



# Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Naval

## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SEPARADOR CICLÓNICO PARA LA INDUSTRIA NAVAL

Tesis para optar al Título de:  
Ingeniero Naval  
Mención Máquinas Marinas.

Profesor Patrocinante:  
Sr. Héctor Legüe Legüe.  
Ingeniero Civil mecánico.  
Ms. Cs. en Ingeniería Oceánica.

JOSÉ LUIS BAHAMONDES SANTOS  
VALDIVIA- CHILE  
2008

Esta Tesis ha sido sometida para su aprobación a la Comisión de Tesis, como requisito para obtener el grado del Licenciado en Ciencias de la Ingeniería.

La Tesis aprobada, junto con la nota de examen correspondiente, le permite al alumno obtener el título de **Ingeniero Naval**, mención **Máquinas Marinas**.

**EXAMEN DE TITULO:**

Nota de Presentación	(Ponderada) (1)	:	4,16	.....
Nota de Examen	(Ponderada) (2)	:	1,30	.....
Nota Final de Titulación	(1 + 2)	:	5,46	.....

**COMISION EXAMINADORA:**

DR. ROGELIO MORENO M.  
DECANO



*[Handwritten signature]*  
-----  
FIRMA

HÉCTOR LEAIVE L.  
EXAMINADOR

*[Handwritten signature]*  
-----  
FIRMA

MARIO LOAIZAO  
EXAMINADOR

*[Handwritten signature]*  
-----  
FIRMA

JOEL PÉREZ O.  
EXAMINADOR



*[Handwritten signature]*  
-----  
FIRMA

*[Handwritten signature]*  
-----  
FIRMA

XIMENA LOBOS S.  
SECRETARIO ACADEMICO

Valdivia, 14 DE JULIO 2008.....

Nota de Presentación = NC/NA \* 0,6 + Nota de Tesis \* 0,2  
Nota Final = Nota de Presentación + Nota Examen \* 0,2

## ÍNDICE.

**Resumen.**

**Summary.**

**Introducción**

### **Capítulo I: Características generales y teoría de funcionamiento de un ciclón.**

1.1 Características generales.	1
1.2 Contaminantes aplicables.	1
1.3 Límites de emisión logrables/reducciones.	1
1.4 Aplicaciones industriales típicas.	3
1.4.1 Criterios de mantenimiento y detección de fallas	4
1.5 Teoría de funcionamiento de un ciclón.	5
1.6 Mecánica del movimiento de partículas.	9
1.6.1 Partículas primarias y secundarias	10
1.6.2 Velocidad de sedimentación y fuerzas de retardo	12
1.6.3 Ecuaciones para el movimiento unidimensional de partículas a través de un fluido.	13
1.6.3.1 Movimiento debido al campo gravitatorio.	14
1.6.3.2 Movimiento en un campo centrifugo.	15
1.6.4 Partículas demasiado grandes para la ley de Stokes.	20
1.6.5 Partículas demasiado pequeñas para la ley de Stokes.	22
1.7 Tipos de ciclones.	24
1.7.1 Entrada tangencial, descarga axial.	24
1.7.1.1 Ciclones de alta eficiencia.	26
1.7.1.2 Ciclones convencionales.	26
1.7.1.3 Ciclones de alta capacidad.	26
1.8 Cálculo eficiencia de colección.	30
1.8.1 La eficiencia fraccional por tamaño de partículas.	31
1.8.2 Factor de configuración "G".	32
1.8.3 Tiempo de relajación "T".	34
1.8.4 Exponente del vértice "n".	34

1.8.5 Número de giros.	35
1.8.6 Velocidad de saltación.	36
1.9 Estimativa de la caída de presión.	37
1.10 Variaciones de las condiciones de trabajo.	39
1.10.1 Variación del caudal.	39
1.10.2 Variación de la viscosidad del gas.	39
1.10.3 Variación de la densidad del gas.	39
1.10.4 Variación de la concentración de partículas.	40

## **Capítulo II: Requerimientos, condiciones generales de diseño y métodos de cálculo.** **41**

2.1 Elementos de recepción y traslado de material.	43
2.2 Características a cumplir por la corriente de emisión en un ciclón.	44
2.2.1 Caudal de aire.	44
2.2.2 Temperatura.	44
2.2.3 Concentración de partículas.	44
2.3 Procedimiento general de diseño.	44
2.4 Métodos de cálculo.	45
2.4.1 Ejemplo I	45
2.4.1.1 Selección del tipo de ciclón.	46
2.4.1.2 Cálculo del diámetro del ciclón.	46
2.4.1.3 Estimación del número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo.	47
2.4.1.4 Cálculo de la eficiencia del ciclón.	47
2.4.1.4.1 Velocidad equivalente.	48
2.4.1.4.2 Velocidad de saltación.	48
2.4.1.4.3 Relación entre velocidades.	48
2.4.1.4.4 Longitud natural del ciclón.	49
2.4.1.4.5 Factor de dimensiones lineales.	49
2.4.1.4.6 Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural del ciclón.	49
2.4.1.4.7 Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón.	50
2.4.1.4.8 Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón	50

2.4.1.4.9 Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón.	50
2.4.1.4.10 Factor de configuración.	50
2.4.1.4.11 Exponente de vórtice.	50
2.4.1.4.12 Tiempo de relajación.	50
2.4.1.4.13 Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.	51
2.4.1.4.14 Eficiencia total.	51
2.4.1.5 Cálculo de la caída de presión.	52
2.4.1.5.1 Número de cabezas de velocidad.	52
2.4.1.5.2 Caída de presión.	52
2.4.2 Ejemplo II	52
2.4.3 Ejemplo III	53
2.4.4 Ejemplo IV	55
2.4.5 Recirculación de gas.	56
2.4.6 Otras consideraciones.	57
2.4.6.1 Ventajas de los ciclones.	57
2.4.6.2 Desventajas de los ciclones.	57
2.4.6.3 Análisis de costos para ciclones.	58
<b>Capítulo III: Cálculo y diseño de un ciclón de alta eficiencia.</b>	<b>59</b>
3.1 Problemática.	59
3.2 Condiciones generales.	59
3.3 Cálculo dimensiones del ciclón.	60
3.4 Cálculo eficiencia del ciclón.	63
3.5 Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.	66
3.6 Cálculo de la caída de presión.	69
<b>Capítulo IV: Procedimiento constructivo del ciclón de alta eficiencia y costos de construcción</b>	<b>70</b>
4.1 Proceso sistemático constructivo del ciclón.	70
4.1.1 Diseño de planos.	70
4.1.2 Selección de materia prima.	70
4.1.2.1 Acero.	70
4.1.2.2 Soldadura.	71

4.1.3 Dimensionamiento y cálculo del peso de acero requerido.	75
4.1.3.1 Cono número 1	76
4.1.3.2 Cono número 2	77
4.1.3.3 Cilindro número 1	77
4.1.3.4 Cilindro número 2	77
4.1.3.5 Refuerzos.	78
4.1.3.6 Flanges.	78
4.1.4 Cálculo de horas hombre invertida en confeccionar el ciclón.	80
4.1.5 Procedimiento constructivo.	80
4.2 Usos dentro de la industria naval	87
4.2.5.1 Características de los filtros manga	89
4.2.5.2 Aplicaciones	90
4.2.5.2 Tipos	91
4.2.5.4 Funcionamiento	92
4.2.5.4 Operación de filtración	92
4.2.5.4 Operación de Limpieza	94
4.2.5.7 Cálculo	95
<b>Conclusión.</b>	<b>98</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>99</b>
<b>Anexos I DS 594</b>	<b>100</b>
<b>Anexos II DS 148</b>	<b>111</b>
<b>Anexos III Ley 19300</b>	<b>122</b>

## **RESUMEN**

El presente trabajo nos da a conocer la existencia de diferentes tipos de separadores ciclónicos, su teoría de funcionamiento y además nos guía en el diseño y construcción de un separador ciclónico de alta eficiencia, siendo este tipo de ciclón, ideal para el control de la contaminación atmosférica, entregándose en la etapa final de este trabajo un extracto de la normativa sobre el control de contaminación ambiental en nuestro país.

## **SUMMARY**

The present work us announces the existence of different types of dividers cyclonic, his theory of functioning and in addition he guides us in the design and construction of a divider cyclonic of high efficiency, being this type of cyclone, ideal for the control of the atmospheric pollution, an extract of the regulation being delivered in the final stage of this work on the control of environmental pollution in our country.

## INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad uno de los métodos más usados para separar polvo en suspensión en un gas, que generalmente es aire, es el ciclón. Ahora los ciclones ocupan un papel fundamental en el plano industrial y procesos de ingeniería, especialmente referidos a separaciones mecánicas, donde intervienen el movimiento de partículas sólidas o gotas líquidas a través de un fluido. El fluido puede ser un gas o un líquido y puede estar en movimiento o en reposo. Son ejemplo de esto, la eliminación de polvos y humos del aire o gases de combustión, la eliminación de sólidos contenidos en líquidos residuales para poder verterlos en los desagües y la recuperación de nieblas ácidas a partir de los gases residuales procedentes de las plantas industriales. El ciclón es básicamente un equipo que remueve el material particulado de una corriente gaseosa basándose en el principio de impactación inercial.

Se podría decir que es una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye por la aceleración centrífuga.

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, o partículas pequeñas, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Son construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas.

La contaminación del aire es la presencia de material indeseable en ese aire, en cantidades bastante grandes como para producir efectos nocivos. Los materiales contaminantes pueden dañar la salud humana, la vegetación o el medio ambiente global, así como crear ambientes estéticamente desagradables en la forma de aire de color café o brumoso, o bien, olores desagradables. Muchos de estos materiales nocivos entran a la atmósfera proveniente de fuentes que, en la actualidad, se encuentran más allá del control humano, pero que se pretende llegar a controlar, para poder así tomar las riendas y poder prevenir y evitar la contaminación de nuestro ecosistema, es por eso que en con esta tesis se pretende, de alguna forma innovar y por ende relacionar los ciclones con el ambiente naval, pensando que su utilización bien valdría la pena, para procesos de estiba y desestiba de carga a granel, así como separaciones de partículas sólidas en procesos de combustión, entre otras aplicaciones.

## CAPÍTULO I

### 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y TEORÍA DE FUNCIONAMIENTO DE UN CICLÓN.

#### 1.1 Características generales

En la actualidad se invierten miles de dólares, para controlar la contaminación del aire, y una tecnología que ha dado buenos resultados y representa una parte de la amplia gama de dispositivos para control de emisiones, es el ciclón, estos elementos son conocidos colectivamente como “pre-limpiadores”, debido a que a menudo se utilizan para reducir la carga de entrada de Materia Particulada (MP), a los dispositivos finales de captura, al remover las partículas abrasivas de mayor tamaño.

A Los ciclones también se les conocen como ciclones colectores, ciclones separadores, separadores centrífugos y separadores inerciales. En las aplicaciones donde operan muchos ciclones pequeños en paralelo, el sistema total se le conoce como ciclón de tubos múltiples, multi-ciclón o multiciclón.

#### 1.2 Contaminantes aplicables

Los ciclones se usan para controlar material particulado, principalmente el material particulado de diámetro aerodinámico mayor de 10 micras ( $\mu\text{m}$ ). Hay sin embargo, ciclones de alta eficiencia, diseñados para ser efectivos con material particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 10  $\mu\text{m}$  y menor o igual a 2.5  $\mu\text{m}$  (MP10 y MP2.5). Aunque pueden usarse los ciclones para recolectar partículas mayores de 200  $\mu\text{m}$ , las cámaras de asentamiento por gravedad o los simples separadores por impulso son normalmente satisfactorios y menos expuestos a la abrasión, un ciclón se considerará ecológico cuando su creación se realiza para eliminar la contaminación, como podría ser la creación de un ciclón para filtrar humos de soldadura y retener partículas microscópicas de metales, cumpliéndose la norma de los límites permisibles de material particulado en el aire, según lo descrito en el Decreto supremo 594, del anexo de la presente tesis.

#### 1.3 Límites de emisión logrables/reducciones

La eficiencia de colección de los ciclones, es el punto más importante con que se diseñan los ciclones para lograr sus fines, y varía en función del tamaño de la partícula y del diseño del ciclón.

La eficiencia de los ciclones generalmente crece con el aumento de:

- El tamaño de partícula y/o la densidad.
- La velocidad en el conducto de entrada.
- La longitud del cuerpo del ciclón.
- El número de revoluciones del gas en el ciclón,
- La proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del conducto de salida del gas,
- La carga de polvo
- El pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón.

La eficiencia de los ciclones disminuirá con el aumento de:

- La viscosidad del gas.
- El diámetro del cuerpo.
- El diámetro de la salida del gas.
- El área del conducto de entrada del gas
- 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.

Los márgenes de la eficiencia de control para los ciclones individuales, están con frecuencia basados en tres clasificaciones de ciclones, es decir, convencional, alta eficiencia y alta capacidad. El rango de eficiencia de control de los ciclones individuales convencionales se estima que es de 70 a 90% para MP; de 30 a 90% para MP10 y de 0 a 40% para MP2.5.

Los ciclones individuales de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor control de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. De acuerdo a estudios, los ciclones individuales de alta eficiencia pueden remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones individuales de alta eficiencia son de 80 a 99% para MP; de 60 a 95% para MP10 y de 20 a 70% para MP2.5. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

De acuerdo con Vatauvuk (1990), los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20  $\mu\text{m}$ , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones de alta capacidad son de 80 a 99% para MP; de 10a 40% para MP10 y de 0 a 10% para MP2.5. Se ha reportado que los multi-ciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95% para partículas de 5  $\mu\text{m}$ .

#### **1.4 Aplicaciones industriales típicas**

Los ciclones son diseñados para muchas aplicaciones. Generalmente, los ciclones por si solos no son adecuados para cumplir con las reglamentaciones más estrictas en materia de contaminación del aire, pero tienen un propósito importante como pre-limpiadores antes del equipo de control final más caro, tal como los precipitadores electrostáticos (PEs) o los filtros de tela. Además del uso en tareas de control de la contaminación, los ciclones se utilizan en muchas aplicaciones de proceso, como por ejemplo, para la recuperación y reciclado de productos alimenticios y materiales de proceso tales como los catalizadores. Disminución de material particulado en calderas, retiro del aire en redes de procesos neumáticos.

Los ciclones se utilizan ampliamente después de operaciones de secado por aspersión en las industrias química y de alimentos y después de las operaciones de trituración, molienda y calcinación en las industrias química y de minerales para recolectar material útil o vendible.

También encontramos ciclones en aplicaciones del mezclado de polvos en procesamiento de alimentos, son diversas y variadas e incluyen mezclado de granos previo a molienda, mezclado e incorporación de ingredientes en harinas, preparación de formulaciones de pudines y mixturas de repostería, preparaciones de formulaciones para bebidas instantáneas diversas, incorporación de ingredientes y aditivos en productos deshidratados, etc.

En la industria de metales ferrosos y no ferrosos, los ciclones se utilizan con frecuencia como primera etapa en el control de las emisiones de MP en plantas; sinter (plantas que crean una masa coherente por calentamiento sin fundición), roasters (un tipo horno para calentar material inorgánico con acceso al aire y efectuar un cambio sin fundir), kilns (tipo de hornos de calcinación).

La materia particulada proveniente de procesos de desintegración fluida, es removida por ciclones para facilitar el reciclado de los catalizadores. Las unidades industriales y comerciales de combustión que utilizan madera y/o combustibles fósiles, usan comúnmente ciclones múltiples (generalmente después de torres húmedas de absorción, PEs ó filtros de tela), los cuales recolectan la MP fina ( $< 2.5 \mu\text{m}$ ), con mayor eficiencia que un solo ciclón. En algunos casos, las cenizas recolectadas son inyectadas de nuevo en la unidad de combustión para mejorar la eficiencia de control de material particulado.

En casi todos los casos el material que se separa de las partículas más pequeñas, va a la línea de proceso y el material mas pequeño se elimina o reinyecta para mejorar combustiones (en el caso de madera).

#### **1.4.1 Criterios de mantenimiento y detección de fallas**

Sin lugar a dudas el mayor problema que sufren estos sistemas de transporte de material particulado, consiste en el desgaste, de sus partes componentes ocasionados, por que el material particulado se desplaza a gran velocidad, produciendo con esto un desgaste de gran magnitud, por tanto, se recomienda:

- Medición de espesores de pared de ciclón en periodos no muy extensos, según características de planchaje usado.
- Chequeo del ventilador neumático (rodamientos, alineación, planchaje).
- Limpieza de material acumulado.

La detección "in situ", de un mal funcionamiento del separador ciclónico, se verá si ocurriese lo siguiente:

- Por exceso de salida de material por la chimenea, o humo excesivo (en el caso de secado).
- Igualando la cantidad de masa que se desea separar, con la masa de material que llega a su destino final.

En algunos ciclones existen sensores que ayudan a detectar un mal funcionamiento, estos son:

- Sensores de chispa.
- Sensores vibratorios del ventilador.
- Sensores de Temperatura de rodamientos

La inspección de los ciclones deberá realizarse por cuenta del propietario de este equipo, en conjunto con CONAMA ellos velarán por mantener el control de contaminación. También CONAMA en la evaluación de impacto ambiental, aprueba la construcción de estos equipos.

