



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SEPARADOR  
CICLÓNICO PARA EL EDIFICIO DE TECNOLOGÍA DE LA  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES**

**ZARAGOZA CAMPUS II.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A**

**MÓNICA AZURIM VALDEZ LINO**

**DIRECTORA DE TESIS**

**M. en C. MARINA CABALLERO DÍAZ**



**CIUDAD DE MÉXICO 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Contenido

<b>CAPÍTULO 1. RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
1.1 RESUMEN .....	8
1.2 INTRODUCCIÓN .....	9
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	10
1.4 HIPÓTESIS .....	10
<b>CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
2.1 PRINCIPIO DE SEPARACIÓN .....	12
2.2 FACTOR DE CONFIGURACIÓN 'G' .....	15
2.3 TIEMPO DE RELAJACIÓN $T_1$ .....	17
2.4 EXPONENTE DEL VÓRTICE ' $\pi$ ' .....	18
2.5 NÚMERO DE GIROS.....	19
2.6 VELOCIDAD DE SALTACIÓN .....	22
2.7 CAÍDA DE PRESIÓN .....	24
2.8 VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO .....	26
2.8.1 VARIACIÓN DEL CAUDAL:.....	26
2.8.2 VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL GAS: .....	26
2.8.3 VARIACIÓN EN LA DENSIDAD DEL GAS:.....	27
2.8.4 VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS: .....	27
2.9 CLASIFICACIÓN DE LOS SEPARADORES CICLÓNICOS .....	28
<b>2.10 EFICIENCIA .....</b>	<b>32</b>
<b>2.11 VENTAJAS .....</b>	<b>34</b>
<b>2.12 DESVENTAJAS .....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 3. MEMORIA DE CÁLCULO .....</b>	<b>35</b>
3.1 MEMORIA DE CÁLCULO DEL SEPARADOR CICLÓNICO TEORÍCO.....	35
3.2 MEMORIA DE CÁLCULO DEL SEPARADOR CICLÓNICO A CONTRUIR. 44	
3.3 CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR CICLÓNICO.....	52
3.4 EQUIPO Y MATERIALES PARA LA EXPERIMENTACIÓN .....	59

3.5 MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO .....	60
3.6 MANTENIMIENTO DEL SEPARADOR CICLÓNICO .....	60
<b>CAPÍTULO 4 EXPERIMENTACIÓN .....</b>	<b>61</b>
4.1 EXPERIMENTACIÓN CON EL REACTIVO 1 (FRIJOL) .....	61
4.2 EXPERIMENTACION CON EL REACTIVO 2 (MAÍZ) .....	65
4.3 RESULTADOS.....	68
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1 CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
BIBLIOGRAFÍA .....	79

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Separador ciclónico.

Figura 2. Mecanismos de separación de recolección de partículas en un separador ciclónico.

Figura 3 Fuerzas que actúan sobre una partícula dentro del separador ciclónico.

Figura 4 Curva de eficiencia de captación de un separador ciclónico.

Figura 5. Separador ciclónico de entrada circular.

Figura 6. Separador ciclónico de entrada rectangular

Figura 7. Separador ciclónico de entrada tipo voluta o espiral

Figura 8. Separador ciclónico con entrada de gas axial

Figura 9. Tipos de salida de gas y las partículas en los separadores ciclónicos

Figura 10 Partes principales de un separador ciclónico.

Figura 11. Separador ciclónico con partículas adheridas de la malla 270.

Figura 12. Separador ciclónico con partículas adheridas de maíz de malla 300.

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Dimensiones de un separador ciclónico.

Tabla 2. Valores de un separador ciclónico Stairmand.

Tabla 3. Muestras de frijol con malla 20.

Tabla 4. Muestras de frijol con malla 80.

Tabla 5. Muestras de frijol de malla 140.

Tabla 6. Muestras de maíz de malla 20.

Tabla 7. Muestras de maíz de malla 80.

Tabla 8. Muestras de maíz de malla 140.

Tabla 9. Resultados de diseño del separador ciclónico.

## **LISTA DE GRÁFICAS**

Gráfica 1. Muestras de frijol de malla 20

Gráfica 2. Muestras de frijol de malla 80

Gráfica 3. Muestras de frijol de malla 140

Gráfica 4. Muestras de frijol con diferentes tamaños de partículas

Gráfica 5. Muestras de maíz de malla 20

Gráfica 6. Muestra de maíz de malla 180

Gráfica 7. Muestras de maíz de malla 140

Gráfica 8. Muestras de maíz con diferentes tamaños de malla

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a Dios por permitirme llegar hasta esta etapa y siempre estar conmigo protegiéndome, a mis padres Mónico Valdez Sánchez y Leonor Lino Barrueta por darme la vida y su apoyo incondicional esperando ser un orgullo para ellos. Agradezco infinitamente a mi esposo Gilberto Ríos Negrete que fue un pilar importante para mi formación su apoyo incondicional a pesar de las adversidades su confianza y amor, gracias a la Universidad que me dio la oportunidad de conocer personas maravillosas mis amigos y compañeros Carlitos, Luz y familia, Sonia, Christian, Paty, Ray, Michel, Dianita, Jaz, Kike, Daf.

Gracias a mis profesores pero en especial a la maestra Marina Caballero Díaz mi asesora por su paciencia sus conocimientos y su motivación que me ayudaron en este trabajo de investigación inculcando en mi un sentido de responsabilidad y compromiso por lo que se ha ganado mi admiración y lealtad sintiéndome en deuda por todo lo recibido durante el desarrollo de mi tesis.

Quiero agradecer a las personas que me ayudaron de manera directa e indirecta con una palabra de aliento, un consejo, un regaño que finalmente me ayudaron a seguir adelante sin parar y concluir mi propósito a mi cuñada Magali Ríos Negrete por siempre estar ahí cuando más la necesité con una sonrisa y un échale ganas de cierta manera me motivaron y esa manera de presumirme con sus amigos me hace sentirme orgullosa de mi.

Quiero agradecer a mis hermanas por su apoyo pero en especial a Bere por cuidarme a mi bebe mientras estudiaba ya que sin ella no hubiera podido llegar a terminar, gracias por tu paciencia infinita hacia ese ser, maravilloso el cual te confié y le diste lo mejor de ti.

Siento que estoy en deuda con todas esas personas que me dieron algo de su ser a todas ellas quiero dedicarles este trabajo, mi lealtad y compromiso, pero en especial se lo dedico a mi hija Erandy Yoesli, esperando ser en algún futuro un ejemplo a seguir y del cual ella se sienta orgullosa de su mamá



## CAPÍTULO 1. RESUMEN

### 1.1 RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la descripción de lo que es un separador ciclónico, así como la importancia que tiene en la industria química, al ser un equipo de bajo costo y elevada eficiencia ocupado principalmente para la separación de polvos en un pretratamiento.

El objetivo del trabajo fue realizar un prototipo de un separador ciclónico que será utilizado por los alumnos de la carrera de Ingeniería Química de la facultad de estudios superiores Zaragoza como parte de su formación académica cuyo objetivo principal es que los alumnos tengan contacto con otro tipo de equipos que se encuentran en la industria y tengan conocimiento de su utilización.

El trabajo se puede dividir en dos etapas: 1) la construcción y dimensionamiento del separador ciclónico y 2) arranque y pruebas.

De acuerdo a la caracterización de los reactivos utilizados, proporcionados por alumnos de semestres anteriores se realizan las pruebas pertinentes para conocer la eficiencia del equipo, así como su desempeño con diferentes tamaños de partículas.

Se realizaron 18 muestras de cada reactivo que fueron un total de 36 muestras, las cuales nos arrojan resultados favorables, a mayor tamaño de partícula se llega a una buena separación y una formación de vórtice, en cambio con las partículas más pequeñas el equipo es ineficiente y no logra una óptima separación.

## 1.2 INTRODUCCIÓN

Los ciclones son dispositivos de separación de partículas transportadas por un fluido, entre sus aplicaciones se utilizan en la limpieza de gases inertes agresivos, como por ejemplo, los que se dan en la salida en un lecho fluidizado a presión o para una separación de polvos.

Los separadores ciclónicos suelen encontrarse en etapas de pre limpieza en serie o con otros equipos de mayor eficiencia. Estos equipos también se emplean como clasificadores de partículas.

La función principal de un ciclón es separar la mayor cantidad de sólidos de la corriente gaseosa con una mínima pérdida de presión posible.

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvos.

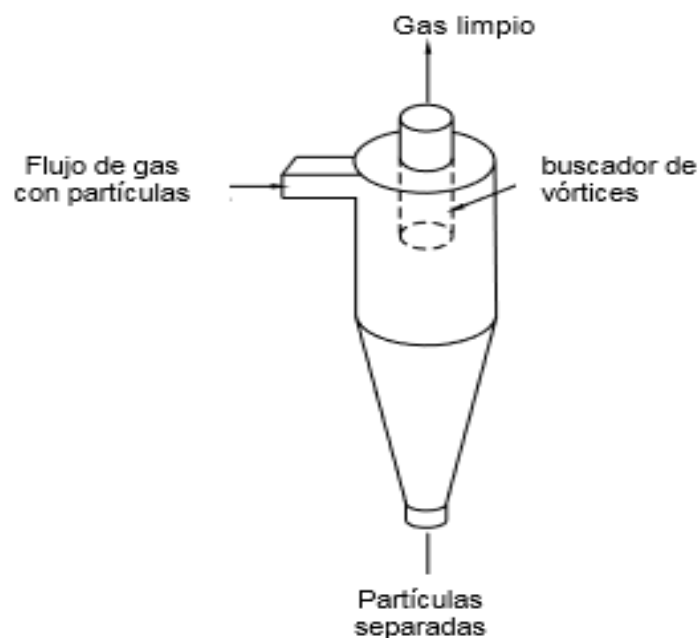


Figura 1. Separador ciclónico.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Se dimensionará y construirá un separador ciclónico a escala para el apoyo académico de la comunidad estudiantil de la carrera de ingeniería química de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, con el fin de tener un aporte en la formación como ingenieros químicos y a su vez tengan conocimiento y manejo de otros equipos que se encuentran en la industria.

### 1.4 HIPÓTESIS

Se construirá un separador ciclónico para el edificio de tecnología de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza cuyo principal propósito académico es separar partículas sólidas utilizando aire como servicio auxiliar.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Construir un separador ciclónico que permita la separación de partículas sólidas de diferente tamaño que será colocado en el edificio de tecnología de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza campus II, con el propósito de ayudar a la comunidad estudiantil de la carrera de ingeniería química.

