se muestran a continuación.

RESULTADOS

1. Metodología para el Diseño de un Ciclón

En general, para el diseño de un ciclón lo primero que hay que saber es el valor del D₅₀ que se quiere obtener y la velocidad del gas que se desea manejar. A partir de esto se puede obtener el diámetro del ciclón (D_C).

Todas las dimensiones del ciclón están en función de D_c , por lo que al obtener este valor es relativamente fácil la obtención de las otras dimensiones del ciclón.

Para el cálculo de D_c puede utilizarse la ecuación (20), que corresponde al modelo propuesto para el D_{50} de un ciclón, ya que este modelo toma en consideración la geometría de las partículas. Además, este modelo ha sido previamente comparado por los autores con resultados experimentales y otros modelos matemáticos propuestos para la evaluación del D_{50} obteniéndose con este modelo resultados muy cercanos a los experimentales, con valor de error del 1.7% aproximadamente.

La velocidad del gas en la ecuación puede establecerse arbitrariamente de acuerdo a la capacidad del equipo con el que se cuente, los valores de N y K_b pueden seleccionarse. Los valores propuestos para el diseño del ciclón de acuerdo con alguno de los modelos mostrados en la tabla 4.

Modelo	N	K_b	N_H
Stairmand	5.5	0.2	6.4
Swift (alta eficiencia)	6.022	0.21	9.24
Lapple	6	0.25	8
Swift (general)	5.5	0.25	8
Paterson-Whitby	3.86	0.208	7.76
Azbel	4.94	0.21	10.36

Tabla 4: Valores iniciales para el diseño de ciclones

La elección que se haga de los valores de N y K_b a partir de los valores de la tabla 1 puede ser totalmente arbitraria o bien tomar en consideración el valor de N_H , el cual es un factor que influye directamente en la caída de presión que el ciclón producirá en el sistema.

El valor de la caída de presión es directamente proporcional al valor del N_H , por lo que mientras más grande sea este valor, mayor será la caída de presión.

Una vez que se haya hecho la elección de los valores de N_H y K_b se sustituyen en el modelo propuesto para el cálculo del D_{50} y se despeja el valor de D_c .

Una vez que se tiene el valor del diámetro del ciclón se caracterizan las otras dimensiones de acuerdo al modelo que se haya elegido de la tabla 4 y se asigna un valor a las dimensiones restantes utilizando la tabla 5.

	Stairmand	Swift (alta eficiencia)	Lapple	Swift (general)	Paterson -Whitby	Azbel
a/D_c	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583	0.66
b/D_c	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208	0.21
S/D_c	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583	0.775
D_e/D_c	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.58
h/D_c	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333	1.6
H/D_c	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17	3.6
B/D_c	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5	0.35

Tabla 5: Configuraciones de diseño para ciclones de entrada tangencial

Una vez que se ha realizado el cálculo, se tiene el diseño completo de un ciclón.

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

Supongamos que se desea diseñar un ciclón para capturar partículas de forma esférica ($\psi=1$), con un $D_{50} = 9\mu\text{m}$ y una velocidad del aire a la entrada del ciclón de 10 m/s.

Se considera que el ciclón operará en condiciones de aire estándar (15°C y 1 atm de presión) y que el material de las partículas tiene una densidad de 1000 kg/m³. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para el D_c para cada uno de los modelos de ciclón utilizando las condiciones antes descritas, establecidas en la tabla 3.

Modelo	D_c [m]
Stairmand	0.863
Swift (alta eficiencia)	0.844
Lapple	0.753
Swift (general)	0.690
Paterson-Whitby	0.582
Azbel	0.738

Tabla 6. Resultados del D_c para cada una de las configuraciones propuestas

Las dimensiones completas para cada una de las configuraciones se presentan en la tabla 7.

	Stairmand	Swift (alta eficiencia)	Lapple	Swift (general)	Paterson-Whitby	Azbel
a [m]	0.43	0.37	0.38	0.35	0.34	0.49
b [m]	0.17	0.18	0.19	0.17	0.12	0.16
S [m]	0.43	0.42	0.47	0.41	0.34	0.57
D_e [m]	0.43	0.34	0.38	0.35	0.29	0.43
h [m]	1.29	1.18	1.51	1.21	0.78	1.18
H [m]	3.45	3.29	3.01	2.59	1.84	2.66
B [m]	0.32	0.34	0.19	0.28	0.29	0.26
ΔP [Pa]	390.4	563.64	488	488	473.4	631.96

Tabla 7. Dimensiones completas y caída de presión para cada uno de las configuraciones propuestas.

2. Estudio de los efectos de distintos parámetros que afectan el funcionamiento de un Ciclón

Para analizar la influencia de la densidad de la partícula sobre la eficiencia de separación, se evalúa la eficiencia de separación del ciclón antes descrito con las condiciones mencionadas para partículas con $\psi = 0.21$ y diámetro de 10 μm variando la densidad del material del cual están hechas las partículas. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.