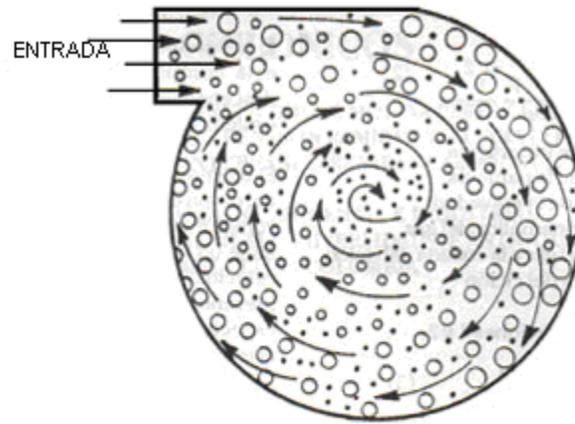
### **1.5 Teoría de funcionamiento del ciclón**

Los ciclones utilizan la inercia para remover las partículas de la corriente del gas. Generado por una fuerza centrífuga a la corriente de gas, normalmente en una cámara de forma cónica. Los ciclones operan creando un vórtice doble dentro del cuerpo del mismo. El gas que entra es forzado a bajar por el cuerpo del ciclón con movimiento circular cerca de la superficie del tubo del ciclón. En el fondo del ciclón, la dirección del gas se invierte y sube en espirales por el centro del tubo saliendo por la parte superior.

Las partículas en la corriente del gas son forzadas hacia la pared del ciclón por la fuerza centrífuga del gas en rotación, pero se les opone la fuerza de arrastre del gas que pasa por el ciclón hacia la salida. Con las partículas más grandes, la inercia vence a la fuerza de arrastre, haciendo que las partículas alcancen la pared del ciclón y sean colectadas.

Con las partículas más pequeñas, la fuerza de arrastre es mayor que la inercia, ocasionando que las partículas salgan del ciclón junto con el gas. La gravedad también hace que las partículas más grandes que llegan a la pared del ciclón bajen hacia la tolva. Aunque utilizan el mismo mecanismo de separación que los separadores por impulso, los ciclones son más efectivos porque tienen un patrón de flujo de gas más complejo.

En resumen podríamos decir que, el ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga.



La Fig. 1 muestra el movimiento de las partículas mayores hacia las paredes del ciclón debido a la fuerza centrífuga.

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Estos son básicamente construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas (que ascienden incluso a 1000 °C) y presiones de operación bastante altas.

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5  $\mu\text{m}$ ; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas.

Los ciclones presentan eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional y eficiencias menores que los filtros de talegas, lavadores y precipitadores electrostáticos, claro que siendo estos mucho más caros que el ciclón.

La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro.

Teóricamente el aumento de la velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento de la fuerza centrífuga y por lo tanto un aumento de la eficiencia, sin embargo velocidades de entrada muy altas generan la resuspensión de material particulado de las paredes internas del ciclón, lo cual disminuye la eficiencia del ciclón; adicionalmente aumentar la velocidad de entrada implica mayor consumo de energía.

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado externo y ascendente en el lado interno. Las figuras 2; 3 y 4 ilustran dichos vórtices.

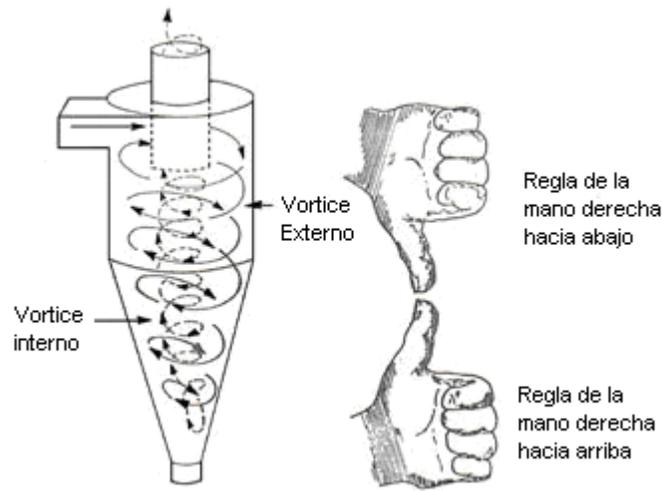


Fig. 2 Vórtices en el ciclón.

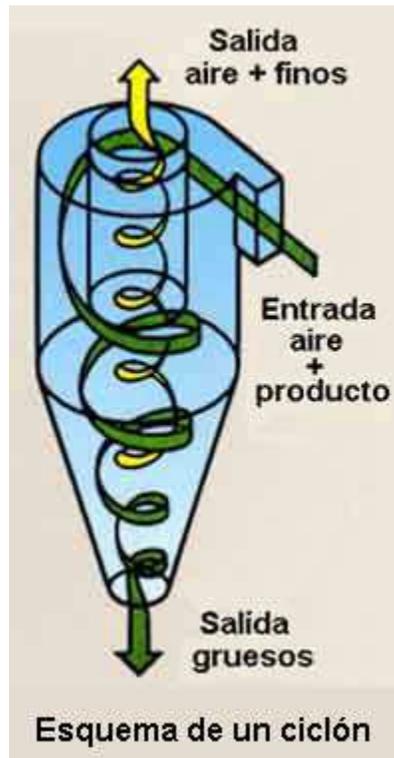


Fig.3 Vórtices en el ciclón.

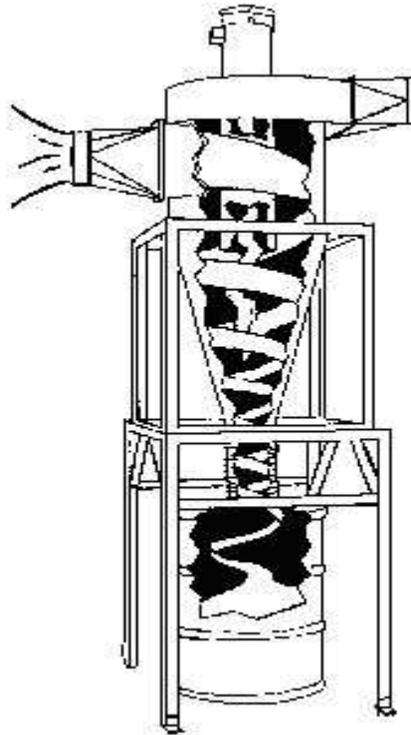


Fig. 4 Vórtices en el ciclón.

En un ciclón el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte inferior.

El diseño apropiado de la sección cónica del ciclón obliga al cambio de dirección del vórtice descendente, el vórtice ascendente tiene un radio menor, lo que aumenta las velocidades tangenciales; en el cono se presenta la mayor colección de partículas, especialmente de las partículas pequeñas al reducirse el radio de giro.

A continuación se estudiará la velocidad de sedimentación de las partículas a través del aire mediante la Ley de Stokes, hay que consignar que estas ecuaciones, son la base para el diseño y teoría de funcionamiento de los ciclones.

## 1.6 Mecánica del movimiento de las partículas

Para que una partícula se mueva a través de un fluido, se requiere la existencia de una diferencia de densidad entre la partícula y el fluido. Por otra parte se necesita una fuerza externa que comunique a la partícula un movimiento relativo respecto del fluido.

La fuerza externa generalmente es la gravedad, pero cuando la gravedad no es lo suficientemente intensa, se emplea la fuerza centrífuga, que puede llegar a ser varias veces superior a la de gravedad. Si las densidades de la partícula y el fluido son iguales, la fuerza de flotación debida a la inmersión de la partícula en el fluido contrarrestará a cualquier fuerza externa por grande que sea, y la partícula no se podrá mover en el seno del fluido. Cuando mayor sea la diferencia de densidad, tanto más eficaz será el proceso.

Sobre una partícula que se mueve a través de un fluido actúan tres fuerzas:

1. Una fuerza externa, de gravedad o centrífuga.
2. La fuerza de empuje, que actúa paralela a la fuerza externa pero en dirección opuesta.
3. La fuerza de retardo, que aparece siempre que existe movimiento relativo entre la partícula y el fluido. La fuerza de retardo, actúa oponiéndose al movimiento, paralela a la dirección del mismo, pero en dirección opuesta.

En un caso general, la dirección del movimiento de la partícula respecto del fluido puede no ser paralela a la dirección de las fuerzas externa y de empuje, formando entonces la fuerza de retardo un ángulo con las otras dos. En este caso, donde el movimiento es bidimensional, el retardo hay que expresarlo en función de sus componentes, lo cual complica el estudio de la mecánica de partículas.

En este caso se estudiará el movimiento unidimensional, en el que todas las fuerzas que actúan sobre una partícula esférica son colineales.

### 1.6.1 Partículas primarias y secundarias

La mayoría de la gente tiene una idea intuitiva de que los contaminantes en partículas son como la arena o el polvo; es decir, hay grandes números de partículas pequeñas separadas, cada una de ellas dura y distinta, como la arena en la playa. Esto sólo es parcialmente correcto.

El diámetro es una propiedad obvia de una partícula esférica, pero no es tan obvia para una partícula cúbica o semejante a una barra. Algunas partículas relacionadas con la contaminación del aire se desvían de manera radical de la forma esférica, en éste caso el diámetro de la partícula se entiende como el “diámetro de una esfera de volumen igual”; es decir,  $\text{diámetro} = (6 \text{ volumen} / \pi)^{1/3}$ . Con frecuencia los diámetros de las partículas se dan en micras (micra =  $10^{-6}$  m) cuyo símbolo es  $\mu\text{m}$ .

Por ejemplo, la grava tiene tamaños de 2000  $\mu\text{m}$  y la arena tiene diámetros desde alrededor de 20 hasta 2000  $\mu\text{m}$ .

En general, las partículas que causan problemas significativos de contaminación del aire varían en tamaños de 0,01 a 10  $\mu\text{m}$ , mucho menores que la arena más fina. La mayor parte de las partículas finas (0,1 a 10  $\mu\text{m}$ ) se obtienen por procesos de combustión, evaporación o condensación. Un ejemplo, es la formación del humo del tabaco que consta de gotitas de hidrocarburos condensados (aceites, alquitranes) en el rango de tamaño de 0,01 a 1  $\mu\text{m}$ .

Si la humedad relativa de la atmósfera es alta, es común que partículas con aspecto de roca tengan una película de agua condensada sobre sus superficies que las hace comportarse como líquidos.

La masa de las partículas pequeñas es proporcional al diámetro elevado al cubo,  $D^3$ , por lo que se debe realizar una gran disminución en la masa para lograr una disminución moderada en el diámetro. En el caso de una solución acuosa, el agua debe ser muy pura (sólo 2ppm de sólidos disueltos) para obtener la reducción deseada de tamaño en la evaporación.

Se pueden formar partículas finas no sólo por evaporación, sino también por combustión. La mayor parte de los combustibles contienen algunos materiales incombustibles, los cuales permanecen después de que aquellos se han quemado, llamados ceniza. La ceniza que queda de la combustión de madera, carbón mineral o carbón vegetal contiene en su mayor parte los óxidos de silicio, calcio y aluminio, con rastros de otros materiales.

Si el combustible se muele finamente (o se produce como un vacío de gotas finas) y, a continuación, se quema, las partículas no quemadas que quedan pueden ser bastante pequeñas.

Otra propiedad de las partículas finas, que es diferente de la experiencia que se tiene con partículas tan grandes como los granos de arena, es que, cuando se llevan dos partículas finas a que entren en contacto físico directo, en general se pegarán entre sí por la acción de fuerzas de enlace, electrostáticas y de van der waals.

En general, las fuerzas electrostáticas y de van der waals son proporcionales al área superficial de la partícula. La mayor parte de las partículas que se usan son bastante grandes como para que la gravedad o la inercia venzan las fuerzas electrostáticas o de van der waals, y se sabe que, a menos que estén húmedos, los granos de arena no se pegarán entre sí. Pero las fuerzas de gravedad y de inercia son proporcionales a la masa de la partícula, la cual es proporcional a  $D^3$ , en tanto que el área superficial (y por consiguiente, las fuerzas electrostáticas y de van der waals) son proporcionales a  $D^2$ . Por tanto, al disminuir el tamaño de la partícula,  $D^3$  decrece mucho más rápido que  $D^2$ , de modo que la relación de las fuerzas electrostáticas y de Van der waals a las de gravedad y de inercia se hace más grande. Como resultado, si se tuviera un puñado de partículas de  $1\mu$ , que se hubieran llevado a un íntimo contacto, y se lanzaran al aire, no se fragmentaría en partículas separadas de  $1\mu\text{m}$ , sino más bien se rompería en aglomerados con el tamaño de la arena común.

Por esta razón, la estrategia básica de control para los contaminantes en partículas es aglomerarlos para formar partículas más grandes que puedan capturarse con facilidad. Esto se puede lograr al forzar que las partículas separadas entren en contacto entre sí (como en las cámaras de sedimentación, ciclones, precipitadores electrostáticos o filtros), o bien, poniéndolas en contacto con gotas de agua. También se tiene aglomeración espontánea en la atmósfera.

Una peculiaridad adicional de los contaminantes en partículas es que se pueden formar en la atmósfera a partir de contaminantes gaseosos. Esto significa que si, por ejemplo, se pudiera impedir la emisión de todos los contaminantes en partículas, todavía se encontrarían partículas en la atmósfera. A menudo, a estas últimas partículas se les llama partículas secundarias, para distinguirlas de las que se encuentran en la atmósfera en la forma en que se emitieron, las cuales se conocen como partículas primarias. En su mayor parte, estas partículas secundarias se forman a partir de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre.

Con base en la teoría de la dispersión de la luz, las partículas que son más eficientes (por unidad de masa o unidad de volumen) en esa dispersión son aquellas que tienen diámetros cercanos a la longitud de onda de la luz. Con base en la línea de "Ondas electromagnéticas", las longitudes de onda de la luz visible son de más o menos 0,4 a 0,8 $\mu\text{m}$ .

Las partículas en este rango de tamaños son las dispersoras más eficientes de la luz. Los días brumosos y de smog visible que se tienen en las ciudades son causados en gran parte por las partículas secundarias que tienden a formarse en este rango de tamaños.

### **1.6.2 Velocidad de sedimentación y fuerzas de retardo**

La sedimentación gravitacional terminal para esferas con gravedad específica de 2, se entiende como la velocidad con la cual una partícula se sedimenta a través de la atmósfera o a través del agua.

Para un grano de arena gruesa, con un diámetro de 1000 $\mu\text{m}$  en el aire la velocidad de sedimentación es de 6 m/s. Ésta es mucho mayor que las velocidades verticales comunes de la atmósfera, de modo que es raro que el viento sople esas partículas hacia arriba una vez que se encuentran en el aire. Por esta razón, aun cuando una fábrica que emitiera hacia el aire grandes cantidades de partículas de tamaño de arena, no contribuiría mucho a la contaminación del aire, porque casi todas las partículas llegarían hasta el piso cercana a la industria.

La velocidad terminal de sedimentación de una partícula con un diámetro de 1 $\mu\text{m}$  es de  $6 \times 10^{-5}$  m/s. Los movimientos verticales del aire en el exterior normalmente son mayores que este valor, de modo que las partículas de este tamaño no sedimentan con rapidez en la atmósfera, como lo haría la arena gruesa, sino en

lugar de ello se mueven con el gas y permanecen en suspensión durante largos períodos.

De este modo, se establece una distinción entre el polvo, que se asienta con rapidez en la atmósfera debido a su alta velocidad gravitacional de sedimentación, y las partículas suspendibles, que se sedimentan con tanta lentitud que puede considerarse que permanecen en la atmósfera hasta que son eliminados por precipitación. No existe una línea divisoria clara y simple entre las dos categorías, pero si se debe hacer una distinción arbitraria de ese tipo, se haría en alguna parte cerca de un diámetro de partícula de  $10\mu\text{m}$ . Las partículas bastante pequeñas como para permanecer suspendidas en la atmósfera, o en otros gases, durante largos períodos se llaman aerosoles, lo que indican que se comportan como si estuvieran disueltas en el gas.

En virtud de que la estrategia básica de la mayor parte de los dispositivos colectores de partículas es llevar a cada una de ellas a que entren en contacto entre sí, de modo que puedan aglutinarse y aumentar su tamaño, debe contarse con cierto conocimiento de las fuerzas de retardo que el aire o gas que las rodea ejercen sobre esas partículas cuando se intenta moverlas, con el fin de evaluar esos dispositivos.

### **1.6.3 Ecuaciones para el movimiento unidimensional de partículas a través de un fluido**

Consideremos una partícula de masa  $m$ , moviéndose a través de un fluido por la acción de una fuerza externa  $F_c$ . Sea  $v$ , la velocidad de la partícula con relación al fluido,  $F_b$  la fuerza de empuje sobre la partícula y  $F_d$  la fuerza de retardo. La fuerza resultante que actúa sobre la partícula es  $F_c - F_b - F_d$ , la aceleración de la partícula es  $dv/dt$  y de acuerdo con la ley de Newton:  $F = \frac{m}{g} \times \frac{dv}{dt}$

Tenemos la siguiente ecuación:

$$F = \frac{m}{gc} \times \frac{dv}{dt} = F_c - F_b - F_d \quad (1)$$

La fuerza externa puede ser expresada como el producto de la masa por la aceleración de la partícula:

$$F_c = \frac{m \times a}{gc} \quad (2)$$

La fuerza de empuje, por el principio de Arquímedes, es igual al producto de la masa del fluido que desplaza la partícula, por la aceleración producida por la fuerza externa. El volumen de la partícula y por consiguiente el de fluido desplazado, es igual a  $\frac{m}{\rho_p}$ , siendo  $\rho_p$  la densidad de la partícula. La masa de fluido desplazado es igual a  $\frac{m}{\rho_p} \rho_f$ , siendo  $\rho_f$  la densidad del fluido. La fuerza de empuje es por lo tanto:

$$F_b = \frac{m \times a}{\rho_p \times g_c} \quad (3)$$

$$\text{La fuerza de retardo es } F_d = \frac{C_d \times v_o^2 \times \rho_f \times A_p}{2 \times g_c} \quad (4)$$

Siendo  $C_d$  un coeficiente adimensional de retardo y  $A_p$  es el área proyectada por la partícula sobre un plano perpendicular a la dirección del movimiento de la misma. Por otra parte la velocidad de aproximación del fluido  $v_o$  es igual a la velocidad de la partícula  $v$ .