### **1.5.2 OBJETIVOS PARTICULAR**

- Dimensionar un separador ciclónico.
- Construir un separador ciclónico.
- Determinar el tamaño de partícula óptimo que puede ser separado en dicho equipo.
- Calcular la eficiencia del equipo.
- Determinar la velocidad del flujo de entrada de aire óptimo con la que debe operar el equipo.

## CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO

### 2.1 PRINCIPIO DE SEPARACIÓN

El separador ciclónico es un dispositivo para remover partículas sólidas de una corriente fluida como gas o aire por medio de una fuerza centrífuga y es uno de los más utilizados para este fin.

La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, la figura 2 nos muestra el movimiento de las partículas de mayor diámetro hacia las paredes del ciclón debido a la fuerza centrífuga.

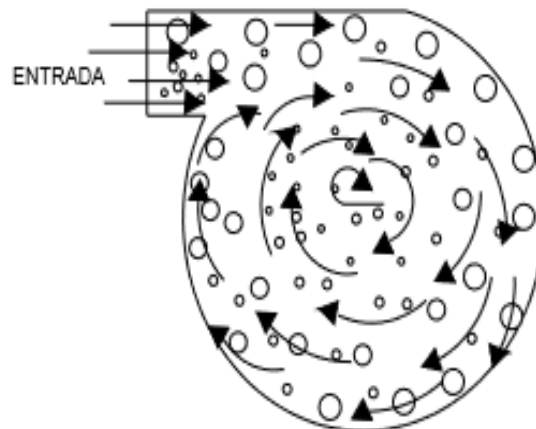


Figura 2. Mecanismos de separación de recolección de partículas en un separador ciclónico

Una partícula dentro del separador ciclónico es sometida a una fuerza centrífuga, que es debida a la aceleración centrífuga y a la masa de la partícula. La fuerza centrífuga es balanceada por una fuerza opuesta creada debido a un gradiente en la presión estática a lo largo de la dirección radial esta fuerza (fuerza de arrastre) actúa sobre el eje de rotación y mantiene a la partícula en su trayectoria. En la figura 3 se muestran las líneas de acción de las fuerzas antes mencionadas.

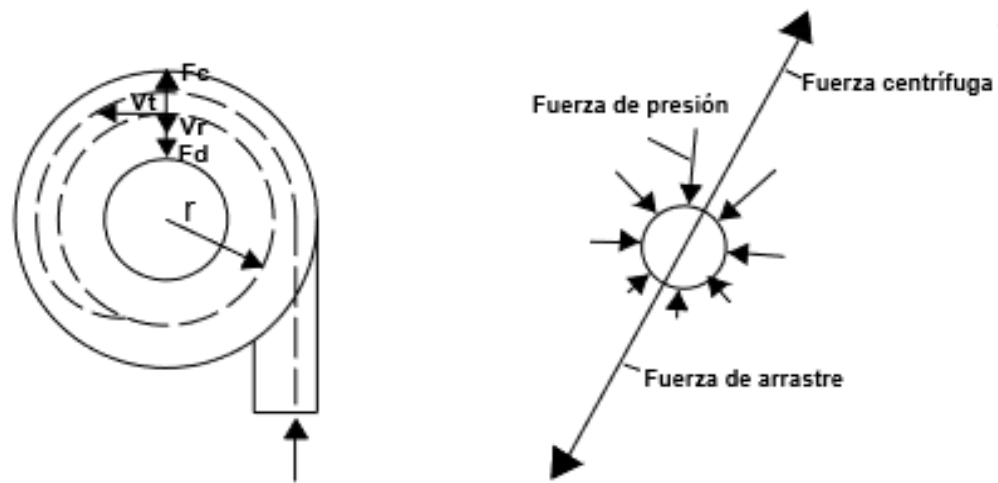


Figura 3 Fuerzas que actúan sobre una partícula dentro del separador ciclónico.

Se puede observar que en la figura 3 que la fuerza dirigida hacia el exterior actúa sobre las partículas aumenta con la componente tangencial de la velocidad y la fuerza dirigida hacia el interior aumenta con la componente radial por lo que un separador ciclónico se debe diseñar de manera que la velocidad tangencial sea lo más grande posible mientras que la velocidad radial debe minimizarse.

Los separadores ciclónicos son más adecuados para separar partículas con diámetros mayores. En cuanto a la eficiencia los ciclones son equipos muy eficientes. Sin embargo se observa que las partículas de tamaño menor son capturadas. Esto indica que intervienen otros factores en la captura de partículas como las colisiones entre las partículas y la turbulencia que puede afectar la

eficiencia del ciclón. En la figura 4 se muestra una curva con distintos valores de eficiencia para cada diámetro de los separadores de los ciclones.

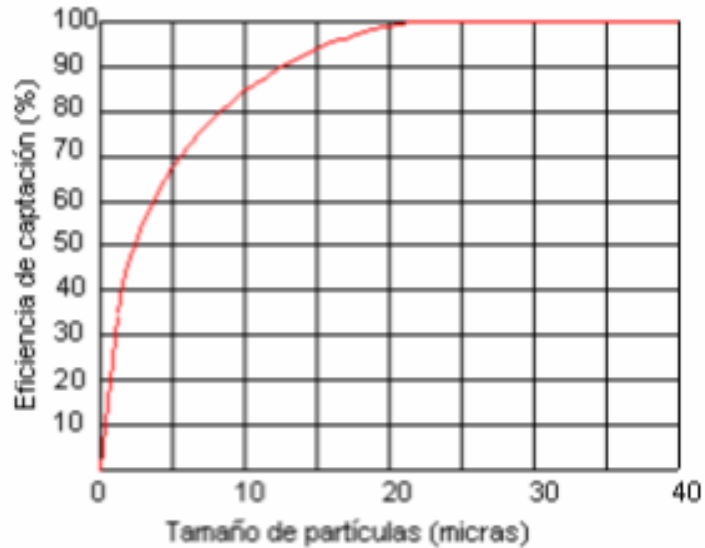


Figura 4. Curva de eficiencia de captación de un separador ciclónico.

Teóricamente, el aumento de velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento en la presión centrífuga y por tanto un aumento en la eficiencia pero las elevadas velocidades generan una resuspensión de las partículas no logrando la separación.

En cuanto a la construcción de los separadores ciclónicos al no contar con partes móviles son de fácil construcción y se pueden realizar con una amplia gama de materiales soportando elevadas temperaturas y presiones altas.

## 2.2 FACTOR DE CONFIGURACIÓN 'G'

El factor de configuración resulta de relacionar algunas proporciones normalizadas por el diámetro del ciclón; la ecuación 1 nos presenta el factor de configuración.

$$G = \frac{8K_c}{(K_a \times K_b)^2} \quad (1)$$

En la cual:

$K_c$  = Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón

$K_a$  = Relación entre la altura de la entrada y el diámetro del ciclón ( $a/D_c$ ).

$K_b$  = Relación entre el ancho de la entrada y el diámetro del ciclón ( $b/D_c$ ).

El factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón ( $K_c$ ) se calcula con la ecuación 4

$$K_c = \frac{\left( V_{sc} + \frac{V_R}{2} \right)}{D_c^3} \quad (2)$$

En la cual:

$V_{sc}$  = Volumen evaluado sobre la salida del ciclón,  $m^3$ .

$V_R$  = Volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón ( $m^3$ ), siempre que se cumpla la siguiente condición:

$$L < H - S \quad (3)$$



En la cual:

$L$  = Longitud natural del ciclón, m.

$H$  = Altura total del ciclón, m.

$S$  = Altura de la salida, m.

La longitud natural del ciclón corresponde a longitud necesaria para iniciar el vórtice ascendente, tomada desde la altura superior del ciclón; se puede calcular con la ecuación 4. La longitud natural del ciclón  $L$  es común para cada familia de ciclones.

$$L = 2.3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a \times b}} \quad (4)$$

El volumen evaluado sobre la salida del ciclón ( $V_{sc}$ ) evalúa con la ecuación 5.

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left( S - \frac{a}{2} \right) \times (D_c^2 - D_s^2) \quad (5)$$

El volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural ( $V_R$ ) se calcula con:

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times D_c^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times D_c^2 \times (L + S - h) \times$$

$$\left[ 1 + \frac{K_L}{D_c} + \left( \frac{K_L}{D_c} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times D_s^2 \times L \quad (6)$$

En la cual  $K_L$  se denomina el factor de dimensiones lineales y se calcula con la ecuación 7.

$$K_L = Dc - (Dc - B) \times \left[ \frac{S + L - h}{z} \right] \quad (7)$$

### 2.3 TIEMPO DE RELAJACIÓN $T_i$

El tiempo de relajación es el tiempo necesario para que una partícula alcance la velocidad terminal de caída; se evalúa con la ecuación 8

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu} \quad (8)$$

En la cual:

$\rho_p$  = Densidad de la partícula,  $\text{kg/m}^3$ .

$D_{pi}$  = Diámetro de la partícula, m.

$\mu$  = Viscosidad del gas,  $\text{kg/ms}$ .

## 2.4 EXPONENTE DEL VÓRTICE [ n ]

El exponente del vórtice resulta de relacionar la velocidad tangencial y el radio de giro de un movimiento en forma de vórtice. Los análisis teóricos revelan que  $n$  debe ser igual a 1.0 en ausencia de fricción de pared (vórtice libre). No obstante, las mediciones reales señalan que  $n$  puede variar de 0.5 a 0.7 de acuerdo con el tamaño del ciclón y la temperatura; una ecuación empírica muy utilizada es la ecuación 9

$$n = 1 - (1 - 0.67 \times D_c^{0.14}) \times \left[ \frac{T}{283} \right]^{0.3} \quad (9)$$

En la cual:

$n$  = Exponente del vórtice (valor adimensional).

$D_c$  = Diámetro del ciclón, m.

$T$  = Temperatura del gas, K.

## 2.5 NÚMERO DE GIROS

Otro modelo para estimar la eficiencia de remoción de partículas en los ciclones es la que se basa en el número de giros o vórtices externos que presenta la corriente gaseosa en el interior del ciclón. El número de giros o vórtices puede ser estimado de las dimensiones del ciclón, debido a que estos dependen de la altura de cada uno de los vórtices y la longitud del ciclón:

$$N = \frac{1}{a} \times \left[ h + \frac{z}{2} \right] \quad (10)$$

Asumiendo un flujo mezclado, la expresión que relaciona la eficiencia de remoción con los parámetros del ciclón y las condiciones de operación es:

$$\eta_i = 1 - e \left[ \frac{-\pi \times N \times \rho_p \times D_p^2 \times V_i}{9 \times \mu \times b} \right] \quad (11)$$

En la cual:

$\eta_i$  = Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.