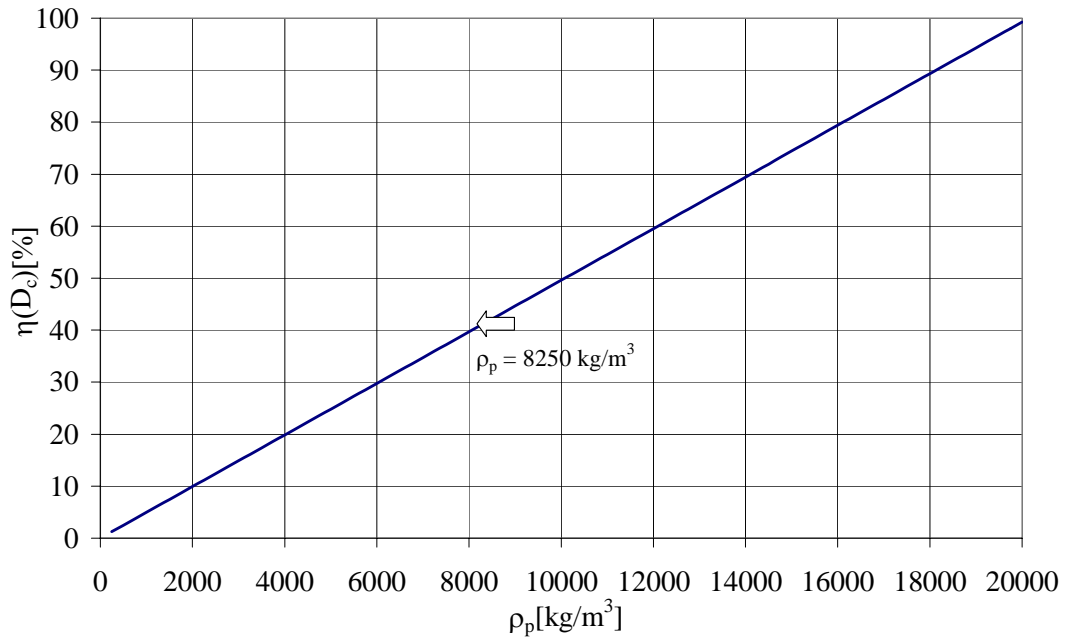


Fig. 5 Variación de la eficiencia de separación con respecto a la densidad de la partícula.

Como puede observarse en la figura 5, el aumento en la densidad de las partículas a separar resulta benéfico para la eficiencia de separación del ciclón manteniendo constantes el resto de las variables de que influyen la separación.

A continuación se analiza la influencia de la viscosidad del gas en la eficiencia de separación. El efecto del cambio en la viscosidad dinámica del gas en la eficiencia de separación del ciclón para las condiciones anteriormente establecidas se presenta en la figura 6.

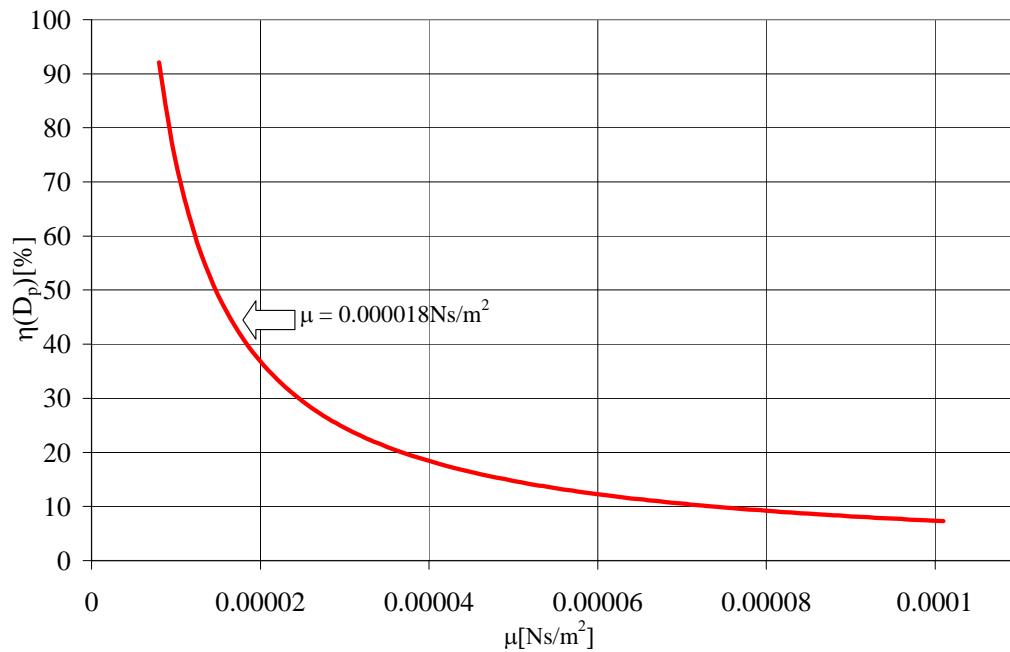


Fig. 6 Variación de la eficiencia de separación con respecto a la viscosidad de la partícula.

Al observar la figura 6, podemos notar que el efecto del incremento en la viscosidad del gas es el de una disminución en la eficiencia de separación. Esto está directamente relacionado con la temperatura del gas, por lo que podemos afirmar que un incremento en la temperatura del gas producirá una disminución en la eficiencia de separación del ciclón.

Esto puede explicarse fácilmente relacionando el aumento en la viscosidad del gas con un aumento en el arrastre sobre la partícula. La fuerza de arrastre actúa en la misma dirección pero en sentido contrario a la fuerza centrífuga, por lo que al aumentar la magnitud del arrastre se hace más difícil que la partícula alcance la pared del ciclón y sea capturada.

Los productos obtenidos en este proyecto se reducen a una metodología para el diseño de separadores tipo ciclón y al conocimiento de los efectos que el cambio en los valores de densidad y viscosidad del gas tienen sobre la eficiencia de separación de los ciclones por lo que se considera que el objetivo inicialmente planteado se ha cumplido satisfactoriamente.