Sustituyendo las fuerzas de la ecuación (2) y (4) en la ecuación (1) se tiene:

$$\frac{dv}{dt} = a \times \frac{1 - \rho_f}{\rho_p} - \frac{C_d \times v^2 \times \rho_f \times A_p}{2 \times m} \quad (5)$$

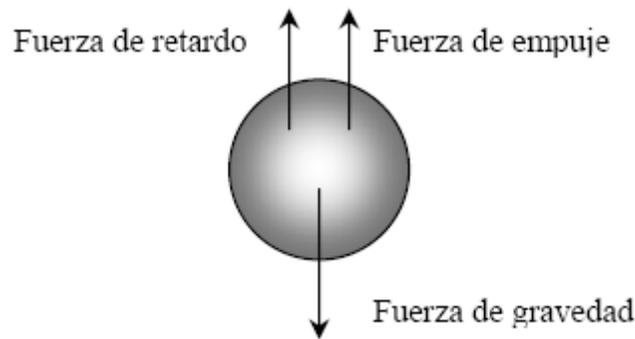


Fig. 5 Fuerzas que actúan en una partícula que sedimenta en un fluido.

### 1.6.3.1 Movimiento debido al campo gravitatorio

Si la fuerza externa es la gravedad,  $a$  es igual  $g$ , aceleración de la gravedad y la ecuación (5) se transforma en:

$$\frac{dv}{dt} = g \times \frac{1 - \rho_f}{\rho_p} - \frac{C_d \times v^2 \times \rho_f \times A_p}{2 \times m} \quad (6)$$

### 1.6.3.2 Movimiento en un campo centrífugo

Siempre que se varía la dirección del movimiento de una partícula, se origina una fuerza centrífuga. Según la física elemental, la aceleración producida por una fuerza centrífuga en el movimiento circular es igual a:

$$a = r \times \omega^2 \quad (7)$$

Siendo  $r$  = radio de giro de la partícula, (m)

$\omega$  = velocidad angular, (rad/s)

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (5) se tiene:

$$\frac{dv}{dt} = (r \times \omega^2) \times \frac{1 - \rho_f}{\rho_p} - \frac{Cd \times v^2 \times \rho_f \times Ap}{2 \times m} \quad (8)$$

$v$  es la velocidad de la partícula con relación al fluido y está dirigida hacia fuera, a lo largo del radio.

En la sedimentación por gravedad,  $g$  es constante. Por otra parte el retardo o frotamiento aumenta siempre con la velocidad. La ecuación (6) indica que la aceleración disminuye con el tiempo y tiende a cero. La partícula alcanza rápidamente, por lo tanto, una velocidad constante, que es la máxima alcanzable en otras condiciones y se denomina velocidad límite.

Para la sedimentación por gravedad, se halla la ecuación de la velocidad límite  $v_t$

haciendo  $\frac{dv}{dt} = 0$ , de la ecuación (6) se tiene:

$$v_t = \sqrt{\frac{2 \times g \times (\rho_p - \rho_f) \times m}{Ap \times \rho_p \times Cd \times \rho_f}} \quad (9)$$

En el movimiento debido a una fuerza centrífuga, la velocidad depende del radio y la aceleración no es constante, si la partícula se mueve con respecto al fluido. Sin embargo en muchos casos prácticos en los que se emplea la fuerza centrífuga,  $dv/dt$  es pequeño en comparación con los otros términos de la ecuación (8) y si  $dv/dt$  se desprecia, puede definirse, para un radio determinado, una velocidad límite mediante la ecuación:

$$v_t = \omega \times \sqrt{\frac{2 \times r \times (\rho_p - \rho_f) \times m}{Ap \times \rho_p \times Cd \times \rho_f}} \quad (10)$$

Para el empleo cuantitativo de las ecuaciones (5) y (10) es necesario disponer de valores numéricos del coeficiente de retardo  $C_d$ . En la figura 1 se presenta una gráfica del coeficiente de retardo versus el número de Reynolds para el caso de esferas, sin embargo esta curva es aplicable en condiciones restringidas. La partícula ha de ser una esfera sólida, debe estar libre para desplazarse sin ser influenciada por otras partículas, paredes o el fondo del recipiente, ha de moverse con velocidad constante, no debe ser demasiado pequeña y el fluido a través del cual se mueve debe estar tranquilo. En el movimiento libre de partículas de forma no esférica a través de un fluido, la orientación varía constantemente. Esta variación consume energía, aumentando el retardo efectivo sobre las partículas y  $C_d$  es mayor que para el desplazamiento del fluido alrededor de partículas estacionarias.

En consecuencia la velocidad límite, especialmente en el caso de discos y partículas laminares, es menor que la que se podía predecir a partir de las curvas para una orientación determinada.

Al trabajar con partículas esféricas y conocer los coeficientes de retardo para el movimiento libre de partículas son aplicables los mismos principios a cualquier otra forma.

Cuando una partícula está a una distancia suficientemente grande de la superficie del recipiente y de otras partículas, de forma que la caída no esté influenciada por ellas, el proceso recibe el nombre de sedimentación libre. Si el movimiento de la partícula está impedido por otras partículas, lo cual ocurre cuando las partículas están muy próximas entre sí, aunque realmente no lleguen a entrar en colisión, el proceso se denomina sedimentación impedida. El coeficiente de retardo en la sedimentación impedida es mayor que en la sedimentación libre.

Si la partícula posee aceleración, el frotamiento (retardo) está influenciado por las variaciones que experimentan los gradientes de velocidad junto a la superficie de la partícula.

Esto da origen, para un mismo número de Reynolds, a un rozamiento mayor que el que se indica en la figura 6.

Si las partículas son muy pequeñas se produce el movimiento Browniano. Este es un movimiento al azar de las partículas por las colisiones de las mismas con las moléculas del fluido que las rodea. Este efecto llega a ser apreciable para un tamaño de partícula de 2 a 3  $\mu\text{m}$  y predomina sobre la fuerza de gravedad para un tamaño de partícula inferior a 0,1  $\mu\text{m}$ . El movimiento al azar de las partículas tiende a eliminar el efecto de la fuerza de gravedad, de forma que no tiene lugar la sedimentación. Aplicando una fuerza centrífuga se disminuye el efecto relativo del movimiento Browniano.

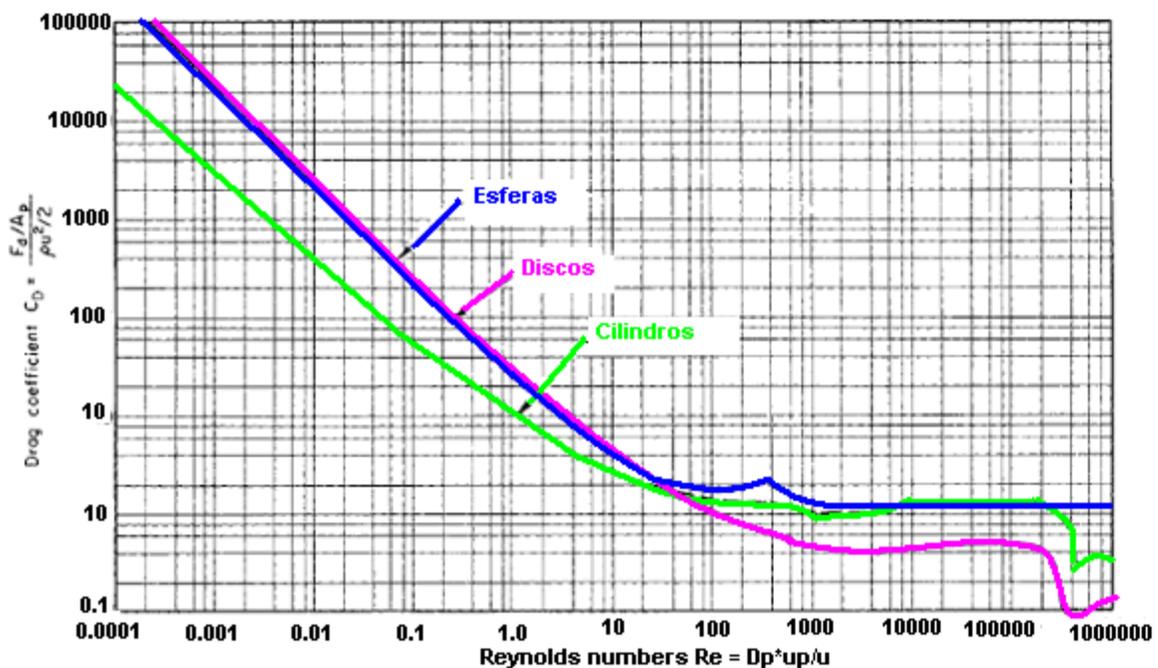


Fig. 6 Se puede observar el comportamiento del coeficiente de retardo a diferentes números de Reynolds, para esferas, discos y cilindros.

Si las partículas en movimiento son esferas de diámetro  $D_p$  entonces:

$$m = \frac{\pi \times D^3 \times \rho_p}{6} \quad (11)$$

y

$$A_p = \frac{\pi \times D_p^2}{4} \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación (11) y (12) en la ecuación (5) se tiene:

$$\frac{dv}{dt} = a \times \frac{1 - \rho_f}{\rho_p} - \frac{3Cd \times v^2 \times \rho_f}{4 \times \rho_p \times Dp} \quad (13)$$

Para la velocidad límite,  $\frac{dv}{dt} = 0$

$$a \times (\rho_p - \rho_f) = \frac{3 \times Cd \times vt^2 \times \rho_f}{4 \times Dp} \quad (14)$$

Aunque la relación entre  $Cd$  y número de Reynolds es una forma continua, puede substituirse para su empleo en los cálculos por tres líneas rectas sin una notable pérdida de exactitud. Estas líneas de Reynolds, se representan en la figura 6 como líneas de trazo. Las ecuaciones para las líneas y los intervalos de número de Reynolds para los cuales son aplicables, se presentan para número de Reynolds,  $Re < 2$ .

$$Cd = \frac{24}{Re} \quad (15)$$

y

$$Fd = \frac{3 \times \pi \times \mu \times vt \times Dp}{gc} \quad (16)$$

Siendo este el intervalo de la Ley de Stokes.

$$\text{Para } 2 < Re < 500, \text{ se tiene } Cd = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (17)$$

$$Fd = \frac{2,31 \times \pi \times (vt \times Dp)^{1,4} \times \mu^{0,6} \times \rho^{0,4}}{gc} \quad (18)$$

Siendo este el intervalo intermedio.

$$\text{Para } 500 < Re < 200000, \text{ se tiene } Cd = 0,44 \quad (19)$$

y

$$Fd = \frac{0,055 \times \pi \times (vt \times Dp)^2 \times \rho_f}{gc} \quad (20)$$

Siendo este el intervalo de la Ley de Newton.

Las ecuaciones de  $Fd$  y  $Cd$  se pueden escribir en forma general:

$$Cd = \frac{b1}{Re^n} \quad (21)$$

$$Fd = \frac{\mu^n \times b1 \times \pi \times (Dp \times vt)^{2-n} \times \rho p^{1-n}}{8 \times gc} \quad (22)$$

Siendo  $b1$  y  $n$  las constantes que se resumen en la tabla 1.0

Intervalo	$b1$	$n$
Ley de Stokes	24	1
Intermedio	18,5	0,6
Ley de Newton	0,44	0

Tabla 1.0

Se obtiene una ecuación general de velocidad de sedimentación para esferas substituyendo el valor de  $Cd$  de la ecuación (21) en la ecuación (14):

$$Vt = \left( \frac{4 \times a \times D^{1+n} \times (\rho p - \rho f)}{3b1 \times \mu^n \times \rho^{1-n}} \right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (23)$$

Para la sedimentación por gravedad  $a=g$ , por lo tanto la velocidad de sedimentación para  $Re < 2$

Es decir para el intervalo de la Ley de Stokes, es:

$$Vt = \frac{g \times Dp^2 \times (\rho p - \rho f)}{18 \times \mu} \quad (24)$$

Cuando se desea saber la velocidad de sedimentación de una partícula de diámetro conocida, no se conoce el número de Reynolds o no se puede elegir la ecuación adecuada. Para determinar el intervalo en que tiene lugar el movimiento de la partícula, se reemplaza el término de velocidad  $v$  en la ecuación de número de Reynolds por la velocidad de la ecuación (24), obteniéndose:

$$Re = Dp \times v \times \frac{\rho}{\mu} = \frac{g \times Dp^3 \times \rho f \times (\rho p - \rho f)}{18 \times \mu^2} \quad (25)$$

Si se aplica la Ley de Stokes,  $Re$  debe ser menor que 2.

A menudo no se conocen los diámetros reales de las partículas con exactitud, de modo que, para la mayor parte de las aplicaciones de la Ley de Stokes sobre la contaminación del aire, se cancela el término  $\rho f$ . Para gases a alta presión, esta

omisión podría conducir a un error significativo, pero en la mayor parte de las aplicaciones sobre contaminación del aire no ocurre esto.

La Ley de Stokes se ha verificado bien para el rango de condiciones de fluido continuo, fluido laminar, cumplimiento de la Ley de Newton. Sin embargo, tanto para las partículas muy grandes como para las muy pequeñas, estas hipótesis no funcionan.

La situación se ilustra en la figura 7 que se muestra a continuación, en ella se representa una gráfica logarítmica de la velocidad de sedimentación del aire, como función del diámetro de partícula, para esferas con gravedad específica igual a 2. Para el rango de valores en los que se aplica la Ley de Stokes, el resultado es una recta con pendiente igual a 2 en el papel logarítmico.

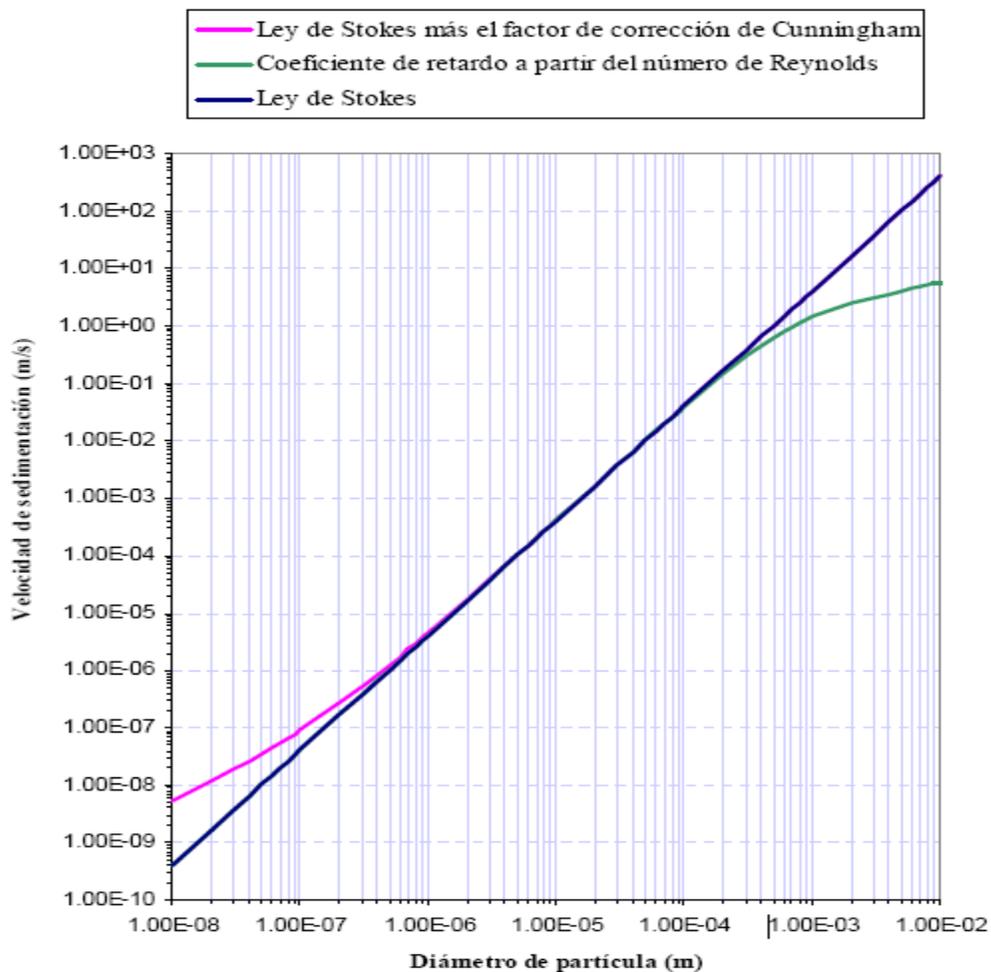


Fig.7 Velocidades terminales de sedimentación para partículas esféricas, en aire en condiciones normales.

#### 1.6.4 Partículas demasiado grandes para la Ley de Stokes

Conforme se consideran partículas cada vez más grandes, llega un momento en el que el movimiento del fluido en torno a la esfera ya no se ajusta a la aproximación de los términos que contienen las velocidades elevadas al cuadrado. Por consiguiente, la ecuación de retardo de Stokes, que se basa en esa hipótesis se

vuelve inexacta. Con tamaños de partículas todavía más grandes, el movimiento del fluido en torno a la esfera se vuelve turbulento y, entonces, las hipótesis principales de la Ley de Stokes ya no son aplicables.

Aun cuando se han realizado diversos esfuerzos para deducir una fórmula equivalente a la ecuación (16) de la página 18, para partículas más grandes, ninguna fórmula teórica representa los datos experimentales sobre más de un modesto rango de valores. Sin embargo, los datos experimentales se pueden correlacionar con facilidad por medio de una relación no adimensional. Se define un parámetro llamado el coeficiente de retardo  $C_d$ , por la ecuación:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4} \times D_p^2 \times \rho_f \times \frac{v^2}{2}} \quad (26)$$

El número de Reynolds es una relación adimensional de las fuerzas inerciales que actúan sobre una masa de fluido, con respecto a las fuerzas viscosas que actúan sobre la misma masa de fluido, en el mismo flujo. Se tienen bases teóricas para creer que, para esferas lisas en un flujo uniforme y subsónico, en fluidos newtonianos de densidad constante, el coeficiente de retardo debe depender sólo del número de Reynolds, es decir, en una gráfica de  $C_d$  versus  $Re$ , todos los datos para los tamaños de esferas y todos los fluidos newtonianos de densidad constante deben quedar sobre una sola curva.