Este modelo indica la fuerte dependencia que tiene la eficiencia con el diámetro de las partículas, el número de giros o vórtices y la velocidad de entrada.

Sin embargo, el modelo predice un valor finito para el diámetro de la partícula, arriba del cual la eficiencia de colección es 100% (tamaño crítico), mientras la evidencia experimental muestra que la eficiencia se aproxima asintóticamente con el incremento del diámetro de la partícula. El diámetro crítico de la partícula está dado por:

$$D_{p\text{critico}} = \sqrt{\frac{9 \times \mu \times b}{\pi \times N \times \rho_p \times V_i}} \quad (12)$$

La eficiencia obtenida por cualquiera de estos métodos (es la eficiencia 'al vacío', es decir, la que se obtendría separando partículas aisladas. En la práctica, la interacción entre partículas hace que la eficiencia aumente con la concentración de partículas. Por lo tanto, las ecuaciones 1 y 13 son válidas solamente para concentraciones de partículas que se encuentran por debajo de  $2.0 \text{ g/m}^3$ , medidos a condiciones de referencia. La eficiencia de colección de los ciclones varía en función del tamaño de la partícula y del diseño del ciclón. La eficiencia de ciclones generalmente, aumenta con:

- a) El tamaño de partícula y/o la densidad.
- b) La velocidad en el conducto de entrada.
- c) La longitud del cuerpo del ciclón.
- d) El número de revoluciones del gas en el ciclón.
- e) La proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del conducto de salida del gas.
- f) La concentración de las partículas.
- g) El pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón.

La eficiencia del ciclón disminuirá con los aumentos en:

- a) La viscosidad del gas.
- b) El diámetro del cuerpo.
- c) El diámetro de la salida del gas.

d) El área del conducto de entrada del gas.

e) La densidad del gas.

Un factor común que contribuye a la disminución de eficiencias de control en los ciclones es el escape de aire en el conducto de salida del polvo.

## 2.6 VELOCIDAD DE SALTACIÓN

En los ciclones, la velocidad de entrada es un parámetro fundamental; velocidades muy bajas permiten la sedimentación de partículas y neutralizan el efecto de la fuerza centrífuga generando disminución en la eficiencia de colección; velocidades muy altas pueden resuspender partículas previamente colectadas, disminuyendo también la eficiencia. La experiencia indica que la velocidad de entrada al ciclón debe situarse en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s.

Kalen y Zenz propusieron la existencia de una 'velocidad de saltación' en el ciclón para explicar por qué la eficiencia de colección algunas veces descendía con incrementos en la velocidad de entrada. De lo anterior se puede observar que lo ideal es trabajar con velocidades de entrada lo suficientemente altas para aprovechar el efecto de la aceleración centrífuga, sin sobrepasar la velocidad que implica resuspensión del material ya colectado. La correlación semiempírica para la velocidad de saltación es:

$$V_s = \frac{4.913 \times W \times K_b^{0.4} \times D_c^{0.067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}} \quad (13)$$

En la cual:

$V_s$  = Velocidad de saltación, m/s.

$V_i$  = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, m/s.

$W$  = Velocidad equivalente, m/s.

La velocidad equivalente se evalúa a través de la siguiente ecuación.

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}} \quad (14)$$

En la cual:

$\rho_p$  = Densidad de la partícula,  $\text{kg/m}^3$ .

$\rho_i$  = Densidad del gas portador,  $\text{kg/m}^3$ .

$\mu$  = Viscosidad del gas portador,  $\text{kg/ms}$ .

Por lo tanto, la velocidad de saltación es función de las propiedades de las partículas y del fluido, así como de las dimensiones del ciclón.

Kalen y Zenz desarrollaron correlaciones experimentales entre la relación velocidad de entrada/ velocidad de saltación y la eficiencia del ciclón, encontrando lo siguiente:

- La máxima eficiencia de colección ocurre cuando la velocidad de entrada es 1.25 veces la velocidad de saltación.
- Cuando la velocidad de entrada es mayor a 1.35 veces la velocidad de saltación, se produce resuspensión del material ya capturado.



## 2.7 CAÍDA DE PRESIÓN

La caída de presión es un parámetro importante debido a que relaciona directamente los costos de operación. La caída de presión en un ciclón puede deberse a las pérdidas a la entrada y salida, y pérdidas de energía cinética y fricción en el ciclón.

Las eficiencias de remoción en un ciclón se pueden aumentar al incrementar las velocidades de entrada, pero esto también incrementa las caídas de presión. A mayor pérdida de presión aumentan los requerimientos de potencia en el ventilador y, por lo tanto, mayor consumo de energía. Existen diferentes ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón.

Las pérdidas de presión menores a 2488.16 pascales (10 in H<sub>2</sub>O) son generalmente aceptadas.

Una de las ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón es la desarrollada por Shepherd y Lapple.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times V_i^2 \times N_H \quad (15)$$

En la cual:

$\Delta P$  = Caída de presión en el ciclón, Pa.

$\rho$  = Densidad del gas portador, kg/m<sup>3</sup>.

$V_i$  = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, m/s.

$N_H$  = Número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón.

El número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón se puede hallar con la siguiente ecuación:

$$N_H = K \times \frac{a \times b}{D_s^2} \quad (16)$$

En la cual:

$K$  = Constante, toma el valor de 16 para entrada tangencial.

La pérdida de presión en un ciclón depende del cuadrado de la velocidad de entrada, por lo tanto, a mayor velocidad de entrada mayor pérdida de presión; lo anterior implica en la práctica el sacrificar un poco de eficiencia para disminuir los requerimientos de energía.

Aunque otras ecuaciones han sido formuladas a partir de consideraciones teóricas, se ha encontrado que generalmente no son tan precisas como la ecuación de Shepherd y Lapple, la cual es considerada como la más útil para calcular la caída de presión.

## 2.8 VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO

A menudo es necesario evaluar el funcionamiento de los ciclones cuando operan en condiciones fuera de diseño. La eficiencia de un determinado ciclón varía con las condiciones de trabajo. A continuación se presentan algunas expresiones que permiten predecir de forma aproximada dicha variación.

### 2.8.1 VARIACIÓN DEL CAUDAL

Implica evidentemente un cambio en la velocidad de entrada al ciclón. Si no se dispone de datos experimentales, para variaciones poco importantes del caudal, la nueva eficiencia puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^{0.5} \quad (17)$$

### 2.8.2 VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL GAS

el cambio en la eficiencia debido a cambios en la viscosidad del gas puede estimarse mediante la expresión:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[ \frac{\mu_1}{\mu_2} \right]^{0.5} \quad (18)$$

Las variaciones en la viscosidad se deben principalmente a cambios de temperatura, ya que los cambios de presión no afectan de manera significativa la viscosidad.

Un incremento en la temperatura del gas tiene dos efectos principales: se incrementa tanto el caudal de gas como su viscosidad. Por lo tanto, el efecto total, es el producto de los efectos individuales.

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^{0.5} \left[ \frac{\mu_1}{\mu_2} \right]^{0.5} \quad (19)$$

### 2.8.3 VARIACIÓN EN LA DENSIDAD DEL GAS

El cambio en la eficiencia debido a cambios en la densidad del gas puede estimarse mediante la expresión:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[ \frac{\rho_p-\rho_2}{\rho_p-\rho_1} \right]^{0.5} \quad (20)$$

### 2.8.4 VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS

Si aumenta la concentración de partículas crecerá la eficiencia de captación; de forma aproximada:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[ \frac{C_2}{C_1} \right]^{0.182} \quad (21)$$

Esta ecuación es necesaria para corregir la eficiencia estimada con las ecuaciones 1 y 13 cuando la concentración de partículas sea superior a 2.0 g/m<sup>3</sup> medido a condiciones de referencia. En este caso  $\eta_1$  será la eficiencia hallada con las ecuaciones 1 ó 13 y  $C_1$  el valor de 2.0 g/m<sup>3</sup>, y  $\eta_2$  será la nueva eficiencia para una concentración de partículas  $C_2$  condiciones de referencia mayor de 2.0 g/m<sup>3</sup>.

## 2.9 CLASIFICACIÓN DE LOS SEPARADORES CICLÓNICOS

Los separadores ciclónicos para la separación de partículas transportadas en una corriente de fluido son ampliamente usados en la industria en la cual de estos existen varios tipos. Se pueden clasificar a los separadores ciclónicos de acuerdo a varias características propias de estos dispositivos. Una de las características consideradas para su clasificación es la configuración de entrada del gas y partículas la cual puede ser tangencial o axial. Dentro de los ciclones con entrada tangencial se tiene:

- a) Ciclones con entrada circular
- b) Ciclones con entrada rectangular
- c) Ciclones con entrada tipo voluta o en espiral

En las figuras 5 , 6 y 7 ilustran las configuraciones para los ciclones con la entrada tangencial.

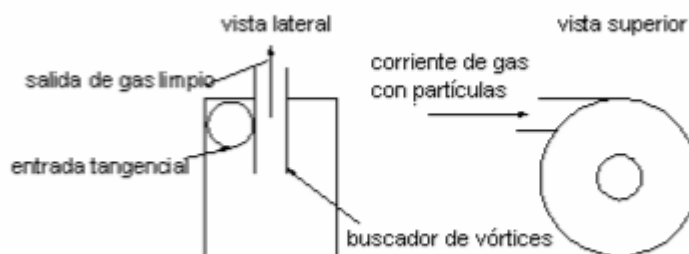


Figura 5. Separador ciclónico de entrada circular.

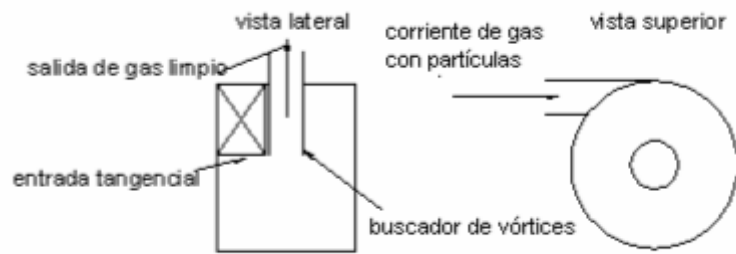


Figura 6. Separador ciclónico de entrada rectangular

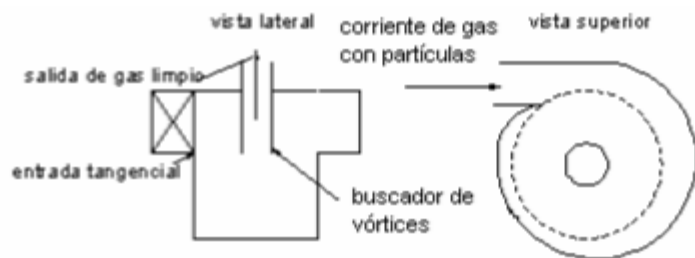


Figura 7. Separador ciclónico de entrada tipo voluta o espiral

Los ciclones con entrada axial cuentan con un arreglo de paletas en espiral como se muestra en la figura 8

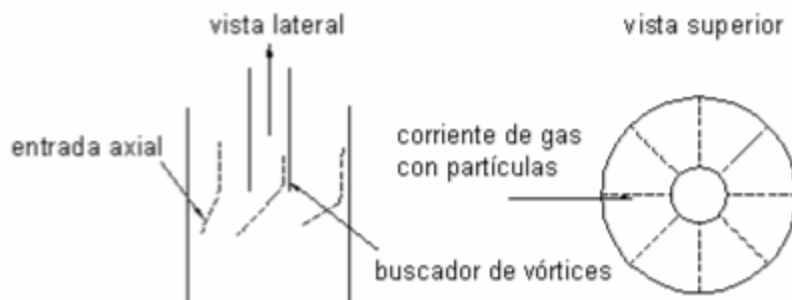


Figura 8. Separador ciclónico con entrada de gas axial

Otra característica utilizada para su clasificación de ciclones es la forma de su cuerpo dentro de una clasificación se tienen dos tipos de construcción:

- a) Cilindro sobre cono
- b) Únicamente cilindro

La dirección de flujo también se utiliza para clasificar a estos equipos

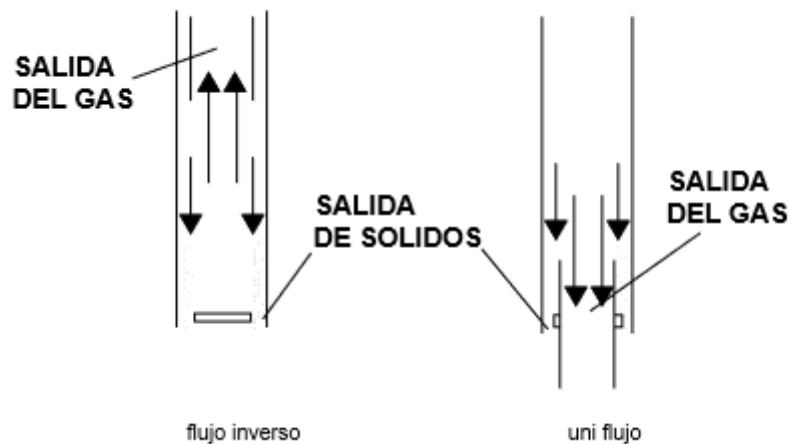


Figura 9. Tipos de salida de gas y las partículas en los separadores ciclónicos

Los separadores ciclónicos que más se utilizan en la industria son los de flujo inverso dentro de los que se pueden encontrar.

- a) De entrada tangencial (rectangular o voluta) y de cuerpo tipo cilindro sobre cono
- b) De entrada axial de paletas en espiral y cuerpo en forma cilíndrica

Los separadores que más se utilizan en la industria son los de flujo inverso de entrada tangencial de cuerpo cilíndrico sobre cono para la separación de partículas transportadas por una corriente de fluido por medio de la fuerza

centrífuga, dichos dispositivos cuentan con un cuerpo de sección cilíndrica a la que está unido a una base cónica para facilitar la descarga de los sólidos, donde el gas sucio entra de forma tangencial por la parte superior del ciclón, las partículas son separadas de la corriente gaseosa por fuerzas centrífugas descendiendo helicoidalmente hacia el conducto de salida.

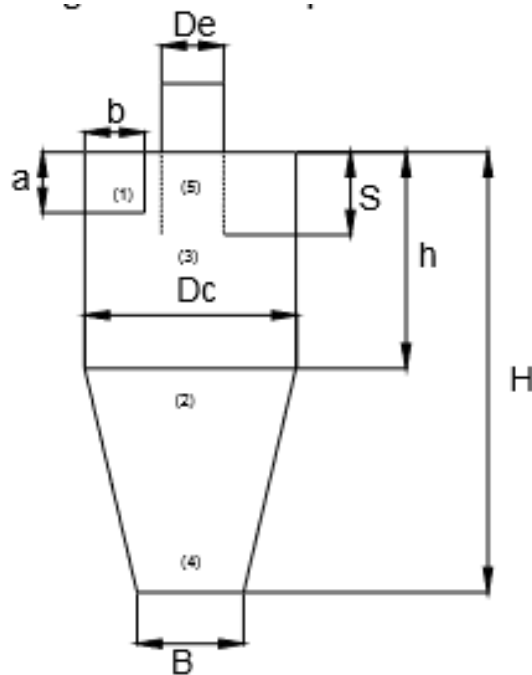


Figura 10. Partes principales de un separador ciclónico

**Partes de un separador ciclónico**

De	Diámetro del buscador de vórtices
Dc	Diámetro del cuerpo del cilindro del ciclón
a	Altura de la entrada tangencial
b	Ancho de la entrada tangencial
S	Altura del buscador de vórtices
h	Altura del cuerpo del cilindro del ciclón
H	Altura del separador ciclónico
B	Diámetro del ducto de descarga del separador ciclónico

Tabla 1. Dimensiones de un separador ciclónico.



## 2.10 EFICIENCIA

### EFICIENCIA DE SEPARACIÓN

La eficiencia de la separación se puede definir como la fracción de los sólidos que son separados a su paso por el ciclón comúnmente viene dar en porcentaje sobre la masa de solidos que separan los ciclones suele estar compuesta de distintos tamaños.

Los modelos basados en una relación de masas

$$\eta = \frac{m_e}{m_s} \times 100 \quad (22)$$

Donde:

$m_e$ = masa de entrada de partículas al separador ciclónico

$m_s$ = masa de salida de partículas por el separador ciclónico

Dentro de los factores que tienden a aumentar la eficiencia en un separador ciclónico son:

- a) Aumento en el tamaño de la partícula
- b) Aumento en la velocidad en el conducto de entrada
- c) Aumento del número de revoluciones del gas dentro del ciclón

- d) Aumento en la proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del buscador de vórtices
- e) Aumento en la concentración de las partículas
- f) Aumento en el pulimento de la superficie interior del separador ciclónico

Dentro de los factores que tienden a disminuir la eficacia de separación de los separadores se tienen:

- a) Aumento de la viscosidad aumentando la temperatura del gas
- b) Aumento en el diámetro del cuerpo
- c) Aumento en el diámetro de la salida del gas
- d) Aumento en el área del conducto de entrada del gas
- e) Aumento de la densidad del gas

## 2.11 VENTAJAS

Los separadores ciclónicos ofrecen una incomparable ventaja de poder trabajar con gases a elevadas temperaturas a costos razonables. Son frecuentemente utilizados como dispositivos para la recepción de producto o separador de polvos en sistemas de transporte neumático como prefiltro para filtros de alta eficiencia o como filtro final en aplicación de polvos gruesos.

Las principales ventajas de los separadores ciclónicos son:

- Pérdida de carga estable para un flujo dado
- Eficiencia constante para condiciones definidas de particulado
- No poseen partes móviles ni filtros para reemplazar
- Habilidad para manejar altas concentraciones de polvo
- Capacidad para trabajar con elevadas temperaturas

## 2.12 DESVENTAJAS

Las desventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

- Eficiencias de recolección de partículas suspendidas totales relativamente bajas, particularmente para partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ .
- No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes.
- Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.

## CAPÍTULO 3. MEMORIA DE CÁLCULO

### 3.1 MEMORIA DE CÁLCULO DEL SEPARADOR CICLÓNICO TEORÍCO

El factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es un ciclón de diámetro más pequeño que funciona a una caída de presión fija que alcanza la eficiencia más alta.

Por criterio propio y de acuerdo a la clasificación de los ciclones se eligió el diseño de un ciclón de alta eficiencia ya que este ofrece un porcentaje de recolección de 80 a 95 % para partículas de 50  $\mu\text{m}$ .

#### CÁLCULO DE DISEÑO DE ALTA EFICIENCIA BASADO EN EL MODELO DE STAIRMAND

DIMENSION	NOMENCLATURA	STAIRMAND
<b>Diámetro del ciclón</b>	DC/DC	1.0
<b>Altura de entrada</b>	a/Dc	0.5
<b>Ancho de entrada</b>	b/Dc	0.2
<b>Altura de salida</b>	S/Dc	0.5
<b>Diámetro de salida</b>	Ds/Dc	0.5
<b>Altura parte cilíndrica</b>	h/Dc	1.5
<b>Altura parte cónica</b>	z/Dc	2.5
<b>Altura total del ciclón</b>	H/Dc	4.0
<b>Diámetro salidas partículas</b>	B/Dc	0.375
<b>Factor de configuración</b>	G	551.22
<b>Numero cabezas de velocidad</b>	NH	64
<b>Numero de vórtices</b>	H	5.5

Tabla 2. Valores de un separador ciclónico Stairmand.