El término de retardo de Stokes,  $F_d$  en la ecuación (16) de la página 17, se puede sustituir en la ecuación (26) y volver a escribir el resultado como:

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (27)$$

En forma experimental, se ha encontrado que la Ley de Stokes representa satisfactoriamente el comportamiento observado de las partículas, para números de Reynolds menores que alrededor de 0,3. Para valores más grandes del número de Reynolds, el valor experimental de  $C_d$  es mayor que el de la ecuación (27), predicho por la Ley de Stokes.

Para valores  $0,3 \leq Re \leq 1000$ , los datos experimentales del coeficiente de retardo se pueden representar con exactitud satisfactoria por la siguiente ecuación empírica:

$$C_d = \frac{24}{Re} \times (1 + (0,14 \times Re^{0,7})) \quad (28)$$

### 1.6.5.- Partículas demasiado pequeñas para la Ley de Stokes.

Cuando la partícula se vuelve muy pequeña, otra de las hipótesis que conducen a la Ley de Stokes ya no es exacta. En la Ley de Stokes, se supone que el fluido en el que se está moviendo la partícula es un medio continuo. Los gases, líquidos y sólidos reales en realidad no son continuos, sino que están formados por átomos y moléculas. Mientras que la partícula que se está considerando es mucho más grande que los espacios entre las diversas moléculas o átomos del gas, el fluido interactúa con esa partícula como si fuera un medio continuo. Cuando una partícula se vuelve tan pequeña como la distancia entre las moléculas, o menor que esta distancia, entonces cambia su interacción con éstas.

Cuando una partícula tiene un número grande de colisiones moleculares por unidad de tiempo, la mayor parte de las moléculas rebotan con esa partícula con un ángulo de reflexión igual al de incidencia. Si el número de colisiones es pequeño, entonces alguna fracción significativa de las moléculas del gas que chocan, son absorbidas sobre la superficie de la partícula y permanecen el tiempo suficiente como para "olvidar" la dirección de la que venían. En este caso, su dirección de salida es difusa, lo que significa aleatoria, sujeta a algunas reglas estadísticas.

El efecto del cambio de la reflexión especular a la difusa, es disminuir la fuerza de retardo, lo que hace que la partícula se mueva más rápido. El factor de corrección que se usa más en la relación con este cambio tiene la forma:

$$F_d = \frac{F_d'}{1 + A \times \left(\frac{\lambda}{D_p}\right)} \quad (29)$$

A = una constante determinada experimentalmente.

$\lambda$  = camino libre medio (la distancia promedio recorrida de una molécula de gas entre colisiones sucesivas).

$F_d'$  = fuerza de retardo calculada según la ley de Stokes.

El término  $1 + A \times \left(\frac{\lambda}{D_p}\right)$  se llama factor de corrección de Cunningham. Sólo es

aplicable para valores de  $\frac{\lambda}{D_p}$  con orden de magnitud igual a uno. Para valores

mayores de  $\frac{\lambda}{D_p}$ , se usan fórmulas más complejas. Aún cuando las fórmulas para

el cálculo preciso de  $\lambda$  se conocen razonablemente bien, la A de la ecuación (29)

no es una constante universal para todas las partículas, sino que varía de una clase de partícula a otra.

La mayor parte de los investigadores utilizan el valor hallado por Millikan para gotitas de aceite que sedimentan en el aire,  $A=1,728$ ; éste no se dedujo teóricamente, ni es de necesidad aplicable a otras clases de partículas o a otros gases, pero se usa mucho porque no se cuenta con mejor información.

Al combinar la ecuación  $Fd = \frac{\pi}{6} \times Dp^3 \times g \times (\rho p - \rho f)$  con la ecuación (29), se tiene:

$$V = vt \times \left(1 + A \times \left(\frac{\lambda}{Dp}\right)\right) \quad (30)$$

Donde  $vt$  es velocidad Terminal de sedimentación calculada a partir de la Ley de Stokes.

El cambio de aire medio  $\lambda$  depende de la temperatura, presión y la masa. Para aire, a una atmósfera y a la temperatura ambiente,  $\lambda = 0,07 \mu\text{m}$ , de modo que el término de corrección es:

$$1 + A \times \frac{\lambda}{Dp} = 1 + 1,728 \times \frac{0,07 \mu}{Dp} \quad (31)$$

Se espera que partículas tan pequeñas tengan una fuerza de retardo menor y, por lo tanto, sedimenten con mayor rapidez, así como deban moverse por una fuerza centrífuga o electrostática, con mayor rapidez que aquella con la cual la harían según la Ley de Stokes.

## 1.7 Tipos de ciclones

Existen cuatro tipos de ciclones que se pueden dividir de acuerdo a como se introduzca la corriente de gas al equipo y de como se descargue el polvo colectado. Los cuatro tipos son los siguientes:

### 1.7.1 Entrada tangencial y descarga axial

Los ciclones de entrada tangencial y descarga axial representan el ciclón tradicional, este es el ciclón de estudio en esta tesis, los otros ciclones solo se dan a conocer; éstos se pueden construir con diámetros más grandes, lo más frecuente es que éstos se encuentren entre los 600 y los 915 mm o un poco mas, pero siempre alrededor de 1000 mm.



Fig. 8 Ciclón de entrada tangencial y descarga axial

### 1.7.2 Entrada axial y descarga axial

En los ciclones con entrada y descarga axial la diferencia fundamental se encuentra en que los diámetros son de menores dimensiones (entre 25 y 305 mm), con lo que gracias a esta característica su eficiencia es mayor aunque su capacidad es menor.



Fig. 9 Ciclón de entrada axial y descarga axial

#### 1.7.3.- Entrada tangencial, descarga periférica;

En los ciclones con entrada tangencial y descarga periférica, el gas sufre un retroceso en el interior del equipo al igual que ocurre en un ciclón convencional. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el polvo no es eliminado en su totalidad de la corriente gaseosa, aunque sí se produce una concentración del mismo.



Fig.10 Ciclón de entrada tangencial y descarga periférica

#### 1.7.4.- Entrada axial, descarga periférica.

Por otra parte, los ciclones de entrada axial y salida periférica proporcionan un flujo directo que es muy adecuado para conectarlos a fuentes de gran volumen, donde los cambios en la dirección del gas podrían ser un inconveniente.

Los primeros dos tipos son los más comunes y según estudios son los que presentan las mejores eficiencias.

A su vez dentro de la familia de ciclones de entrada tangencial y descarga axial, que son los estudiados en esta tesis tenemos una subdivisión que se representa en forma individual en cada tabla, en ella se muestra la eficiencia v/s Tamaño de partícula que se basa normalmente en:

##### 1.7.1.1 Ciclones de alta eficiencia.

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM 10	PM 2.5
<b>Alta eficiencia</b>	80-99	60-95	20-70

Tabla 1.1. Intervalo de eficiencia de remoción para familias de ciclones de alta eficiencia.

##### 1.7.1.2 Ciclones convencionales.

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM 10	PM 2.5
<b>Convencionales</b>	70-90	30-90	0-40

Tabla 1.2. Intervalo de eficiencia de remoción para familias de ciclones convencionales.

##### 1.7.1.3 Ciclones de alta capacidad.

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM 10	PM 2.5
<b>Alta capacidad</b>	80-99	10-40	0-10

Tabla 1.3. Intervalo de eficiencia de remoción para familias de ciclones de alta capacidad.

Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones, están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, alta eficiencia, convencional y alta capacidad. Las tablas mostradas presentan el intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones.

Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de  $20\ \mu\text{m}$ , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Se ha reportado que los multiciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95 % para partículas de  $5\ \mu\text{m}$ .

Las tabla 1.5; 1.6 y 1.7 presentan un resumen de las características de las principales familias de ciclones de entrada tangencial. La figura 11 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

A continuación se muestra una tabla con las dimensiones del ciclón y su respectiva nomenclatura vista en la figura 11.

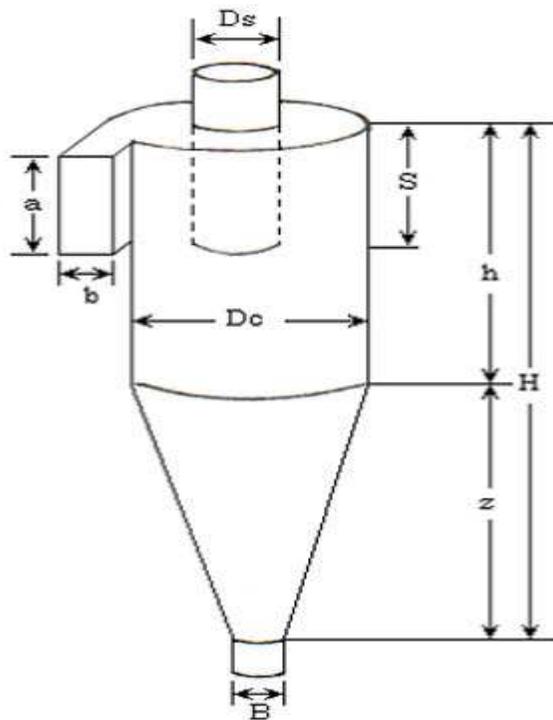


Figura 11. Dimensiones del ciclón.

<i>Diámetro del ciclón</i>	Dc
<i>Altura de entrada</i>	a
<i>Ancho de entrada</i>	b
<i>Altura de salida</i>	s
<i>Diámetro de salida</i>	Ds
<i>Altura parte cilíndrica</i>	h
<i>Altura parte cónica</i>	z
<i>Altura total del ciclón</i>	H
<i>Diámetro salida partículas</i>	B

Tabla 1.4. Nomenclatura de los ciclones

Dimensión	Nomenclatura a	Tipo de ciclón			
		Lepple	Swift	Petherson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	s/Dc	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	z/Dc	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida Partículas	S/Dc	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.8 8	381.7 9	342.29	425.4 1
Nº de cabezas de velocidad	NM	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	8.0	8.0	7.76	8.0

Tabla 1.5. Características de los ciclones de alta eficiencia.

Dimensión	Nomenclatura	Tipos de ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.75	0.8
Ancho de entrada	b/Dc	0.375	0.35
Altura de salida	s/Dc	0.875	0.85
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.75	0.75
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.7
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.7
Diámetro salida partículas	S/Dc	0.375	0.4
Factor de configuración	G	29.79	30.48
Nº de cabezas de Velocidad	NM	8.0	7.96
Número de vórtices	N	3.7	3.4

Tabla 1.6. Características de los ciclones convencionales.

Dimensión	Nomenclatura	Tipos de ciclones		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	695.65	585.1
Num. Cabezas de velocidad	Nh	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Tabla 1.7. Características de los ciclones de alta capacidad.

La caída de presión es un parámetro importante, ya que tiene relación con los costos de operación y la eficiencia de control. Para un ciclón determinado, se pueden obtener mayores eficiencias de control con velocidades de entrada más altas, pero esto también incrementa la caída de presión. En general, 18.3 metros por segundo (60 pies por segundo), es considerada la mejor velocidad de operación.

Los rangos comunes de caídas de presión para los ciclones son de 0.5 a 1 kilopascuales (kPa) (0,005 a 0,01 Bar) para unidades de baja eficiencia (alta capacidad); de 1 a 1.5 kPa (0,01 a 0,015 Bar) para unidades de mediana eficiencia (convencionales); y de 2 a 2.5 kPa (0,02 a 0,025 Bar) para unidades de alta eficiencia.

Cuando se desean alta eficiencia (lo que requiere diámetros pequeños del ciclón) y alta capacidad al mismo tiempo, se pueden operar varios ciclones en paralelo. En un ciclón de tubos múltiples como lo muestra la figura 12 que viene a continuación, la coraza contiene un gran número de tubos con entrada y salida comunes de gas en la cámara. El gas entra a los tubos a través de aspas axiales que le imparten un movimiento circular. Otra unidad de alta eficiencia, el separador ciclónico húmedo, utiliza una combinación de fuerza centrífuga y aspersion de agua para mejorar la eficiencia de control.

Cabe recalcar que Utilizando ciclones múltiples, ya sea en serie o en paralelo, para tratar un gran volumen de gas, resulta en eficiencias más altas pero a costa de una mayor caída de presión. Mayores caídas de presión significan mayores consumos de energía y mayores costos de operación. Deben de analizarse varios diseños para alcanzar la combinación óptima de eficiencia, colección y caída de presión.



Fig.12 Muestra la operación de ciclones en paralelo

### 1.8 Cálculo de la eficiencia de colección

El parámetro más importante para medir y diferenciar los ciclones se basa en la eficiencia, es por eso que se incluyen sus métodos de cálculo. No existe un método teórico sencillo que permita el cálculo de la eficiencia (definido como el porcentaje de la masa de partículas entrante que es separado en el ciclón) de forma exacta. Esto es en parte debido a que, en la práctica, partículas pequeñas que teóricamente deberían salir con el gas, debido a la aglomeración y al barrido, sumado, al choque con partículas mayores, serán colectadas; mientras, partículas grandes que deberían ser retenidas rebotarán contra las paredes o serán capturadas por turbulencias, escapándose del ciclón.

Existen numerosas teorías sobre el cálculo de la eficiencia teórica de los ciclones, las cuales relacionan la eficiencia de colección y el tamaño de las partículas. Diversos autores investigaron la duración teórica del movimiento de las partículas en el ciclón y estimaron un desempeño teórico del equipo. Varias expresiones teóricas y semi-empíricas han sido propuestas para prever la eficiencia de captación de un ciclón, pero existen otros métodos experimentales de mayor confianza.

La figura 13 presenta una comparación gráfica de los resultados experimentales con las predicciones teóricas de eficiencia de colección en función del tamaño de las partículas.

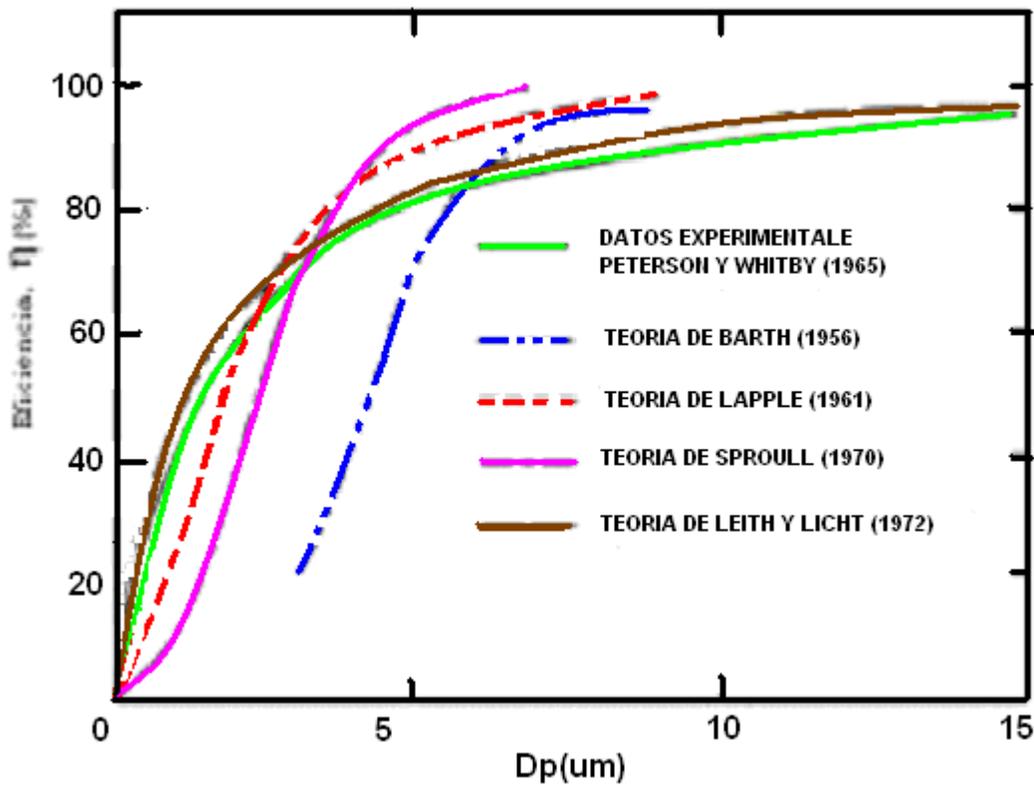


Figura 13. Eficiencia de colección del ciclón V/s Diámetro partícula.

La teoría de Leith y Licht es la que mejor se adapta al comportamiento experimental. Esta teoría predice las eficiencias de colección de material particulado, basándose en las propiedades físicas del material particulado y el gas de arrastre, y en las relaciones entre proporciones del ciclón.

### 1.8.1 La eficiencia fraccional por tamaño de partículas

Esta se calcula con la ecuación 10.1.

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{G \times T_i \times Q \times (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right]$$

Ecuación 10.1

En la cual:

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

G = Factor de configuración del ciclón.

$T_i$  = Tiempo de relajación para cada partícula, s.

Q = Caudal de gas, m<sup>3</sup>/s.

$D_c$  = Diámetro del ciclón, m.

$n$  = Exponente del vórtice del ciclón

El parámetro  $G$  está relacionado con las proporciones del ciclón y  $T_i$  agrupa características del material particulado y del gas de arrastre. La eficiencia total se calcula realizando la sumatoria del producto de las eficiencias fraccionales por la masa fraccional.

$$\eta_t = \sum \eta_i \times m_i \quad \text{Ecuación 10.2}$$

En la cual:

$\eta_T$  = Eficiencia total

$\eta_i$  = Eficiencia fraccional

$m_i$  = Porcentaje másico, %.