- Se requiere un diámetro de 20 cm para no tener altas caídas de presión, basándose también en las pruebas de laboratorio con un ciclón diseñado con un diámetro de 10 cm.
- Altura de entrada  $0.5 * 20cm = 10cm$
- Ancho de entrada  $0.2 * 20cm = 4cm$
- Altura de salida  $0.5 * 20cm = 10cm$
- Diámetro de salida  $0.5 * 20cm = 10cm$
- Altura parte cilíndrica  $1.5 * 20cm = 30cm$
- Altura parte cónica  $2.5 * 20cm = 50cm$
- Altura total del ciclón  $4 * 20cm = 80$
- Diámetro salidas partículas  $0.375 * 20cm = 7.5c$

## DIMENSIONES TEÓRICAS

### Área del ducto de entrada

$$\text{Área} = \frac{Q}{V_1}$$

$$\text{Área} = \frac{0.08 \frac{m^3}{s}}{20 \frac{m}{s}} = 0.004 m^2$$

$$0.004 m^2 = \frac{Q}{20 \frac{m}{s}} =$$

$$Q = 0.08 \frac{m^3}{s}$$

### Altura del ducto de entrada

$$a = 0.5 D_c = 0.5 \times 0.2 \text{ m} = 0.1 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

$$b = 0.2 D_c = 0.2 \times 0.2 \text{ m} = 0.04 \text{ m} = 4 \text{ cm}$$

Ancho de entrada del ciclón (b)

$$a \times b = 0.1 \times 0.04 = 0.004 m^2$$

### D<sub>c</sub>

$$D_c = \sqrt{\frac{0.004 m^2}{0.5 \times 0.2}} = 0.2$$

### Nuevas dimensiones

- $a=0.5 \times 0.2=0.1 \text{ m}= 10 \text{ cm}$
- $b=0.2 \times 0.2=0.04 \text{ m}= 4 \text{ cm}$
- $s=0.5 \times 0.2=0.1 \text{ m}= 10 \text{ cm}$
- $D_s=0.5 \times 0.2=0.1 \text{ m}= 10 \text{ cm}$
- $h=1.5 \times 0.2=0.3 \text{ m}=30 \text{ cm}$
- $H=4.0 \times 0.2=0.8 \text{ m}=80 \text{ cm}$
- $Z=2.5 \times 0.2=0.5 \text{ m}= 50 \text{ cm}$
- $B=0.375 \times 0.2=0.075 \text{ m}= 7.5 \text{ cm}$

$D_c < 1.0 \text{ m}$  solo se necesita un ciclón

### Velocidad equivalente

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 g \mu (\rho_p - \rho)}{3 \rho^2}}$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 * 9.81 \frac{m}{s} * 5.5294 \times 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s} * (847.5 \frac{kg}{m^3} - 7.03 \frac{kg}{m^3})}{3 \left[7.03 \frac{kg}{m^3}\right]^2}} = 0.4973 \frac{m}{s}$$

### Velocidad de saltación

$$V_s = \frac{4.913 * W * Kb^{0.4} * Dc^{0.067} * \sqrt[3]{Vi^2}}{\sqrt[3]{1 - Kb}}$$

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0.04 \text{ m}}{0.2 \text{ m}} = 0.2m$$

$$V_s = \frac{4.913 * 0.4973 \frac{m}{s} * 0.2m^{0.4} * 0.2m^{0.067} * \sqrt[3]{20 \frac{m^2}{s}}}{\sqrt[3]{1 - 0.2m}} = 9.1453 \frac{m}{s}$$

### Relación entre Velocidad

$$\frac{v1}{V_s} = \frac{20 \frac{m}{s}}{9.1453 \frac{m}{s}} = 2.1869$$

### Volumen del ciclón

$$v_{sc} = \frac{\pi}{4} * \left(s - \frac{a}{2}\right) * (Dc^2 - Ds^2)$$

$$v_{sc} = \frac{\pi}{4} * \left(0.1 - \frac{0.1}{2}\right) * (0.2^2 - 0.10^2) = 0.00117 \text{ m}^3$$



### Longitud natural del ciclón

$$L = 2.3 * D_s * \sqrt[3]{\frac{D_c^3}{a \times b}}$$

$$L = 2.3 * 0.10 * \sqrt[3]{\frac{0.2^3}{0.10 \times 0.04}} = 0.2897 \text{ m}$$

$$L < H - S = 0.2897 < 0.7$$

### Factor de dimensiones

$$KL = D_c - (D_c - B) * \left[ \frac{S + L - h}{z} \right]$$

$$KL = 0.2 \text{ m} - (0.2 \text{ m} - 0.075 \text{ m}) * \left[ \frac{0.10 \text{ m} + 0.2897 \text{ m} - 0.3 \text{ m}}{0.5 \text{ m}} \right] = 0.1775 \text{ m}$$

### Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud neta

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times D_c^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times D_c^2 \times (L + S - h) \times \left[ 1 + \frac{KL}{D_c} + \left( \frac{KL}{D_c} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times D_s^2 \times L$$

$$V_R = \frac{\pi}{4} * 0.2 \text{ m}^2 * (0.3 \text{ m} - 0.10 \text{ m}) + \frac{\pi}{12} * 0.2 \text{ m}^2 * (0.2897 \text{ m} + 0.10 - 0.3) \\ * \left[ 1 - \left( \frac{0.1775}{0.2} + \left( \frac{0.1775}{0.2} \right)^2 \right) \right] - \frac{\pi}{4} * 0.10^2 * 0.2897 = 4.8534 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

### Factor dimensional de las proporciones volumetricas del ciclón

$$Kc = \left( \frac{V_{sc} + \frac{VR}{2}}{Dc^3} \right)$$

$$Kc = \left( \frac{1.1780 \times 10^{-3} m + \frac{4.8534 \times 10^{-3}}{2}}{0.2^3} \right) = 0.4505$$

### Relación entre altura de entrada y el diámetro del ciclón

$$Ka = \frac{a}{Dc}$$

$$Ka = \frac{0.10}{0.2} = 0.5$$

### Relación entre base entrada y el diámetro del ciclón

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0.04}{0.2} = 0.2$$

### Factor de configuración

$$G = \frac{8 kC}{(ka * kb)^2}$$

$$G = \frac{8 * 0.4505}{(0.5 * 0.2)^2} = 360.4$$

### Exponente de vórtice

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

### Tiempo de relajación

$$Ti = \frac{\rho p * D p i^2}{18 \mu}$$

Concentración = 2 g/m<sup>3</sup>

### Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

$$n_1 = 1 - e \left[ -2 * \left( \frac{G * T1 * Q(n+1)}{Dc^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right]$$

### Número de cabezales de velocidad

$$NH = k * \frac{a * b}{Ds^2} = K = 16 \text{ para la entrada tangencial}$$

$$NH = 16 * \frac{0.10m * 0.04m}{0.10m^2} = 6.4$$

### Caída de presión

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * V1^2 * NH$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} * 7.03 \frac{Kg}{m^3} * \left(20 \frac{m}{s}\right)^2 * 6.4 = 1651.2 Pa$$

### 3.2 MEMORIA DE CÁLCULO DEL SEPARADOR CICLÓNICO A CONTRUIR

#### DIMENSIONES EXPERIMENTALES

##### Área del ducto de entrada

$$\text{Área} = \frac{Q}{V_1} \quad \text{Área} = \frac{0.125 \frac{m^3}{s}}{25 \frac{m}{s}} = 0.005 m^2$$

$$0.005 m^2 = \frac{Q}{25 \frac{m}{s}} = \quad \quad \quad Q = 0.125 \frac{m^3}{s}$$

##### Altura del ducto de entrada

$$a = 0.5 D_c = 0.5 \times 0.2 m = 0.1 m = 10 \text{ cm}$$

$$b = 0.2 D_c = 0.2 \times 0.2 m = 0.04 m = 4 \text{ cm}$$

##### Ancho de entrada del ciclón (b)

$$a \times b = 0.1 \times 0.04 = 0.004 m^2$$

##### D<sub>c</sub>

$$D_c = \sqrt{\frac{0.004 m^2}{0.5 \times 0.2}} = 0.2 m$$

### Nuevas dimensiones

- $a=0.1 \text{ m}= 10 \text{ cm}$
- $b=0.05 \text{ m}= 5 \text{ cm}$
- $s=0.125 \text{ m}= 12.5 \text{ cm}$
- $Ds=0.1 \text{ m}= 10 \text{ cm}$
- $h=0.4 \text{ m}=40 \text{ cm}$
- $H=0.8 \text{ m}=80 \text{ cm}$
- $Z=0.4 \text{ m}= 40 \text{ cm}$
- $B=0.5 \text{ m}= 0.05 \text{ cm}$

*$D_c < 1.0 \text{ m}$  solo se necesita un ciclón*

### Velocidad equivalente

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 g \mu (\rho_p - \rho)}{3 \rho^2}} =$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 5.5294 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} * (847.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 7.03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{3 \left[ 7.03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]^2}} = 0.4973 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### Velocidad de saltación

$$V_s = \frac{4.913 * W * Kb^{0.4} * Dc^{0.067} * \sqrt[3]{Vi^2}}{\sqrt[3]{1 - Kb}}$$

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.2 \text{ m}} = 0.25$$

$$V_s = \frac{4.913 * 0.4973 \frac{m}{s} * 0.25^{0.4} * 0.2^{0.067} * \sqrt[3]{25 \frac{m^2}{s}}}{\sqrt[3]{1 - 0.25}} = 11.8560 \frac{m}{s}$$

### Relación entre Velocidad

$$\frac{v_1}{V_s} = \frac{20 \frac{m}{s}}{11.8560 \frac{m}{s}} = 1.6869$$

### Volumen del ciclón

$$v_{sc} = \frac{\pi}{4} * \left( s - \frac{a}{2} \right) * (Dc^2 - Ds^2)$$

$$v_{sc} = \frac{\pi}{4} * \left( 0.125 - \frac{0.1}{2} \right) * (0.2^2 - 0.10^2) = 0.001176m^3$$

### Longitud natural del ciclón

$$L = 2.3 * D_s * \sqrt[3]{\frac{D_c^3}{a * b}}$$

$$L = 2.3 * 0.10 * \sqrt[3]{\frac{0.2^3}{0.10 * 0.05}} = 0.46 \text{ m}$$

$$L < H - S = 0.46 < 0.675$$

### Factor de dimensiones

$$KL = D_c - (D_c - B) * \left[ \frac{S + L - h}{z} \right] =$$

$$KL = 0.2 \text{ m} - (0.2 \text{ m} - 0.05 \text{ m}) * \left[ \frac{0.125 \text{ m} + 0.46 \text{ m} - 0.4 \text{ m}}{0.4 \text{ m}} \right] = 0.1994 \text{ m}$$



### Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud neta

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times D_c^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times D_c^2 \times (L + S - h) \times \left[ 1 + \frac{K_L}{D_c} + \left( \frac{K_L}{D_c} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times D_s^2 \times L$$

$$V_R = \frac{\pi}{4} * 0.2m^2 * (0.4m - 0.125m) + \frac{\pi}{12} * 0.2m^2 * (0.46m + 0.125 - 0.4) \\ * \left[ 1 - \left( \frac{0.1994}{0.2} + \left( \frac{0.1994}{0.2} \right)^2 \right) \right] - \frac{\pi}{4} * 0.10^2 * 0.46 = 0.0108 m^3$$

### Factor dimensional de las proporciones volumetricas del ciclón

$$K_c = \left( \frac{V_{sc} + \frac{V_R}{2}}{D_c^3} \right)$$

$$K_c = \left( \frac{0.00176m + \frac{0.0108m}{2}}{0.2^3} \right) = 2.0276$$

### Relación entre altura de entrada y el diámetro del ciclón

$$K_a = \frac{a}{D_c}$$

$$K_a = \frac{0.10}{0.2} = 0.5$$

### Relación entre base entrada y el diámetro del ciclón

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0.05}{0.2} = 0.25$$

### Factor de configuración

$$G = \frac{8 kC}{(ka * kb)^2}$$

$$G = \frac{8 * 2.0276}{(0.5 * 0.25)^2} = 1038.1312$$

### Exponente de vórtice

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

$$n = 1 - (1 - 0.67 * 0.2^{0.14}) \left[ \frac{298.15}{283} \right]^{0.3} = 0.5274$$

### Tiempo de relajación

$$Ti = \frac{\rho p * Dpi^2}{18\mu}$$

$$Ti = \frac{847.5 * 2.5 * 10^{-5}^2}{18 * 5.5294 * \frac{10^{-4} Kg}{m.s}} = 2.1287 s$$

Concentración = 2 g/m<sup>3</sup>

### Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

$$n_1 = 1 - e \left[ -2 * \left( \frac{G * T1 * Q(n + 1)}{Dc^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right]$$

$$n_1 = 1 - e \left[ -2 * \left( \frac{1038.1312 * 2.1287 * 0.125(0.5274 + 1)}{0.20^3} \right)^{\frac{0.5}{(0.5274+1)}} \right] = 0.97$$

### Número de cabezales de velocidad

$$NH = k * \frac{a * b}{Ds^2} = K = 16 \text{ para la entrada tangencial}$$

$$NH = 16 * \frac{0.10m * 0.05m}{0.125m^2} = 5.12$$

## Caída de presión

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * V1^2 * NH$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} * 7.03 \frac{Kg}{m^3} * \left(20 \frac{m}{s}\right)^2 * 5.12 = 1320.96 Pa$$

### 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR CICLÓNICO

1. Para la construcción del separador ciclónico se realizarón los cálculos pertinentes.



2. Se fabrica el ciclón con acero inoxidable



3. Se comparan las dimensiones del ciclón con las teóricas



4. Se realizan los cortes pertinente para el correcto montaje de las piezas



5. Se realiza un orificio para la mirilla de dimensiones de 15 x 15



6. Se diseña y corta la placa de acrílico para el montaje en el separador ciclónico



7. Se coloca la mirilla para tener la visualización de la formación de vórtices dentro del separador ciclónico



8 .Se coloca la pieza de entrada de aire limpio





8. Se solda la parte donde se acumularan las partículas solidas



9. Se rebaja la soldadura que pudiera tener



9. Se inspecciona que quede perfectamente soldado



10. Se pinta y es colocado en el edificio de tecnología de la FES Zaragoza campus II



Dentro de la construcción del separador ciclónico se obtuvo ayuda del personal de mantenimiento de la planta piloto o edificio de tecnología el Sr. Joel Germiniano Carmen (Técnico de mantenimiento turno vespertino).

### 3.4 EQUIPO Y MATERIALES PARA LA EXPERIMENTACIÓN

#### EQUIPO

1 Compresor para suministro de aire comprimido

1 Separador ciclónico

#### MATERIAL

1 Manguera de 3 m de largo con un diámetro de  $\frac{1}{2}$  in.

1 Tapón de  $\frac{1}{2}$  in tipo hembra de capucha

1 Niple de longitud de 2 in con un diámetro de  $\frac{1}{2}$  de in

2 Conexiones a piptel para manguera de cobre de  $\frac{1}{2}$  de in

#### SERVICIO AUXILIAR

Aire comprimido

### 3.5 MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

1. Solicitar el servicio de aire comprimido
2. Abrir la válvula de para tener acceso al aire
3. Colocar la muestra en el contenedor del separador ciclónico
4. Abrir la válvula del regulador de presión para dejar pasar el flujo de aire}
5. Observar la formación del vórtice a través de la mirilla
6. Recolectar la muestra ya separada por la parte posterior del separador ciclónico

### 3.6 MANTENIMIENTO DEL SEPARADOR CICLÓNICO

- La superficie del separador ciclónico debe de encontrarse libre de polvo u otras sustancias.
- La manguera debe de encontrarse en óptimas condiciones que no se encuentre rota o rasgada para evitar posibles fugas.

## CAPÍTULO 4 EXPERIMENTACIÓN

### 4.1 EXPERIMENTACIÓN CON EL REACTIVO 1 (FRIJOL)

Se realizarón las pruebas pertinentes para a observar el funcionamiento del separador ciclónico colocando muestras de 10 g de frijol de diferentes tamaños.

Las condiciones con las cuáles se operó el equipo fueron:

Temperatura ambiental de 25 °C

Velocidad del aire de 20 m/s

Presión 15 psi

Muestras de malla 20

Se realizan 5 muestras con el número de malla 20

	CANTIDAD	MASA RECUPERADA	TIEMPO
MUESTRA 1	10 g	9.03 g	2.3 min
MUESTRA 2	10 g	9.02 g	3 min
MUESTRA 3	10 g	8.72 g	3 min
MUESTRA 4	10 g	8.03 g	3 min
MUESTRA 5	10 g	7.09 g	3 min

Tabla 3.Muestras de frijol con malla 20

En la tabla 3 se reportan las muestras que se realizaron colocando 10 gr de frijol previamente tamizado con la malla 20 y obteniendo como valores de la masa recuperada en un cierto tiempo donde sí se llegan a apreciar los vórtices que tornan las partículas dentro del equipo.

**Muestras de malla 80**

	CANTIDAD ANALIZADA	MASA RECUPERADA	TIEMPO
MUESTRA 1	10g	6 g	1.77 min
MUESTRA 2	10 g	5.82 g	2 min
MUESTRA 3	10 g	6.02 g	2 min
MUESTRA 4	10 g	5.872 g	2 min
MUESTRA 5	10g	6.032 g	2 min

Tabla 4. Muestras de frijol con malla 80

En la tabla 4 se reportan las 5 muestras realizadas en la condiciones antes mencionadas colocando 10 g de muestra de frijol previamente tamizado con una malla de 80 donde si se llegan a apreciar los vórtices formados por las partículas del frijol.

### Muestras de malla 140

		CANTIDAD	MASA RECUPERADA	TIEMPO
MUESTRA 1		10 g	8 g	40 s
MUESTRA 2		10 g	8.02 g	40 s
MUESTRA 3		10 g	7.9 g	40 s
MUESTRA 4		10 g	8.32 g	40 s
MUESTRA 5		10 g	9.07 g	40 s

Tabla 5. Muestras de frijol de malla 140

En la tabla 5 se muestran los valores de la masa recuperada para un tratamiento de 5 muestras, que durante la experimentación no se forman vórtices y se aprecia que el tiempo es menor en el que se realiza la separación



**Malla 270 , 300 y charola**

Dentro de la operación al trabajar con estas muestras no se lleva a una correcta separación ya que las partículas se quedan pegadas dentro del separador ciclónico.



Figura 11. Separador ciclónico con partículas adheridas de la malla 270

## 4.2 EXPERIMENTACION CON EL RECATIVO 2 MAÍZ

Se realizaron las pruebas pertinentes para a observar el funcionamiento del separador ciclónico colocando muestras de 10 g de maíz de diferentes tamaños.

Las condiciones con las cuáles se operó el equipo fueron:

Temperatura ambiental de 25 °C

Velocidad del aire de 20 m/s

Presión 15 psi

Muestras de maíz

### **Malla 20**

	CANTIDAD	MASA RECUPERADA	TIEMPO
MUESTRA 1	10 g	9.34 g	3 min
MUESTRA 2	10 g	8.76 g	3 min
MUESTRA 3	10 g	8.93 g	3 min
MUESTRA 4	10 g	9.03 g	3 min
MUESTRA 5	10 g	8.32 g	3 min

Tabla 6. Muestras de maíz de malla 20

En la, tabla 6 se muestran los datos de la masa recuperada dentro del separador ciclónico que se llevó a cabo de 5 muestras con maíz previamente tamizado con el tipo de malla 20.

**Malla 80**

	CANTIDAD	MASA RECUPERADA	TIEMPO
MUESTRA 1	10 g	8.72 g	2 min
MUESTRA 2	10 g	8.96 g	2 min
MUESTRA 3	10 g	8.74 g	2 min
MUESTRA 4	10 g	9.0 g	2 min
MUESTRA 5	10 g	8.92 g	2 min

Tabla 7. Muestras de maíz de malla 20

En la tabla 7 se reportan los datos de la masa recuperada al introducir 5 muestras de maíz previamente tamizado con una malla de 80.

**Malla 140**

	CANTIDAD	MASA RECUPERADA	TIEMPO
MUESTRA 1	10 g	8.24 g	45 s
MUESTRA 2	10 g	8.62 g	45 s
MUESTRA 3	10 g	8.29 g	45 s
MUESTRA 4	10 g	8.0 g	45 s
MUESTRA 5	10 g	7.76 g	45 s

Tabla 8. Muestras de maíz de malla 140

En la tabla 8 se reportan las 5 muestras de maíz previamente tamizado con la malla 140.

**Malla 270 , 300 y charola**

Para realizar las muestras de maíz con los mencionados tamaños de partículas, no se logró ninguna separación ya que en el equipo las partículas se quedan adheridas a el.