Para utilizar las ecuaciones 10.1 y 10.2 se debe estar seguro que el ciclón no presenta resuspensión, ya que el valor real de la eficiencia sería mucho menor al estimado por estas ecuaciones. La ecuación 10.1 es la eficiencia "al vacío" o sin carga de partículas y se debe corregir con la ecuación 10.23 de la página 40 cuando la concentración de partículas es mayor de  $2 \text{ g/m}^3$  a condiciones de referencia.

### 1.8.2 Factor de configuración "G"

El factor de configuración resulta de relacionar algunas proporciones normalizadas por el diámetro del ciclón, la ecuación 10.3 nos presenta el factor de configuración.

$$G = \frac{8 \times K_c}{(K_a \times K_b)^2} \quad \text{Ecuación 10.3}$$

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 de configuración  $G$  es común para cada familia de ciclones; las tablas 1.2 a 1.4 presentan el valor de  $G$  para las principales familias.

El factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón ( $K_c$ ) se calcula con la ecuación 10.4.

$$K_c = \frac{(V_{sc} + \frac{V_r}{2})}{D_c^3} \quad \text{Ecuación 10.4}$$

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:

$$L < H - S \quad \text{Ecuación 10.5}$$

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 10.6. La longitud natural del ciclón  $L$  es común para cada familia de ciclones.

$$L = 2.3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a \times b}} \quad \text{Ecuación 10.6}$$

$D_c$  = Diámetro del ciclón

El volumen evaluado sobre la salida del ciclón ( $V_{sc}$ ) se evalúa con la ecuación 10.7.

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left( S - \frac{a}{2} \right) \times (D_c^2 - D_s^2) \quad \text{Ecuación 10.7}$$

El volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural ( $V_r$ ) se calcula con la ecuación 10.8.

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

Ecuación 10.8.

En la cual  $K_L$  se denomina el factor de dimensiones lineales y se calcula con la ecuación 10.9.

$$K_L = D_c - (D_c - B) \times \left[ \frac{S + L - h}{z} \right] \text{ Ecuación 10.9.}$$

### 1.8.3 Tiempo de relajación "T"

El tiempo de relajación es el tiempo necesario para que una partícula alcance la velocidad terminal de caída, se evalúa con la ecuación 10.10.

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu} \text{ Ecuación 10.10.}$$

En la cual:

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

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

$\mu$  = Viscosidad del gas,  $\text{Kg/m}^*\text{s}$ .

### 1.8.4 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 10.11.

$$n = 1 - (1 - 0.67 \times D_c^{0.14}) \times \left[ \frac{T}{283} \right]^{0.3} \text{ Ecuación 10.11}$$

En la cual:

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

$D_c$  = Diámetro del ciclón, m.

$T$  = Temperatura del gas, en grados Kelvin.

### 1.8.5 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:

$$N = \frac{1}{a} \times \left[ h + \frac{z}{2} \right] \text{ Ecuación 10.12}$$

El número de vórtices es común para cada familia de ciclones. Las tablas 1.5 a 1.7 presentan los valores de N para las principales familias de ciclones.

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

$$\eta_i = 1 - e^{\left[ \frac{-\pi \times N \times \rho_p \times D_p^2 \times V_i}{9 \times \mu \times b} \right]} \text{ Ecuación 10.13}$$

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:

$$D_{p\text{crítico}} = \sqrt{\frac{9 \times \mu \times b}{\pi \times N \times \rho_p \times V_i}} \text{ Ecuación 10.14.}$$

La eficiencia obtenida por cualquiera de estos métodos (Ecuaciones 10.1 y 10.13) 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 10.1 y 10.13 son válidas solamente para concentraciones de partículas que se encuentran por debajo de 2.0 g/m<sup>3</sup>, medidos a condiciones de referencia. La

eficiencia "corregida" puede obtenerse de la ecuación 10.22 que se verá mas adelante.

### 1.8.6 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 (1974) propusieron la existencia de una "velocidad de saltación" en el ciclón para explicar porque 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:

$$V_s = \frac{4.913 \times W \times Kb^{0.04} \times Dc^{0.067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - Kb}} \quad \text{Ecuación 10.15.}$$

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.

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}} \quad \text{Ecuación 10.16.}$$

En la cual:

$\rho_p$  = Densidad de la partícula, Kg/m<sup>3</sup>.

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

$\mu$  = Viscosidad del gas portador, Kg/m\*s.

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.

Numerosos investigadores han explorado experimentalmente la velocidad óptima de entrada al 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.

### **1.9 Estimativa de la caída de presión**

La pérdida de presión en un ciclón es también una pérdida de carga, la cual se expresa en forma más conveniente en términos de la presión cinética en las vecindades del área de entrada del ciclón.

Estas pérdidas están asociadas a:

- Fricción en el ducto de entrada;
- Contracción / expansión en la entrada;
- Fricción en las paredes;
- Pérdidas cinéticas en el ciclón;
- Pérdidas en la entrada del tubo de salida;
- Pérdidas de presión estática entre la entrada y la salida.

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 ó 0,0248 Bar, son generalmente aceptadas.

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

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times V_i^2 \times N_h \quad \text{Ecuación 10.17.}$$

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.

$NH$  = 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:

$$N_h = K \times \frac{a \times b}{D_s^2} \quad \text{Ecuación 10.18.}$$

En la cual:

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

El valor de  $NH$  es común para cada familia de ciclones, las tablas 1.5 a 1.7 de la Pág. 26. Presentan los valores para cada familia de ciclones.

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.

## 1.10 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.

### 1.10.1 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:

$$\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} = \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 10.19.}$$

### 1.10.2 Variación de la viscosidad del gas

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

$$\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} = \left[ \frac{\mu_1}{\mu_1} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 10.20.}$$

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.

$$\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} = \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^{0.5} \left[ \frac{\mu_1}{\mu_1} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 10.21.}$$

### 1.10.3 Variación de la densidad del gas

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

$$\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} = \left[ \frac{\rho_p - \rho_2}{\rho_p - \rho_1} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 10.22.}$$

**1.10.4.- Variación de la concentración de partículas**

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

$$\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} = \left[ \frac{C_2}{C_1} \right]^{0.182} \quad \text{Ecuación 10.23.}$$

Esta ecuación es necesaria para corregir la eficiencia estimada con las ecuaciones 10.1 y 10.13 de la pág.29 y 33 respectivamente, 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 10.1 ó 10.13 y C1 toma el valor de 2.0 g/m<sup>3</sup> y  $\eta_2$  será la nueva eficiencia para una concentración de partículas C2 a condiciones de referencia mayor de 2.0 g/m<sup>3</sup>.

## CAPÍTULO II

### 2. REQUERIMIENTOS, CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO Y MÉTODOS DE CÁLCULO

Para poder llevar a cabo un buen diseño, y obtener a cabalidad los requerimientos exigidos, es decir, que cumpla el objetivo para el cual fue diseñado el ciclón, ya sea separación de plumilla de trigo, harina, almidón, separación de contaminantes, etc. Se debe tener muy claras las condiciones de diseño y poner especial énfasis en este punto, ya que pueden surgir problemas a partir de una mala elección como podría ser peso específico del material que se quiere separar, entre otros factores bastantes importantes que revisaremos a continuación.

Los ciclones se diseñan habitualmente de tal modo que se satisfagan ciertas limitaciones bien definidas de caída de presión. Para instalaciones ordinarias que operan más o menos a la presión atmosférica, las limitaciones del ventilador dictaminan, casi siempre, una caída de presión máxima permisible correspondiente a una velocidad de entrada al ciclón dentro del intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Por consiguiente, los ciclones se suelen diseñar para una velocidad de entrada de 22 m/s, aunque no es necesario apegarse estrictamente a este valor.

En la separación de partículas, la eficiencia de recolección puede cambiar sólo en una cantidad relativamente pequeña mediante una variación en las condiciones operacionales. El factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es el diámetro del ciclón. Un ciclón de diámetro más pequeño que funciona a una caída de presión fija alcanza la eficiencia más alta. Sin embargo, los ciclones de diámetro pequeño requieren varias unidades en paralelo, para lograr una capacidad especificada. En tales casos, los ciclones individuales descargan el polvo en una tolva receptora común. El diseño final implica llegar a un término medio entre la eficiencia de recolección y la complejidad del equipo. Se acostumbra diseñar un solo ciclón para una capacidad particular, recurriendo a varias unidades en paralelo sólo cuando la eficiencia de recolección prevista es inadecuada para una sola unidad.

Los ciclones en serie se justifican en aquellos casos en que el polvo tiene las siguientes propiedades:

- Cuando tiene una distribución amplia de tamaños, incluyendo una porción importante de partículas más finas que  $15\ \mu\text{m}$ , en cuyo caso se utiliza un solo ciclón de diámetro grande para recoger la fracción de partículas gruesas y reducir la carga para una unidad con un diámetro más pequeño.
- Cuando tiene una tendencia marcada a flocularse en el equipo que precede a los ciclones, al igual que en estos mismos.

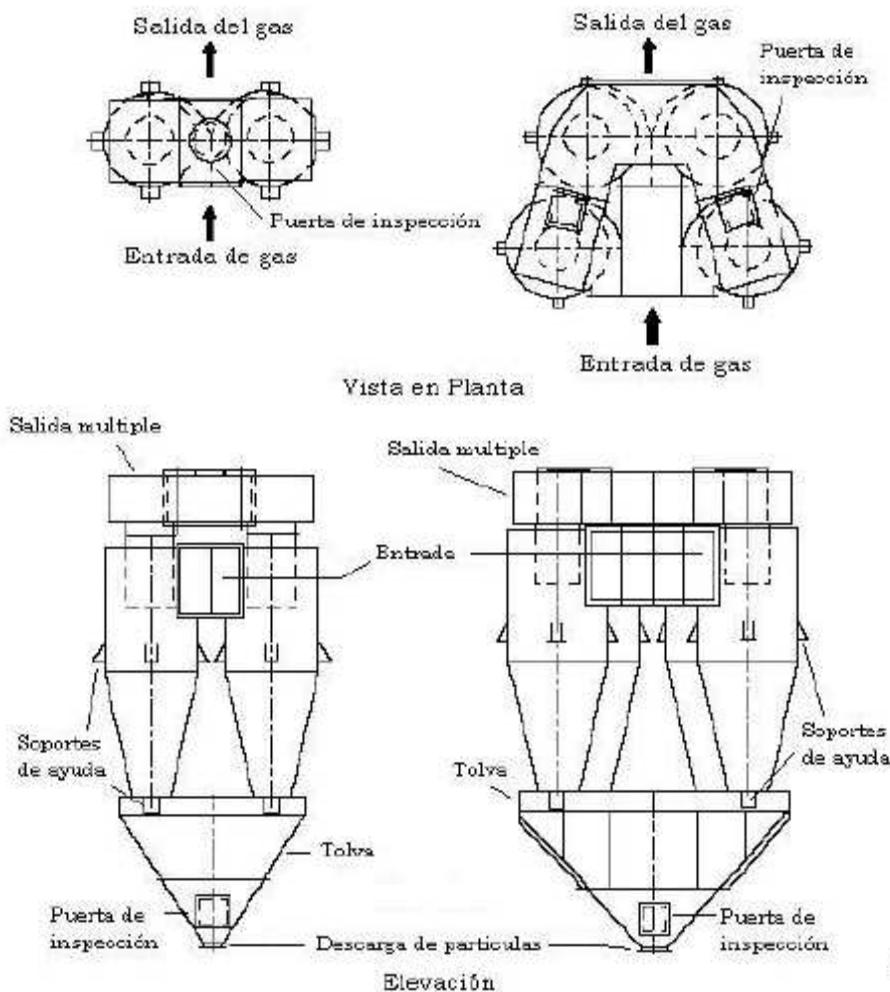


Fig.14 Muestra ciclones en serie.

Cuando se reduce el diámetro del ducto de salida del gas se incrementa tanto la eficiencia de recolección como la caída de presión. Al aumentar la longitud del ciclón, casi siempre se observa un incremento en la eficiencia de recolección.

Un ciclón operará bien, si el receptor de polvo es hermético. Es probable que la causa individual más importante para un funcionamiento deficiente del ciclón sea la fuga de aire hacia la salida de polvo del mismo.

Una fuga ligera de aire en este punto provocará una reducción muy notable en la eficiencia de recolección, sobre todo cuando se trata de polvos finos.

## 2.1 Elementos de recepción y traslado del material particulado

Los elementos encargados de recepcionar y trasladar el material particulado, están ubicados en la parte inferior del cono y generalmente se coloca una tolva para recibir el material particulado colectado, la tolva debe tener el volumen suficiente que evite la apertura frecuente del dispositivo de descarga, ya que la entrada de aire por la parte inferior del ciclón puede generar resuspensión de material colectado.

Para la extracción continua del polvo recolectado se acostumbra usar una válvula rotatoria de estrella, una válvula de doble cierre, compuertas deslizantes manuales, tornillos sin fin y válvulas de contrapeso. Como se muestran en la siguiente figura.

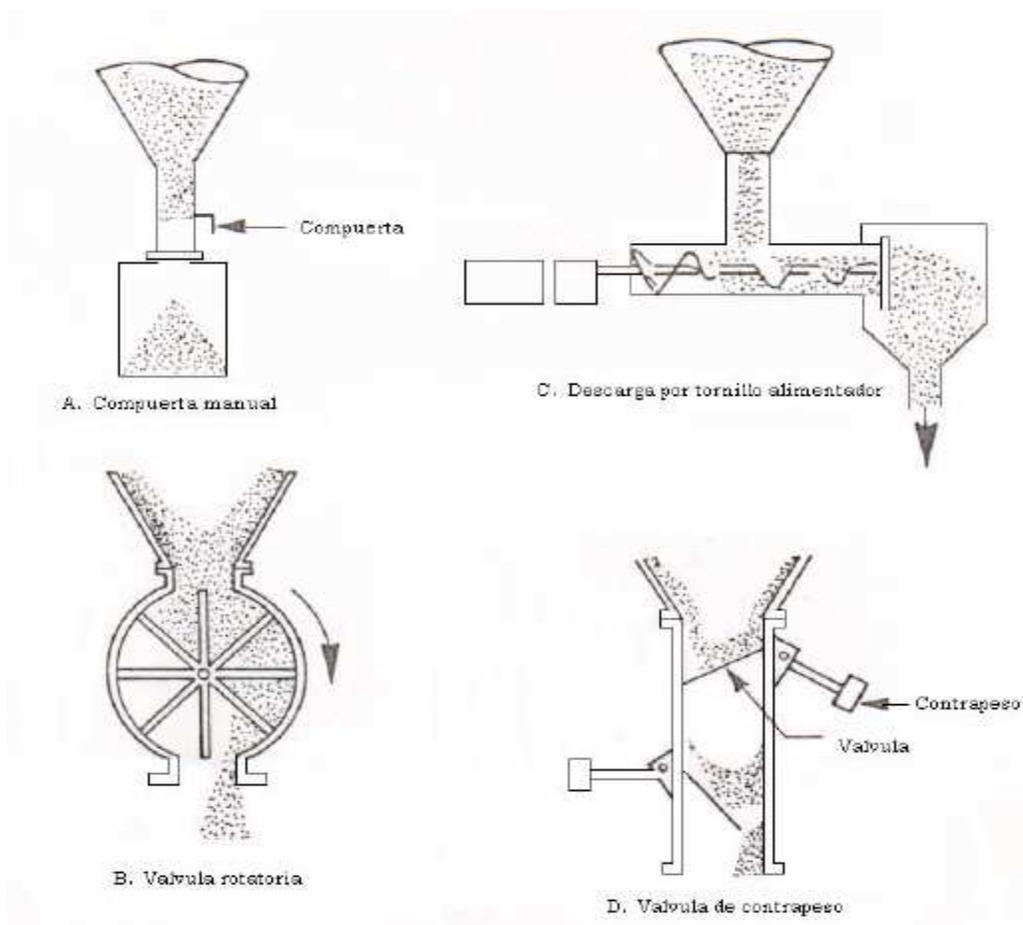


Fig.15 Sistemas de descarga de un ciclón

En cualquier caso, es esencial proporcionar la suficiente capacidad de descarga y recepción para evitar que el material recogido se acumule dentro del ciclón.

## **2.2 Característica que debe cumplir la corriente de emisión en un ciclón**

Las siguientes son algunas de las características que debe cumplir la corriente de emisión para utilizar ciclones:

### **2.2.1 Caudal de aire:**

Los caudales típicos de gas para unidades de un solo ciclón son de 0.5 a 12 m<sup>3</sup>/s a condiciones de referencia. Los caudales en la parte alta de este intervalo y mayores (hasta aproximadamente 50 m<sup>3</sup>/s), utilizan multiciclones. Hay ciclones que se emplean en aplicaciones especializadas, las cuales tienen flujos desde 0.0005 hasta 30 m<sup>3</sup>/s.

### **2.2.2 Temperatura:**

Las temperaturas del gas de entrada, están limitadas únicamente por los materiales de construcción de los ciclones y han sido operados a temperaturas tan altas como 540°C.

### **2.2.3 Concentración de partículas:**

Las concentraciones típicas de partículas en el gas van de 2.0 a 230 g/m<sup>3</sup> a condiciones de referencia. En aplicaciones especializadas, estas cargas pueden ser tan altas como 16000 g/m<sup>3</sup> y tan bajas como 1.0 g/m<sup>3</sup>.

## **2.3 Procedimiento general de diseño**

En este ítem se entregará el procedimiento general de diseño, y este comprende los siguientes puntos.

Seleccionar el tipo de ciclón, dependiendo del funcionamiento o necesidades requeridas.