Figura 12. Separador ciclónico con partículas adheridas de maíz de malla 300

## 4.3 RESULTADOS

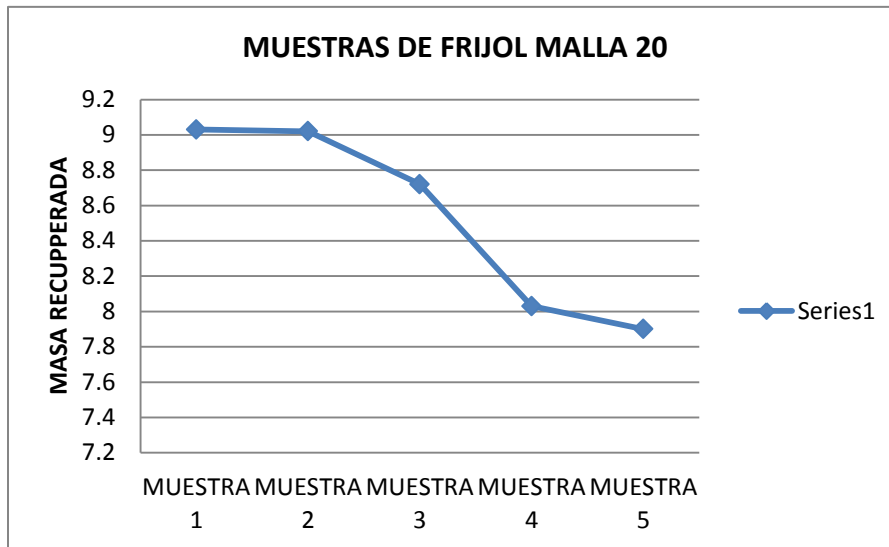
### 4.3.1 RESULTADOS DE LA CONSTRUCCIÓN

FACTORES DE DISEÑO DE UN CICLÓN			
PARÁMETRO	SIMBOLO	DIMENSIONES TEORICAS	DIMENSIONES EXPERIMENTALES
<u>Velocidad equivalente</u>	$W$	$0.4973 \frac{m}{s}$	$0.4973 m/s$
<u>Velocidad de saltación</u>	$V_s$	$9.1453 \frac{m}{s}$	$11.8560 \frac{m}{s}$
<u>Relación entre Velocidad</u>	$\frac{v1}{V_s}$	2.1869	1.68
<u>Volumen del ciclón</u>	$v_{sc}$	$0.00117 m^3$	$0.001176 m^3$
<u>Longitud natural del ciclón</u>	$L$	$0.2897 m$	$0.46 m$
<u>Factor de dimensiones</u>	$KL$	$0.1775 m$	$0.1994 m$
<u>Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud neta</u>	$VR$	$4.8534 \times 10^{-3} m^3$	$0.0108 m^3$
<u>Factor dimensional de las proporciones volumetricas del ciclón</u>	$K_c$	0.4505	2.0276
<u>Relación entre altura de entrada y el diámetro del ciclón</u>	$K_a$	0.5	0.5
<u>Relación entre base entrada y el diámetro del ciclón</u>	$K_b$	0.2	0.25
<u>Factor de configuración</u>	$G$	360.4	1038.1312
<u>Exponente de vórtice</u>	$n$	0.5274	0.5274
<u>Tiempo de relajación</u>	$T_i$	21.2877 s	2.1287 s
<u>Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño</u>	$n_1$	99 %	97%

<b><u>Número de cabezales de velocidad</u></b>	<b><i>NH</i></b>	<b>6.4</b>	<b>5.12</b>
<b><u>Caída de presión</u></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b>1651.2 Pa</b>	<b>1320.96 Pa</b>

Tabla 9. Resultados de diseño del separador ciclónico.

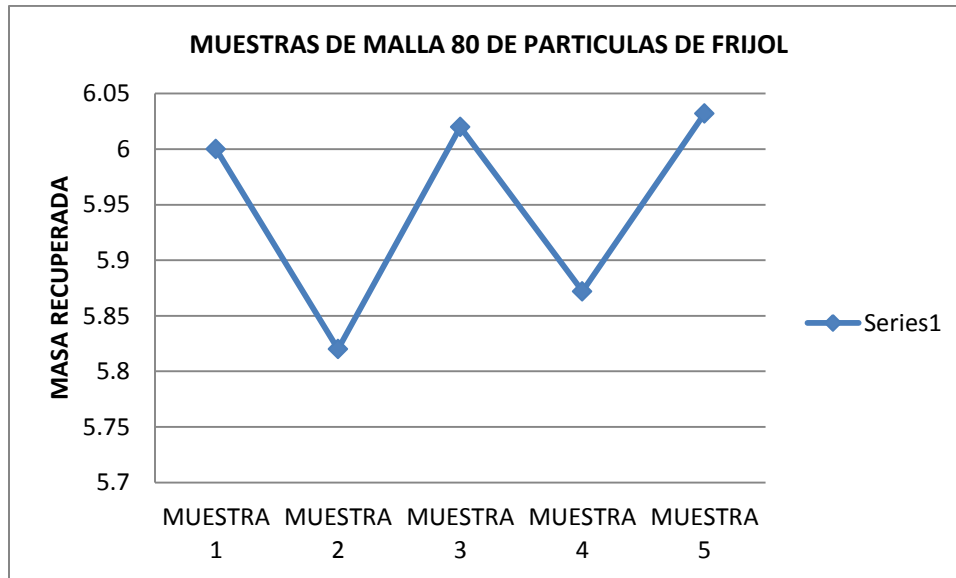
### 4.3.2 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN



**Grafica 1. Muestras de frijol de malla 40**

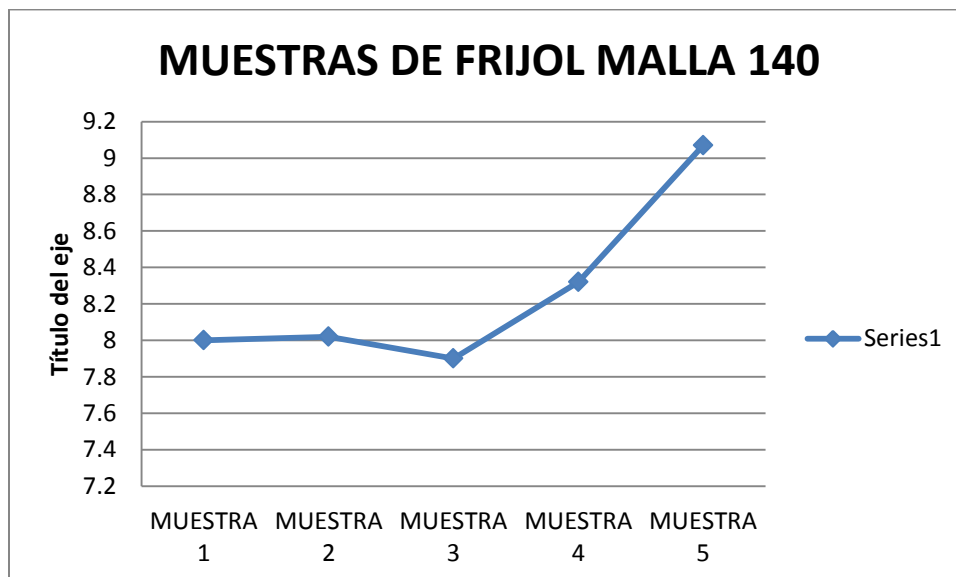
En la gráfica 1 se muestra como la masa recuperada dentro del separador ciclónico va disminuyendo conforme se realizan las muestras.





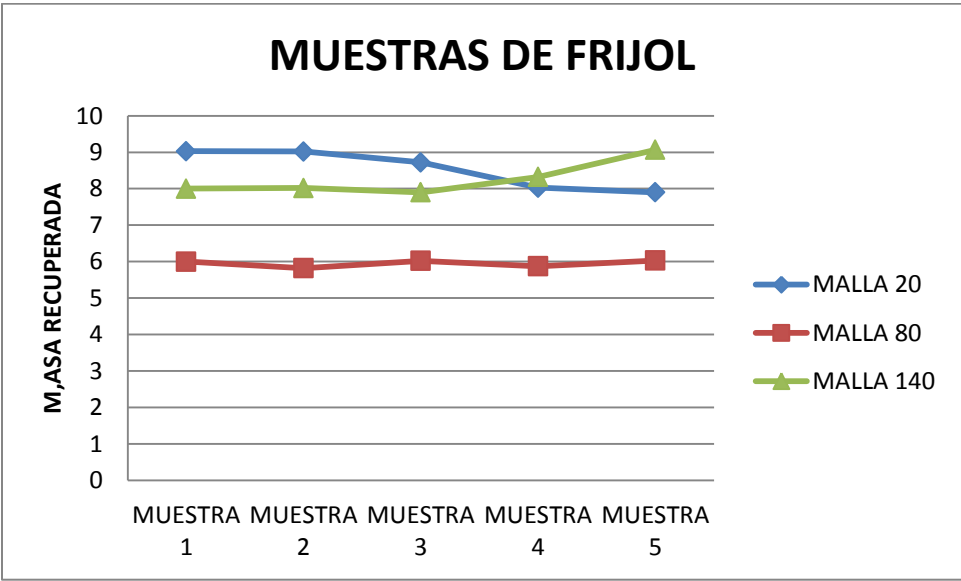
**Grafica 2. Muestras de frijol de malla 80**

En la gráfica 2 se muestra una variación de la separación con respecto a la masa recuperada siendo mínima dicha variación



**Grafica 3. Muestras de frijol de malla 140**

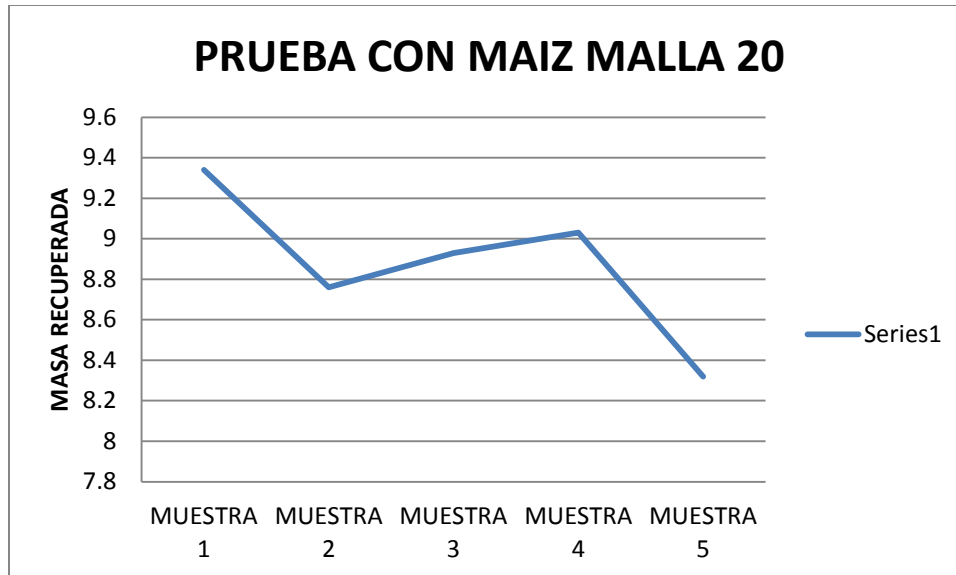
En la gráfica 3 se muestra que conforme se realizan las muestras se recupera mayor cantidad de solidos (frijol).



**Grafica 4. Muestras de frijol con diferentes tamaños de partículas**

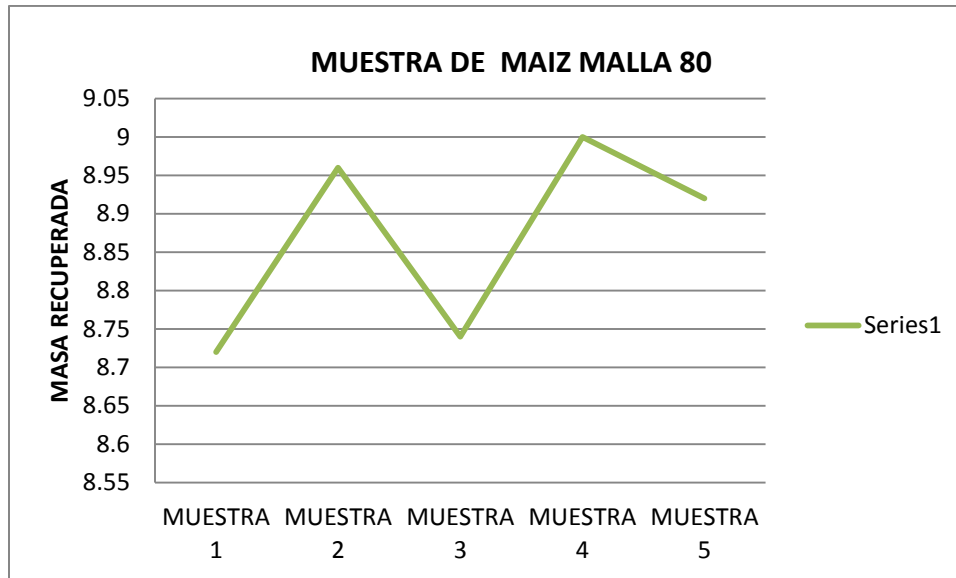
En la gráfica 4 se muestran las relación de masa recuperada y el número de muestras de diferentes mallas con lo cual se puede decir que en la malla de numero 80 hay cierta uniformidad en la recolección de sólidos sin tener variación en la masa.

## MUESTRAS DE MAIZ



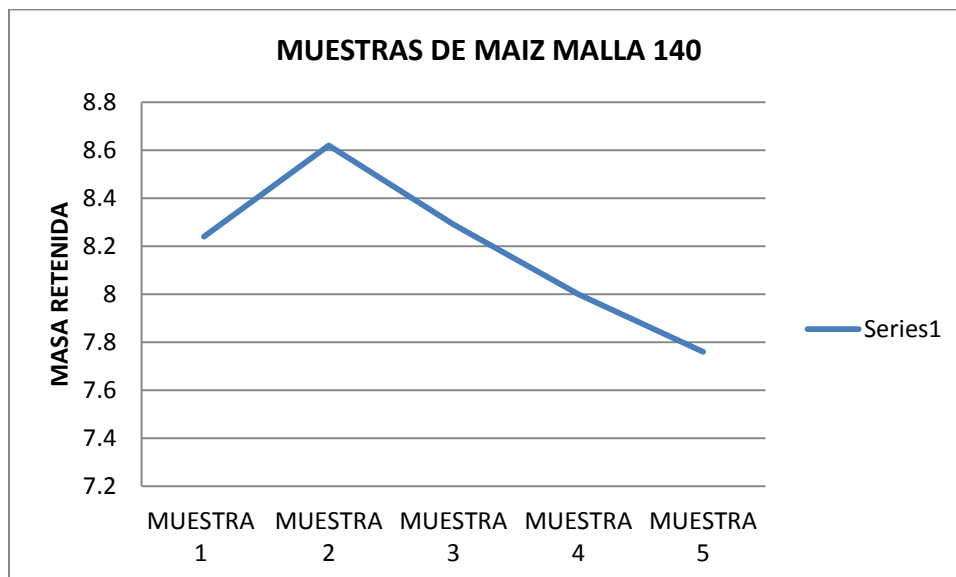
**Grafica 5. Muestras de maíz de malla 20**

En la gráfica 5 se muestra que en la primera muestra realizada se capta mayor masa y conforme se realizan las posteriores muestras va disminuyendo la cantidad de masa dentro del separador ciclónico.



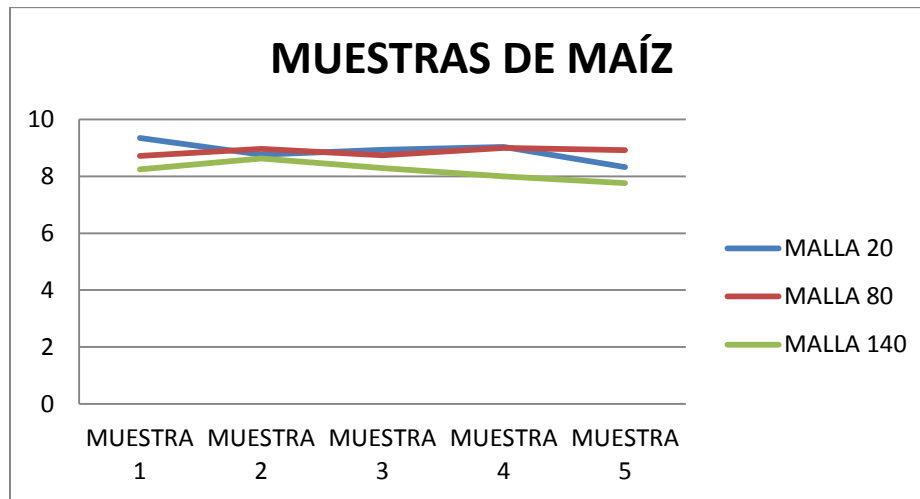
**Grafica 6.Muestra de maíz de malla 80**

En la gráfica 6 se puede apreciar que conforme se realizan las muestras la cantidad de masa recuperada varía en poca cantidad.



**Grafica 7.Muestras de maíz de malla 140**

En la gráfica 7 se muestra que conforme se realizan las muestras van disminuyendo la cantidad de masa recuperada durante la operación del ciclón.



**Grafica 8. Muestras de maíz con diferentes tamaños de malla**

En la gráfica 8 se muestran los resultados de experimentación de muestras de maíz con diferentes tamaños de malla donde se puede evidenciar que la malla del número 80 no sufre severos cambios en cuanto a la recolección de sólidos durante la operación del separador ciclónico.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

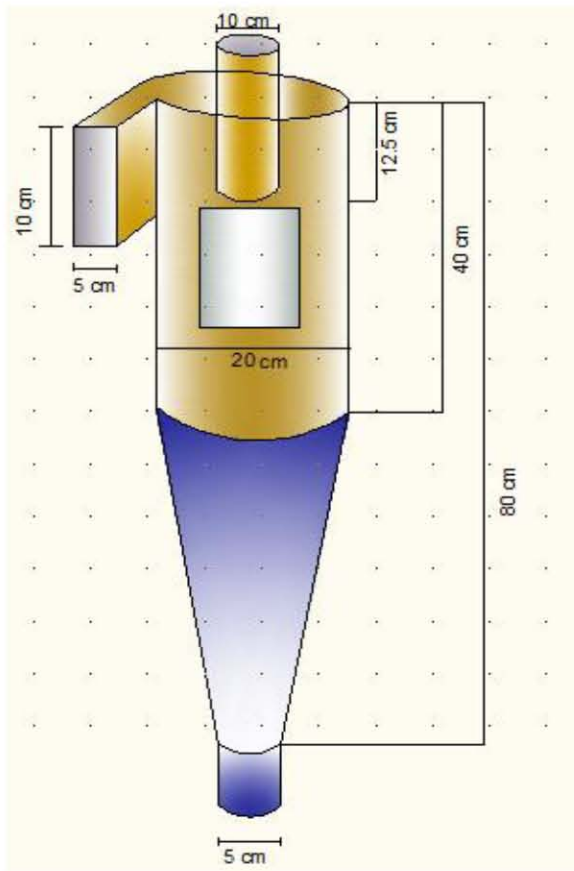
### 5.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo se enfocó en el diseño y construcción de un separador ciclónico que fue colocado en el edificio de tecnología para la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza campus II, con el fin de que los alumnos que cursan la carrera de ingeniería química se beneficien al conocer y manejar equipos que se encontrarán en la industria.

Dentro del mismo trabajo se realizan los cálculos pertinentes de manera teórica y los de experimental llegando a un prototipo que cumple con las expectativas deseadas ya que se tiene una elevada eficiencia que es de 97% y se corrobora con lo que menciona la teoría que a mayor número de partícula la separación no se verá afectada y si la partícula es de menor tamaño la eficiencia del equipo no existe ya que no realiza la separación.

El rango de operación con la que trabaja con eficiencia el separador ciclónico es de 850 micras a 106 micras ya que de 90 micras o inferiores la operación se ve afectada no realizando la separación quedando las partículas en las paredes del separador.

Las dimensiones con las cuales quedo construido el separador ciclónico muestran en la siguiente tabla.



### DIMENSIONES DEL CICLÓN

**diámetro del ciclón (DC)** 20 cm

**Altura de entrada (HC)** 10 cm

**Ancho de entrada (BC)** 5 cm

**Altura de salida (SC)** 12.5 cm

**Diámetro de salida (De)** 10 cm

**Altura parte cilíndrica (Lc)** 40 cm

**Altura parte cónica (Zc)** 40 cm

**Altura total del ciclón (H)** 80 cm

**Diámetro salida partículas (Jc)** 5 cm

## BIBLIOGRAFÍAS

- [1] AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION. 1999. Air pollution engineering manual. Van Nostrand Reinhold. New York.
- [2] BENÍTEZ, J. 1993. Process engineering and design for air pollution control. Prentice Hall. New Jersey.
- [3] CASAL, J. & MARTÍNEZ-BENET, J. 1989. Cálculo y diseño de ciclones. En: Ingeniería Química. Madrid.
- [4] COOPER, D. & ALLEY, F. 2002. Air pollution control. New Jersey: Waveland Press.
- [5] CORBITT, R. 1990. Standards handbook of environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- [6] DE NEVERS, N. 1997 Ingeniería de control de la contaminación del aire. Mc Graw-Hill. México.
- [7] FOX, D., TURNER, D. & BOUBEL, R. 1994. Fundamentals of air pollution. Academic Press. San Diego.
- [8] PÉREZ, F., RAMÍREZ, D. & RAMÍREZ, J. 1994. Diseño óptimo de colectores ciclónicos. Revista Ainsa. Número 26, Medellín.
- [9] PERRY, R. & CHILTON, C. 1986. Manual del Ingeniero Químico. vol. 5, McGraw-Hill. México, D. F.
- [10] ROBERTS ALLEY & ASSOCIATES, INC. 2001. Manual de control de la calidad del aire. Mc Graw-Hill. México.
- [11] SINNOTT, R. 1983. Chemical engineering, and introduction to chemical engineering design. Pergamon press. vol. 6, USA.
- [12] WARK, K. & WARNER, C. 1996. Contaminación del aire. Limusa. México.