Como pueden ser:

- Caudal que genere el tipo de ventilador. m<sup>3</sup>/hora.
- Peso específico del producto a transportar. Kg/m<sup>3</sup>
- Tamaño de partículas a separar. µm
- Fluido de transporte.
- Caudal de producto a transportar por la corriente gaseosa. Kg/m<sup>3</sup>

- Obtener un estimativo de la distribución de tamaño de las partículas en la corriente gaseosa a ser tratada.
- Calcular el diámetro del ciclón para una velocidad de entrada de 22 m/s (opcional), y determinar las otras dimensiones del ciclón con las relaciones establecidas para las familias de ciclones con base en el diámetro (Tablas 1.5 a 1.7).
- Estimar el número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo. (si es que fuese necesario).
- Calcular la eficiencia del ciclón y si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.
- Calcular la caída de presión del ciclón y si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.
- Calcular el costo del sistema y optimizar para hacer el mejor uso de la caída de presión disponible, o si se requiere, para dar el más bajo costo de operación.

Los ciclones generalmente tienen como parámetros de diseño el diámetro del ciclón, la caída de presión, la velocidad de entrada y velocidad de saltación (Tabla 1.8):

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
<i>Diámetro del ciclón (Dc)</i>	<i>&lt; 1.0 m</i>
<i>Caída de presión</i>	<i>&lt; 2488.16 Pa</i>
<i>Relación de velocidades (Vi/Vs)</i>	<i>&lt; 1.35</i>
<i>Velocidad de entrada</i>	<i>15.2 – 27.4 m/s</i>

Tabla 1.8. Parámetros de diseño para los ciclones de entrada tangencial.

## 2.4 Métodos de cálculo

Para mostrar más claramente los métodos de cálculo, se darán ciertos ejemplos típicos.

### 2.4.1 Ejemplo I

Diseñar un ciclón para separar sólidos de una corriente de gaseosa. La densidad de las partículas es de  $1500 \text{ Kg/m}^3$  y el gas es aire a  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ . El caudal de la corriente es  $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , y la operación es a una presión de  $85.3 \text{ KPa}$ . La concentración de las partículas es de  $2.0 \text{ g/m}^3$  y, según las normas de emisión, se requiere una eficiencia de separación del 80%. La distribución de tamaño de las partículas en la corriente gaseosa es la siguiente (Tabla 1.9):

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	% másico
5 – 10	45
10 – 30	25
30 – 50	15
50 – 70	10
70 – 100	5

Tabla 1.9. Distribución de tamaño de las partículas.

El procedimiento general de diseño es el siguiente:

#### 2.4.1.1 Selección del tipo de ciclón

Como el 45% de las partículas esta por debajo de 10  $\mu\text{m}$ , se requiere un ciclón de alta eficiencia. Por lo tanto seleccionamos un ciclón de la familia de ciclones de alta eficiencia (Tabla 1.5). Seleccionamos un ciclón Stairmand, por ser este un ciclón de alta eficiencia y baja caída de presión, v/s un Swift que es un ciclón un poco más eficiente pero con mayor caída de presión.

#### 2.4.1.2 Cálculo del diámetro del ciclón

Para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada que está en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Para este caso seleccionamos una velocidad de entrada de 22 m/s. Con este valor se puede determinar el diámetro del ciclón y las otras dimensiones con base en las relaciones establecidas para las familias de ciclones (Tabla 1.5).

Área del ducto de entrada:

$$\text{Área} = \frac{Q}{V_i} = \frac{3,2}{22} = 0,145 \text{ m}^2.$$

Área del ducto de entrada =  $a \times b$

Para un ciclón Stairmand (Tabla 1.2):

Altura de entrada al ciclón (a):  $a = 0,5D_c$

Ancho de entrada al ciclón (b):  $b = 0,2D_c$

$$a \times b = 0,5D_c \times 0,2D_c = 0,145 \text{ m}^2$$

$$D_c = \sqrt{\frac{0,145}{0,5 \times 0,2}} = 1,21 \text{ m}$$

Entonces:

Las otras dimensiones se hallan con base en las proporciones propuestas:

$$\begin{aligned} \text{Altura de entrada al ciclón (a):} \quad & a = 0,5D_c \\ & a = 0,5 \times 1,21 = 0,60m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ancho de entrada al ciclón (b):} \quad & b = 0,2D_c \\ & b = 0,2 \times 1,21 = 0,24m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altura de salida del ciclón (S):} \quad & S = 0,5D_c \\ & S = 0,5 \times 1,21 = 0,60m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro de salida del ciclón (Ds):} \quad & D_s = 0,5D_c \\ & D_s = 0,5 \times 1,21 = 0,60m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altura parte cilíndrica del ciclón (h):} \quad & h = 1,5D_c \\ & h = 1,5 \times 1,21 = 1,81m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altura total del ciclón (H):} \quad & H = 4,0D_c \\ & H = 4,0 \times 1,21 = 4,84m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altura parte cónica del ciclón (z):} \quad & z = 2,5D_c \\ & z = 2,5 \times 1,21 = 3,02m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro salida del polvo (B):} \quad & B = 0,375D_c \\ & B = 0,375 \times 1,21 = 0,45m \end{aligned}$$

### 2.4.1.3 Estimación del número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo

Aunque  $D_c > 1.0$  m, solo se requiere un ciclón simple, ya que el valor del diámetro del ciclón está relativamente cercano a 1.0 m. Este parámetro de diseño es una recomendación, más no una imposición en el momento de diseñar.

Por otro lado, algunos autores como Vatavuk, recomiendan que para caudales entre 0.5 y 12 m<sup>3</sup>/s a condiciones de referencia se utilice un solo ciclón.

### 2.4.1.4 Cálculo de la eficiencia del ciclón

Para calcular la eficiencia del ciclón se requiere calcular primero si hay o no resuspensión, ya que de presentarse resuspensión en el ciclón, la ecuación de Leith y Licht estaría sobrestimando la eficiencia del ciclón.

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación.

#### 2.4.1.4.1 Velocidad equivalente (Ecuación 10.16)

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

Suponiendo que la corriente gaseosa es aire, éstas son las propiedades del aire a 450 °C y 85.3 kPa:

$$\rho = 0.411 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 3.57 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^*\text{s}$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times 9.8 \times 3.57 \times 10^{-5} \times (1500 - 0.411)}{3 \times 0.411^2}} = 1.61 \text{ m/s}$$

#### 2.4.1.4.2 Velocidad de saltación (Ecuación 10.15)

$$V_s = \frac{4.913 \times W \times Kb^{0.04} \times Dc^{0.067} \times \sqrt[3]{Vi^2}}{\sqrt[3]{1 - Kb}}$$

$$V_s = \frac{4.913 \times 1.61 \times 0.2^{0.04} \times 1.21^{0.067} \times \sqrt[3]{22^2}}{\sqrt[3]{1 - 0.2}} = 35.55$$

#### 2.4.1.4.3 Relación entre velocidades.

$$\frac{Vi}{Vs} = \frac{22}{35.55} = 0.62$$

Como  $Vi/V_s < 1.35$ , No hay resuspensión del material particulado.

Como ya estamos seguros que no hay resuspensión de las partículas, procedemos a calcular la eficiencia del ciclón. Para ello se necesita determinar el factor de configuración (Ecuación 10.3), el tiempo de relajación (Ecuación 10.10) y el exponente de vórtice (Ecuación 10.11) (visto en el capítulo I)

Cuando tenemos un ciclón de una familia de ciclones estandarizados, el factor de configuración G es común para cada familia de ciclones y puede leerse de las tablas 1.5 a 1.7. Aunque tenemos un ciclón Stairmand que tiene un factor de configuración de 551.22, se hará todo el procedimiento necesario para hallarlo.

Volumen del ciclón evaluado sobre la salida (Ecuación 10.7):

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left( S - \frac{a}{2} \right) \times (Dc^2 - Ds^2)$$

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left( 0,60 - \frac{0,60}{2} \right) \times (1,21^2 - 0,60^2) = 0,258m^3$$

#### 2.4.1.4.4 Longitud natural del ciclón (Ecuación 10.6)

$$L = 2,3 \times Ds \times \sqrt[3]{\frac{Dc^2}{a \times b}}$$

$$L = 2,3 \times 0,6 \times \sqrt[3]{\frac{1,21^2}{0,6 \times 0,24}} = 2,99m$$

Condición:  $L < H - S$

$$2,99 \text{ m} < 4,84 \text{ m} - 0,60 \text{ m}$$

$$2,99 \text{ m} < 4,24 \text{ m}$$

Ya que cumple la condición, calculamos el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón.

#### 2.4.1.4.5 Factor de dimensiones lineales (Ecuación 10.9)

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

$$Kl = 1,21 - (1,21 - 0,45) \times \left[ \frac{0,60 + 2,99 - 1,81}{3,02} \right] = 0,76m$$

#### 2.4.1.4.6 Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural (Ecuación 10.8)

$$VR = \frac{\pi}{4} \times Dc^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times Dc^2 \times (L + S - h) \times \left[ 1 + \frac{Kl}{Dc} + \left( \frac{Kl}{Dc} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times Ds^2 \times L$$

$$VR = \frac{\pi}{4} \times 1,21^2 \times (1,81 - 0,60) + \frac{\pi}{12} \times 1,21^2 \times (2,99 + 0,60 - 1,81) \times \left[ 1 + \frac{0,76}{1,21} + \left( \frac{0,76}{1,21} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times 0,60^2 \times 2,99 = 1,90m^3$$

#### 2.4.1.4.7 Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón (Ecuación 10.4)

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

$$Kc = \frac{\left( 0,258 + \frac{1,90}{2} \right)}{1,21^3} = 0,689m^3$$

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

$$Ka = \frac{a}{Dc} = \frac{0.60}{1.21} = 0.5$$

#### 2.4.1.4.9 Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón

$$Ka = \frac{b}{Dc} = \frac{0.24}{1.21} = 0.2$$

#### 2.4.1.4.10 Factor de configuración (Ecuación 10.3)

$$G = \frac{8Kc}{(Ka \times Kb)^2}$$

$$G = \frac{8 \times 0.689}{(0.5 \times 0.2)^2} = 551.22$$

#### 2.4.1.4.11 Exponente de vórtice (Ecuación 10.11)

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

$$n = 1 - (1 - 0.67 \times 1.21^{0.14}) \times \left[ \frac{723}{283} \right]^{0.3} = 0.586$$

#### 2.4.1.4.12 Tiempo de relajación (Ecuación 10.10)

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

Para una partícula con  $Dpi = 7.5 \mu m$  ( $7.5 \times 10^{-6} m$ ), tenemos:

$$Ti = \frac{1500 \times (7,5 \times 10^{-6})^2}{18 \times 3,57 \times 10^{-5}} = 1,30 \times 10^{-4}$$

Los tiempos de relajación para los demás tamaños de partículas se reportan en la tabla 1.10.

#### 2.4.1.4.13 Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

Como la concentración de las partículas es de  $2 \text{ g/m}^3$ , la ecuación 10.1 se puede utilizar sin tener que corregirla con la ecuación 10.22. Mostradas en el capítulo anterior.

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{G \times Ti \times Q \times (n+1)}{Dc^3} \right)^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right]$$

Para una partícula con  $D_{pi} = 7.5 \text{ } \mu\text{m}$  ( $7.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ ), tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{551,22 \times 1,30^{-4} \times 3,2 \times (0,586+1)}{1,21^3} \right)^{\frac{0,5}{0,586+1}} \right] = 0,705$$

Las eficiencias fraccionales por intervalos de tamaño para los demás tamaños de partículas se reportan en la tabla 1.10

#### 2.4.1.4.14 Eficiencia total (Ecuación 10.2)

$$\eta_t = \sum \eta_i \times m_i$$

La eficiencia total se reporta en la tabla 1.10.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )		$m_i$	$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_p$ (m)	$T_i$ (s)	$n_i$	$n_i * m_i$
5	10	45	75	$7.5 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-4}$	0.705	31.7
10	30	25	20	$2.0 \times 10^{-5}$	$9.3 \times 10^{-4}$	0.896	22.4
30	50	15	40	$8.5 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-3}$	0.970	14.6
50	70	10	60	$8.5 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-3}$	0.989	9.9
70	100	5	85	$8.5 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-2}$	0.996	5.0
<b>Eficiencia total</b>							<b>83.6</b>

Tabla 1.10. Cálculo de la eficiencia para el ejemplo 1.

### 2.4.1.5 Calcular la caída de presión del ciclón y si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón

#### 2.4.1.5.1 Número de cabezas de velocidad (Ecuación 10.18)

$$Nh = K \times \frac{a \times b}{Ds^2}$$

$$Nh = 16 \times \frac{0.6 \times 0.24}{0.6^2} = 6.4$$

#### 2.4.1.5.2 Caída de presión (Ecuación 10.17)

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times Vi^2 \times Nh$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times 0.411 \times 22^2 \times 6.4 = 635.8 Pa$$

Como la caída de presión es menor a la recomendada en la tabla 1.8, no se necesita seleccionar otro tipo de ciclón.

### 2.4.2.- Ejemplo II

Calcular la eficiencia, la caída de presión y la relación de velocidades para un ciclón Swift de alta eficiencia con los datos del ejemplo 1 y comparar con los obtenidos para un ciclón Stairmand.

El procedimiento es el mismo que el utilizado en el ejemplo 1. La tabla 1.11. consigna los resultados para ambos ciclones.

Parámetro	Stairmand	Swift
Eficiencia (%)	83.6	84.5
Caída de presión (Pa)	635.8	918.0
Relación de velocidades ( $V_i/V_s$ )	0.619	0.603

Tabla 1.11. Parámetros para los ciclones Stairmand y Swift.

Para los datos de material particulado, a una velocidad de entrada de 22 m/s para el gas, las diferencias en la eficiencia son mínimas puesto que el Swift alcanza un 84.5% y el Stairmand un 83.6%, pero la caída de presión en el Swift son mucho mayores que en el Stairmand.

Por esto, el Swift no sería una buena alternativa para este ejemplo, puesto que los costos por requerimientos de potencia y energía son mayores y no justifican la diferencia de eficiencia con el Stairmand.

### 2.4.3 Ejemplo 3

Graficar los valores de la eficiencia, la caída de presión y la relación de velocidades como función de la velocidad de entrada para un ciclón Stairmand y Swift de alta eficiencia con los datos del ejemplo 1 y comparar con los obtenidos para un ciclón Stairmand.

El procedimiento es el mismo que el utilizado en el ejemplo 1. La tabla 1.12. y las figuras 16 a 18 consignan los resultados para ambos ciclones.

Velocidad (m/s)	Eficiencia (%)		Caída de presión (Pa)		Relación $V_i/V_s$	
	Stairmand	Swift	Stairmand	Swift	Stairmand	Swift
15	79.2	80.2	295.6	426.7	0.538	0.524
16	80	81.0	336.3	485.5	0.551	0.536
17	80.7	81.7	379.7	548.1	0.563	0.548
18	81.3	82.3	425.6	614.5	0.575	0.560
19	81.9	82.9	474.2	684.7	0.586	0.571
20	82.5	83.5	525.5	758.6	0.598	0.582
21	83.1	84.0	579.3	836.4	0.608	0.593
22	83.6	84.5	635.8	918.0	0.619	0.603
23	84.1	85.0	694.9	1003.3	0.629	0.613
24	84.5	85.4	756.7	1092.5	0.639	0.622
25	84.9	85.8	821.0	1185.4	0.649	0.632
26	85.4	86.2	888.0	1282.1	0.658	0.641
27	85.7	86.6	957.7	1382.6	0.667	0.650
28	86.1	87.0	1029.9	1487.0	0.676	0.659
29	86.5	87.3	1104.8	1595.1	0.685	0.667
30	86.8	87.6	1182.3	1707.0	0.693	0.675
31	87.1	88.0	1262.4	1822.7	0.702	0.684
32	87.4	88.3	1345.2	1942.0	0.710	0.692
33	87.7	88.5	1430.6	2065.4	0.718	0.699
34	88.0	88.8	1518.6	2192.5	0.726	0.707
35	88.3	89.1	1609.3	2323.4	0.734	0.715
36	88.6	89.3	1702.5	2458.0	0.741	0.722
37	88.8	89.6	1798.4	2596.5	0.749	0.729
38	89.1	89.8	1897.0	2738.7	0.756	0.737
39	89.3	90.0	1998.1	2884.8	0.764	0.744
40	89.5	90.3	2101.9	3034.6	0.771	0.751

Tabla 1.12. Variación de algunos parámetros con la velocidad de entrada para los ciclones Stairmand y Swift.

La figura 16 y la tabla 1.12. Muestran que la eficiencia del ciclón Swift es ligeramente superior a la del ciclón Stairmand y que un aumento en la velocidad de entrada de 15 m/s a 20 m/s resulta en un aumento de la eficiencia del 4.2% y el 4.1% para los ciclones Stairmand y Swift, respectivamente; mientras que un aumento de la misma magnitud, pero en el intervalo de 35 a 40 m/s, resulta en un aumento del 1.4% y el 1.3% para estos ciclones.

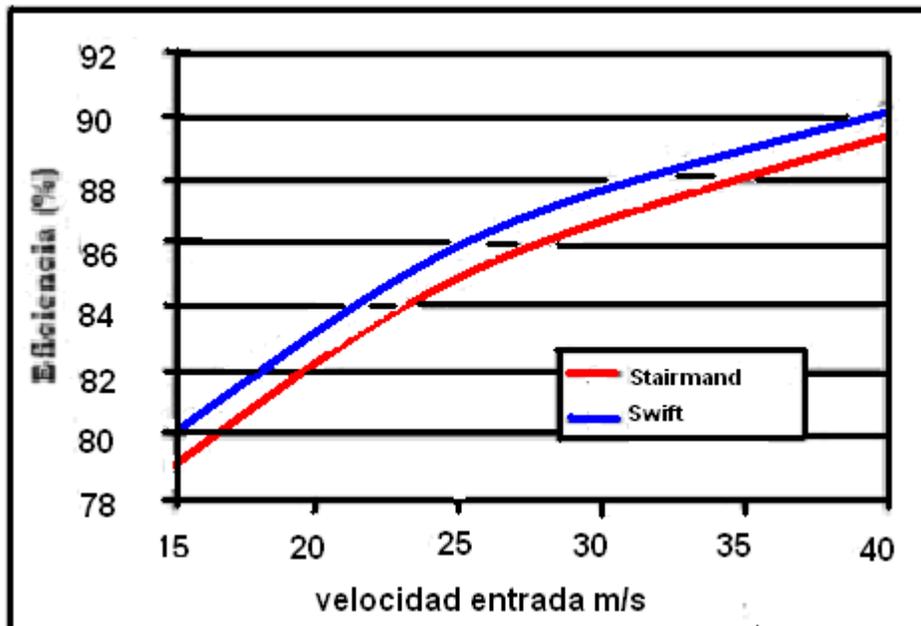


Fig.16. Variación de la eficiencia con la velocidad de entrada al ciclón.

La figura 17 y la tabla 1.12. Muestran que a medida que aumenta la velocidad de entrada aumentan las caídas de presión, especialmente en el ciclón Swift. Además, se observa que el valor límite para la velocidad de entrada para el ciclón Swift, con el fin de mantener una caída de presión por debajo de 2488.16 Pa (0,02488 Bar), es de 36 m/s, mientras que el ciclón Stairmand no presenta problemas con el intervalo de velocidades escogidas en la tabla 1.8.

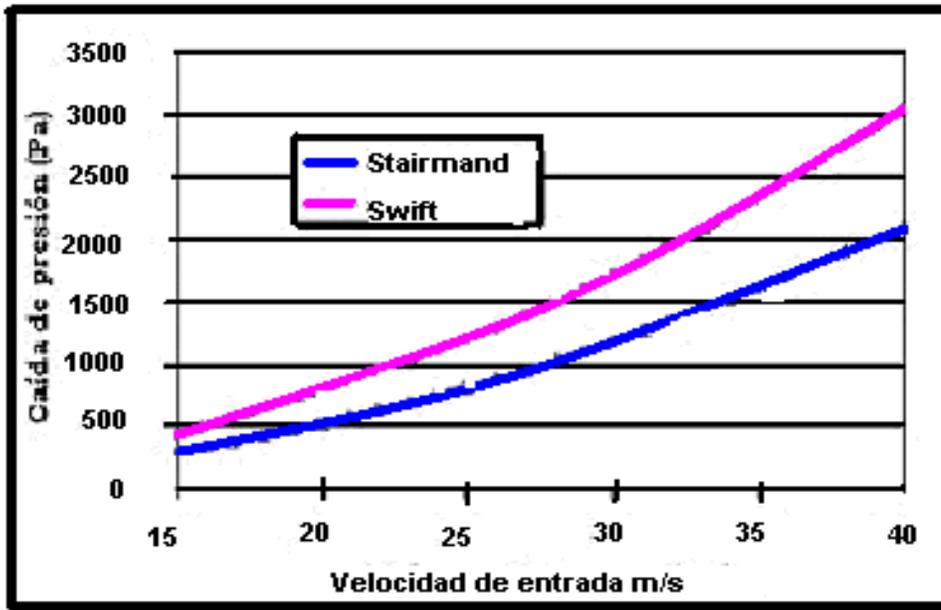


Fig.17. Variación de la caída de presión con la velocidad de entrada al ciclón.

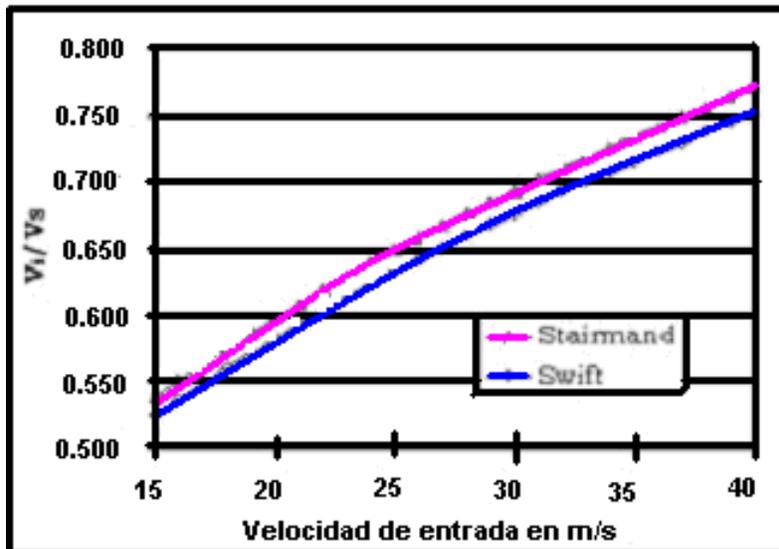


Fig.18 Variación de la caída de presión con la velocidad de entrada al ciclón.

La figura 18 y la tabla 1.12. Muestran que a medida que aumenta la velocidad de entrada aumentan la relación de velocidades, sin embargo, el intervalo de velocidades escogidas, no sobrepasan el valor de 1.35 para el cual se presenta resuspensión de las partículas ya removidas.

#### 2.4.4 Ejemplo 4

Calcular la eficiencia de remoción para el ciclón Stairmand del ejemplo 1 con la ecuación 10.13 y comparar con los obtenidos con la ecuación 10.1.

La tabla 1.13 consigna los resultados obtenidos para el ejercicio 4. El valor del número de vórtices (N) se obtiene de la ecuación 10.1.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )		$m_i$	$D_p (\mu\text{m})$	$D_p (m)$	$n_i$	$n_i * m_i$
5	10	45	7.5	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.339	15.2
10	30	25	20	$2.0 \cdot 10^{-5}$	0.947	23.7
30	50	15	40	$4.0 \cdot 10^{-5}$	1.000	15.0
50	70	10	60	$6.0 \cdot 10^{-5}$	1.000	10.0
70	100	5	85	$8.5 \cdot 10^{-5}$	1.000	5.0
<b>Eficiencia total</b>						<b>68.9</b>

Tabla 1.13 Cálculo de la eficiencia para el ejemplo 4.

Como puede observarse en la tabla 1.13. La eficiencia calculada a través de la ecuación 10.1 es mucho mayor que la estimada por la ecuación 10.13.

#### 2.4.5 Recirculación del gas

La recirculación del gas de una parte de los gases de salida permite incrementar la eficiencia de captación de un ciclón; sin embargo, el aumento de caudal del gas en el interior del aparato implica un mayor tamaño del mismo y una mayor pérdida de presión. La recirculación puede ser, por lo tanto, interesante en determinados casos en los que sea importante aumentar la eficiencia (para prescindir de una segunda etapa de captación, por ejemplo) o bien cuando quiere mantenerse una determinada velocidad de operación pese a una variación del caudal a tratar (mayor flexibilidad).

El efecto de la recirculación puede calcularse con algunas de las ecuaciones anteriores (10.1, 10.19 y con la 10.22), así como con la ecuación 10.25:

$$Q_e = (1 + r) \times Q \quad \text{Ecuación 10.24}$$

La eficiencia global de la corriente puede calcularse, para cada intervalo de tamaño, a partir de  $\eta_i$ :

$$\frac{E_i}{\eta_i} = \frac{1 + r}{1 + r \times \eta_i} \quad \text{Ecuación 10.25}$$

En la cual:

$E_i$  = Eficiencia fraccional global del ciclón por intervalos de tamaños.

La eficiencia total sería:

$$E = \sum E_i \times m_i \quad \text{Ecuación 10.26}$$

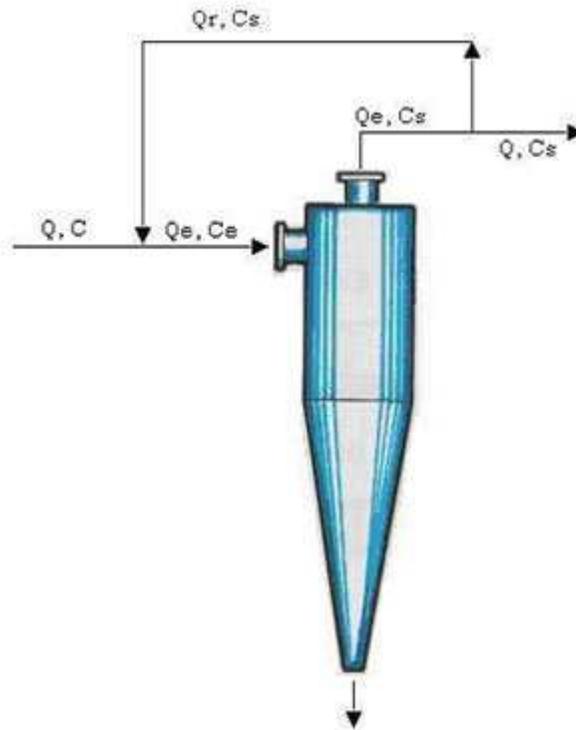


Fig.19. Recirculación del gas.

## 2.4.6 Otras consideraciones

### 2.4.6.1 Ventajas de los ciclones

Las ventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

- a) Bajos costos de capital.
- b) Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.
- c) Caída de presión relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas.
- d) Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción.
- e) Colección y disposición en seco.
- f) Requisitos de espacio relativamente pequeños.

### 2.4.6.2 Desventajas de los ciclones

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

### 2.4.6.3 Análisis de costos para ciclones

Los ciclones son muy económicos, los costos de capital son inferiores a los de otros equipos de control tales como filtros de talegas y precipitadores electrostáticos. Debido a su simplicidad, el único gasto de operación más significativo es el costo de electricidad para vencer la caída de presión a través del dispositivo.

Vatavuk desarrolló una correlación para estimar los costos de un ciclón completo para un intervalo de áreas de entradas al ciclón. Los costos incluyen un ciclón en acero al carbono, ventilador, motor y una tolva para recoger las partículas capturadas. La correlación es:

$$CE = 57800 \times (a \times b)^{0.903}$$

En la cual:

CE = Costos del ciclón completo, US\$ (1995).

a, b = Alto y ancho de la entrada al ciclón, siempre y cuando  $0.02 > a * b > 0.4$  m<sup>2</sup>.

Los trabajos de instalación y conexiones (ductos) son a menudo más costosos que el ciclón mismo. La inversión total de capital es alrededor de dos veces los costos de adquisición del equipo completo.

La siguiente es la correlación propuesta por Peters y Timmerhaus para los costos de un multiciclón completo:

$$CE = (7000 \times a \times b \times 72) NC$$

En la cual:

CE = Costos del multiciclón completo, US\$ (1995).

NC = Número de multiciclones.

a, b = Alto y ancho de la entrada al ciclón, siempre y cuando  $1.0 > a * b * NC > 6.0$  m<sup>2</sup>.

## CAPÍTULO III

### 3. CÁLCULO Y DISEÑO DE UN CICLÓN DE ALTA EFICIENCIA

Como hemos definido anteriormente un ciclón de alta eficiencia está diseñado para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de  $5 \mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

#### 3.1 Problemática

Se desea diseñar un ciclón para separar partículas provenientes de procesos donde es secado el chip de madera, este chips es enviado al ciclón por un ventilador cuyo caudal de aire es  $9000 \text{ m}^3/\text{hora}$ , en la descarga es recogido por un tornillo transportador, para posteriormente ser prensado y convertido en placas.

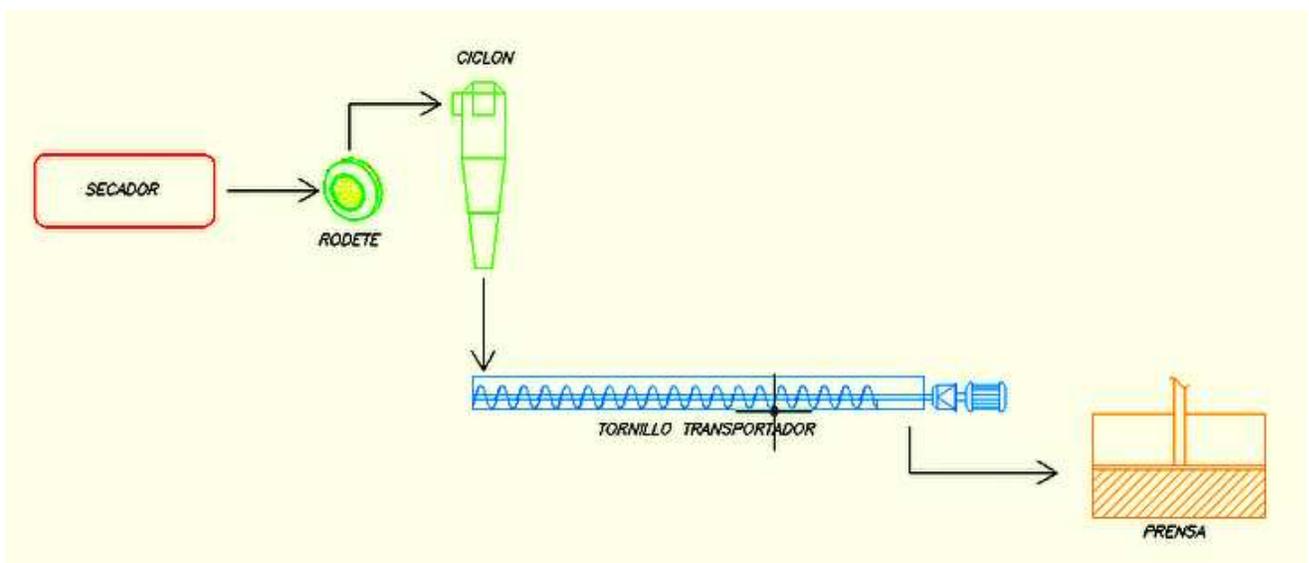


Figura 20 Muestra esquema de Proceso

#### 3.2 Condiciones generales

Como condiciones generales se ha solicitado que:

- Sea un ciclón tipo Stairmand de alta eficiencia
- $Q$  aire  $9000 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ )
- Velocidad de entrada  $17 \text{ m/s}$  (sugerida)
- Densidad de partículas  $1500 \text{ Kg/m}^3$
- Temperatura del gas  $89 \text{ }^\circ \text{C}$

- Presión de Trabajo 101 Kpa.
- Se requiere una eficiencia de separación del 80%.
- La concentración de partículas es de 20 g/m<sup>3</sup>
- Densidad del aire 0,7 Kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad del aire 1,8\*10<sup>-6</sup> Kg/m\*s.

La estimación que se realizó en terreno, de los tamaños de partículas son las siguientes:

TAMAÑO ( $\mu m$ )	% MÁSSICO
5-10	35
10-50	25
50-100	20
100-150	12
150-200	8

Tabla N°1.14 Distribución estimativa de tamaños de partículas

Como el 35% de las partículas esta por debajo de 10  $\mu m$ , se requiere un ciclón de alta eficiencia. Por lo tanto seleccionamos un ciclón de la familia de ciclones de alta eficiencia. Seleccionamos un ciclón Stairmand.

### 3.3 Cálculo dimensiones del ciclón

Área ducto entrada. Teniendo como consideración una velocidad de entrada desde la red neumática de 17 m/s.

$$\text{Área} = \frac{Q}{V_i} = \frac{2,5}{17} = 0,147 \text{ m}^2.$$

Para un ciclón tipo Stairmand tenemos:

$$\text{Área del ducto de entrada} = a \times b$$

$$\text{Altura de entrada al ciclón (a):} \quad a = 0,5D_c$$

$$\text{Ancho de entrada al ciclón (b):} \quad b = 0,2D_c$$

Igualando nuestras ecuaciones:

$$a \times b = 0,5D_c \times 0,2D_c = 0,147 \text{ m}^2$$

$$D_c = \sqrt{\frac{0,147}{0,5 \times 0,2}} = 1,21 \text{ m.}$$

Las otras dimensiones se hallan con base en las proporciones propuestas:

Altura de entrada al ciclón (a):  $a = 0,5D_c$   
 $a = 0,5 \times 1,21 = 0,60m$

Ancho de entrada al ciclón (b):  $b = 0,2D_c$   
 $b = 0,2 \times 1,21 = 0,24m$

Altura de salida del ciclón (S):  $S = 0,5D_c$   
 $S = 0,5 \times 1,21 = 0,60m$

Diámetro de salida del ciclón (Ds):  $D_s = 0,5D_c$   
 $D_s = 0,5 \times 1,21 = 0,60m$

Altura parte cilíndrica del ciclón (h):  $h = 1,5D_c$   
 $h = 1,5 \times 1,21 = 1,81m$

Altura total del ciclón (H):  $H = 4,0D_c$   
 $H = 4,0 \times 1,21 = 4,84m$

Altura parte cónica del ciclón (z):  $z = 2,5D_c$   
 $z = 2,5 \times 1,21 = 3,02m$

Diámetro salida del polvo (B):  $B = 0,375D_c$   
 $B = 0,375 \times 1,21 = 0,45m$

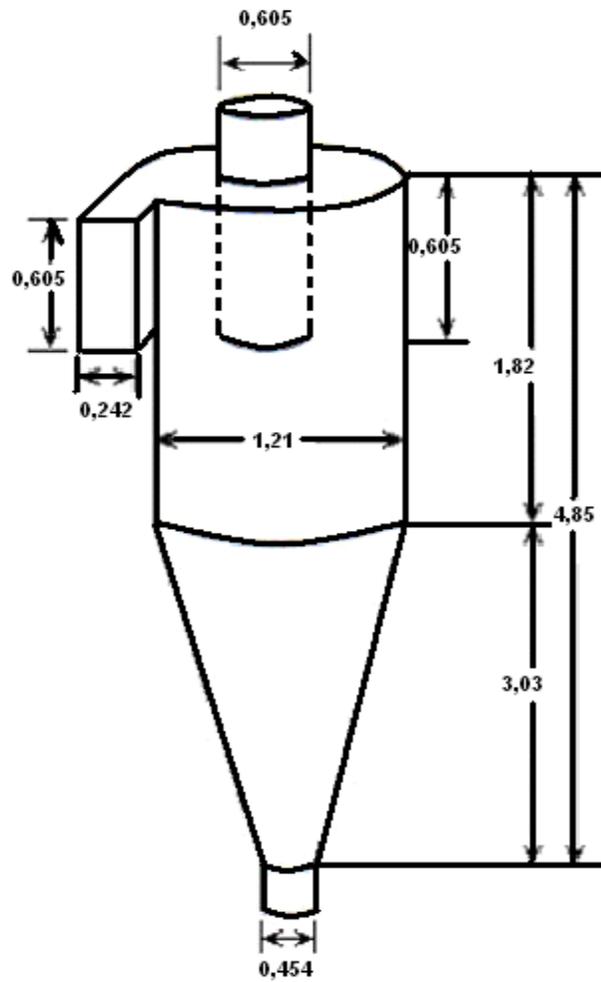


Fig.21 Esquema ciclón a diseñar

Con esto se tiene preliminarmente dimensionado nuestro ciclón.

Como el Valor  $D_c > 1$  se debería colocar otro ciclón en paralelo, pero la velocidad calculada esta entre el intervalo recomendando ( $0.5$  y  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el  $D_c$  no es excesivamente alto comparado con la restricción de 1 metro, es por eso que, se utilizará un solo ciclón

Tampoco para este caso es recomendable colocar otro ciclón en serie ya que no posee una amplia distribución de tamaños, incluyendo una porción importante de partículas más finas que  $15 \mu\text{m}$ , en cuyo caso se utiliza un solo ciclón de diámetro grande para recoger la fracción de partículas gruesas y reducir la carga para una unidad con un diámetro más pequeño, pero para este caso no será necesario.

### 3.4 Cálculo la eficiencia del ciclón

Para calcular la eficiencia del ciclón se requiere calcular primero si hay o no resuspensión, ya que de presentarse resuspensión en el ciclón, la ecuación de Leith y Licht estaría sobrestimando la eficiencia del ciclón.

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación.

Velocidad equivalente W (Ecuación 10.16):

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

$\rho_p = 1500 \text{ Kg. /m}^3$  Densidad de la partícula,  $\text{Kg/m}^3$ .

$\rho = 0,7 \text{ Kg/m}^3$  Densidad del gas portador,  $\text{Kg/m}^3$ .

$\mu = 1,8 \times 10^{-6} \text{ Kg/m}^3\text{s}$  Viscosidad del gas portador,  $\text{Kg/m}^3\text{s}$

Como la corriente gaseosa es aire, éstas son las propiedades del aire a  $89^\circ\text{C}$  y Presión atmosférica:

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times 9,8 \times 1,8 \times 10^{-6} \times (1500 - 0,7)}{3 \times 0,7^2}} = 0,896 \frac{m}{s}$$

$W = 0.896 \text{ m/s}$

Velocidad de saltación (Ecuación 10.15):

$$V_s = \frac{4.913 \times W \times Kb^{0.4} \times D_c^{0.067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - Kb}}$$

$V_s =$  Velocidad de saltación,  $\text{m/s}$

$V_i =$  Velocidad de entrada del gas en el ciclón,  $\text{m/s}$

$D_c =$  Diámetro de ciclón

$Kb =$  Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón:

$$Kb = \frac{b}{D_c} = \frac{0,242}{1,21} = 0,2$$

$$V_s = \frac{4,913 \times 0,896 \times 0,2^{0,4} \times D_c^{0,067} \times \sqrt[3]{17^2}}{\sqrt[3]{1-0,2}} = 16,38 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_i}{V_s} = \frac{17}{16,38} = 1,04$$

$$\frac{V_i}{V_s} < 1,35 \text{ no existe resuspensión de material.}$$

Ahora se procede a calcular la eficiencia del ciclón.

Volumen del ciclón evaluado sobre la salida (Ecuación 10.7):

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

De los datos calculados de las dimensiones del ciclón tenemos:

Altura de entrada al ciclón (a)

Altura de salida del ciclón (S)

Diámetro del ciclón (Dc)

Diámetro de salida del ciclón (Ds)

Ancho de entrada al ciclón (b)

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left( 0,606 - \frac{0,606}{2} \right) \times (1,21^2 - 0,606^2) = 0,261 \text{ m}^3$$

Longitud natural del ciclón (Ecuación 10.6):

$$L = 2,3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a \times b}}$$

$$L = 2,3 \times 0,606 \times \sqrt[3]{\frac{1,21^2}{0,606 \times 0,1665}} = 3,4 \text{ m}$$

Condición:  $L < H - S$

$$3,4 < 4,85 - 0,606$$

$$3,4 < 4,244$$

Ya que cumple la condición, calculamos el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón.

Factor de dimensiones lineales (Ecuación 10.9):

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

$$Kl = 1,21 - (1,21 - 0,454) \times \left[ \frac{0,606 + 3,4 - 1,82}{3,03} \right] = 0,33m$$

Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural (Ecuación 10.8):

$$VR = \frac{\pi}{4} \times Dc^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times Dc^2 \times (L + S - h) \times \left[ 1 + \frac{Kl}{Dc} + \left( \frac{Kl}{Dc} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times Ds^2 \times L$$

$$VR = \frac{\pi}{4} \times 1,2^2 \times (1,82 - 0,606) + \frac{\pi}{12} \times 1,2^2 \times (3,4 + 0,606 - 1,82) \times \left[ 1 + \frac{0,33}{1,21} + \left( \frac{0,33}{1,21} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times 0,60^2 \times 3,4 = 2,03m^3$$

Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón (Ecuación 10.4):

$$Kc = \frac{\left( Vsc + \frac{Vr}{2} \right)}{Dc^3}$$

$$Kc = \frac{\left( 0,261 + \frac{2,03}{2} \right)}{1,21^3} = 0,720m^3$$

Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón:

$$Ka = \frac{a}{Dc} = \frac{0,606}{1,21} = 0,5$$

Factor de configuración (Ecuación 10.3):

$$G = \frac{8 \times Kc}{(Ka \times Kb)^2}$$

$$G = \frac{8 \times 0,720}{(0,5 \times 0,2)^2} = 576$$

Exponente de vórtice (Ecuación 10.11):

$$n = 1 - (1 - 0,67 \times Dc^{0,14}) \left[ \frac{T}{283} \right]^{0,3}$$

$$n = 1 - (1 - 0,67 \times 1,21^{0,14}) \left[ \frac{362}{283} \right]^{0,3} = 0,711$$

Tiempo de relajación (Ecuación 10.10):

$$Ti = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu}$$

Para una partícula con  $D_{pi} = 7.5 \mu\text{m}$  ( $7.5 \times 10^{-6}$  m), tenemos:

$$Ti = \frac{1500 \times (7.5 \times 10^{-6})^2}{18 \times (1.8 \times 10^{-5})} = 2.6 \times 10^{-4}$$

### 3.5 Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

Se comenzará con el intervalo de partículas más pequeño  $D_{pi} 7.5 \times 10^{-6}$  m  
Como la concentración de las partículas es de  $20 \text{ g/m}^3$ , la ecuación 10.1 no deberá ser corregida con la ecuación 10.22.

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

Para una partícula con  $D_{pi} = 7.5 \mu\text{m}$  ( $7.5 \times 10^{-6}$  m), tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{576 \times 2.6 \times 10^{-4} \times 2.5 \times (0.711 + 1)}{1.21^3} \right)^{\frac{0.5}{0.711+1}} \right] = 0.7721$$

Ahora el proceso se repite pero esta vez para el tamaño de partícula diferente.

Tiempo de relajación (Ecuación 10.10):

$$Ti = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu}$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (3.0 \times 10^{-5})$  m, tenemos:

$$Ti = \frac{1500 \times (3.0 \times 10^{-5})^2}{18 \times (1.8 \times 10^{-5})} = 4.2 \times 10^{-3}$$

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

Para una partícula con  $D_{pi} = (3.0 * 10^{-5} \text{ m})$ , tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{576 \times 4,2 \times 10^{-3} \times 2,5 \times (0,711 + 1)}{1,21^3} \right)^{\frac{0,5}{0,711+1}} \right] = 0,964$$

Ahora el proceso se repite desde cálculos de tiempos de relajación, hasta terminar con los  $D_{pi}$ .

Tiempo de relajación (Ecuación 10.10):

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu}$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (7,5 * 10^{-5} \text{ m})$ , tenemos:

$$T_i = \frac{1500 \times (7,5 \times 10^{-5})^2}{18 \times (1,8 \times 10^{-5})} = 0,0260$$

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{G \times T_i \times Q \times (n + 1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right]$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (7,5 * 10^{-5} \text{ m})$ , tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{576 \times 0,0260 \times 2,5 \times (0,711 + 1)}{1,21^3} \right)^{\frac{0,5}{0,711+1}} \right] = 0,996$$

Ahora el proceso se repite desde cálculos de tiempos de relajación, hasta terminar con los  $D_{pi}$ .

Tiempo de relajación (Ecuación 10.10):

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu}$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (0,000125 \text{ m})$ , tenemos:

$$T_i = \frac{1500 \times (0,000125)^2}{18 \times (1,8 \times 10^{-5})} = 0,0723$$

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{G \times T_i \times Q \times (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right]$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (1,25 \times 10^{-5} \text{ m})$ , tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{576 \times 0,0723 \times 2,5 \times (0,711 + 1)}{1,21^3} \right)^{\frac{0,5}{0,711+1}} \right] = 0,99$$

Repetiendo el proceso desde cálculos de tiempos de relajación, hasta terminar con los  $D_{pi}$ .

Tiempo de relajación (Ecuación 10.10):

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu}$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (0,000175 \text{ m})$ , tenemos:

$$T_i = \frac{1500 \times (0,000175)^2}{18 \times (1,8 \times 10^{-5})} = 0,1417$$

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{G \times T_i \times Q \times (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right]$$

Para una partícula con  $D_{pi} = (1,75 \times 10^{-5} \text{ m})$ , tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[ -2 \times \left( \frac{576 \times 0,1417 \times 2,5 \times (0,711 + 1)}{1,21^3} \right)^{\frac{0,5}{0,711+1}} \right] = 0,999$$

Los datos calculados se reportan en la tabla 1.15

Tamaño en ( $\mu\text{m}$ )		$m_i$	$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{pi}$ (m)	$T_i$	$\eta_i$	$\eta_i \cdot m_i$
5	10	35	7,5	$7,5 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-4}$	0,7721	27,02
10	50	25	30	$3,0 \times 10^{-5}$	$4,2 \times 10^{-3}$	0,964	24,1
50	100	20	75	$7,5 \times 10^{-5}$	0,0260	0,996	19,92
100	150	12	125	0,000125	0,0723	0,998	11,976
150	200	8	175	0,000175	0,1417	0,999	7,992
Eficiencia Total							91%

Tabla 1.15 Datos cálculo de eficiencia ciclón

### 3.6 Calcular la caída de presión del ciclón

Los número de cabezas de velocidad son teniendo en consideración que K toma el valor de 16 para ciclones de entrada tangencial. (Ecuación 10.18).

$$Nh = K \times \frac{a \times b}{Ds^2}$$

$$Nh = 16 \times \frac{0.6 \times 0.24}{0.6^2} = 6.4$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \times \rho \times Vi^2 \times Nh$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 17^2 \times 6.4 = 1017.28 Pa$$

Como la caída de presión es menor a la recomendada, es decir,  $1017.28 < 2488.16 Pa$  de la tabla 1.8 de la Pág. 44, no se necesita seleccionar otro tipo de ciclón.

Tenemos nuestro ciclón calculado y diseñado en el plano adjunto a este capítulo, sólo nos queda la etapa constructiva que se llevara a cabo en el siguiente capítulo.

## CAPITULO IV

### 4. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL CICLÓN DE ALTA EFICIENCIA Y COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Una vez diseñado nuestro ciclón y teniendo todos nuestros cálculos y dimensiones, solo nos queda cuantificar nuestros gastos, y construir nuestro ciclón, estos dos puntos representan el final de nuestro análisis, y nos dirán si nuestro anteproyecto resulto exitoso, o se tendrán que mejorar algunas cosas, es de especial importancia que se construya íntegramente nuestro ciclón en maestranza, para así abaratar costos que se podrían suscitar en el lugar del montaje.

#### 4.1 Proceso sistemático constructivo del ciclón

En este ítem se sugiere un procedimiento sistemático constructivo del ciclón, que envuelve los siguientes puntos:

##### 4.1.1- Diseño de los planos

Se diseñaran los planos respectivos del ciclón en plataforma AUTOCAD, con los datos entregados del análisis matemático, que nos entregan la seguridad de funcionamiento, estos planos contienen los detalles de flanges, y uniones entre partes, además de sus respectivas tres vistas, y desarrollos del planchaje.

Ver Plano Adjunto.

##### 4.1.2- Selección de Materia prima

Para la construcción del ciclón se necesitará como materia prima, Acero y soldadura, como se muestra a continuación.

###### 4.1.2.1 Acero

Este ciclón será construido íntegramente en plancha antidesgaste T1-360 Brinnell, de 4mm de espesor, este tipo de plancha, es fabricada mediante un proceso termomecánico.

La plancha forjada es sometida a un tratamiento de liberación de tensiones seguido de un temple y revenido. Este tratamiento permite una buena soldabilidad, además de buenas propiedades de tenacidad, una alta dureza (360-400 HB) y resistencia a la abrasión.

Se utiliza en revestimiento de tolvas, kit baldes, cuchillos de maquinarias, movimientos de tierras, chutes de descarga, industria forestal y en distintos tipos de herramientas.

Como planchas alternativas en caso de no encontrarse en el comercio, se podría utilizar DUR-CAP, COR-CAP, etc.

El formato de venta en el comercio de esta plancha es de 1500 \* 3000 mm y se vende en espesores 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25 mm, su valor bordea los 17000 mil pesos chilenos el kilogramo.

#### 4.1.2.2 Soldadura

Para poder soldar este tipo de acero se necesita una soldadura acorde a las necesidades, que para este caso son alta resistencia a la abrasión y una gran dureza, por ende una de las soldaduras que cumple con esos requisitos es la 11018 que posee las siguientes características.

Composición química (típica) del metal depositado:						
C 0,04%; Mn 1,50%; P 0,02%; S 0,02%; Si 0,40%; Mo 0,30%; Ni 1,90%; Cr 0,25%						
Características típicas del metal depositado:						
Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte (según norma AWS: A5.5-96):				Requerimientos según norma AWS: A5.5-96:		
Resistencia a la tracción : 113.000 lb/pulg <sup>2</sup> (780 MPa)				100.000 lb/pulg <sup>2</sup> (690 MPa)		
Límite de fluencia : 104.000 lb/pulg <sup>2</sup> (717 MPa)				88-100.000 lb/pulg <sup>2</sup> (605 MPa)		
Alargamiento en 50 mm. : 23%				20%		
Amperajes recomendados:						
Diámetro pulg.	Electrodo mm.	Longitud pulg.	Electrodo mm.	Amperaje		Electrodos x kg. aprox.
				min.	máx.	
1/8	3,2	14	350	120	160	32
5/32	4,0	14	350	160	220	24
3/16	4,8	14	350	200	275	14

Tabla 1.16

Clasificación AWS: E-11018-M

- Electrodo para aceros de baja aleación
- Con hierro en polvo
- Corriente continua.
- Electrodo positivo
- Toda posición

## Descripción

El 11018 es un electrodo de bajo contenido de hidrógeno con hierro en polvo en su revestimiento. Posee una gran velocidad de deposición y permite obtener uniones de alta resistencia mecánica. Los depósitos obtenidos son de excelente calidad radiográfica.

## Usos

Este electrodo ha sido diseñado para obtener soldaduras de alta eficiencia en aceros de baja aleación y alta resistencia, como son los de uso comercial: T1, Cor-Cap y Dur-Cap.

## Aplicaciones típicas

- Estructuras acero T1
- Palas mecánicas
- Corazas de molinos
- Chasis maquinarias

## Procedimiento para soldar

Para producir mejores depósitos, deberá usarse un arco muy corto. El tamaño y forma del depósito se controlan con el movimiento del electrodo, evitando alargar el arco. Cuando se hagan varias pasadas deberá removerse previamente la escoria.

El procedimiento para soldar todos los electrodos de Bajo Hidrógeno es básicamente el mismo. Las aleaciones incorporadas a sus revestimientos no afectan las características de operabilidad de los electrodos. Para los que poseen hierro en polvo se debe usar una corriente ligeramente mayor (EXX18), que para aquellos que no lo contengan (EXX16). El arco debe mantenerse lo más corto posible en todo momento, pudiéndose usar una oscilación muy suave para controlar la forma y ancho del cordón. En soldaduras de varios pases, toda la escoria debe ser removida y la limpieza del cordón debe ser efectuada a conciencia.

Posiciones en las cuales se puede soldar.

Soldaduras en plano.

Esta soldadura debe ser hecha con el mayor amperaje permitido por diámetro, para asegurar una buena fusión en los costados. Se puede usar una oscilación de 2 1/2 veces el diámetro del electrodo, aunque se recomienda, para soldaduras anchas, varios cordones angostos.

Soldadura vertical.

El cordón de raíz debe hacerse ascendente, con un arco corto y muy poco movimiento en sentido de avance. El electrodo no debe ser movido bruscamente hacia arriba y por ningún motivo alargar el arco. Es preferible para este cordón usar un movimiento en forma de "V". El electrodo se mantiene un instante en el vértice de la "V" para lograr penetración y remoción de escoria. El largo de la "V" no debe ser mayor de 1/8". El segundo cordón y los sucesivos pueden hacerse con un movimiento oscilatorio de lado a lado, deteniéndose en los costados para permitir que la escoria atrapada en el primer cordón pueda salir a la superficie.

Soldadura sobrecabeza.

Se recomienda hacerlo con cordones angostos y mantener el electrodo en un ángulo de 30° respecto a la cara vertical.

Soldadura horizontal.

Los filetes horizontales deben hacerse con un cordón angosto, con el electrodo dirigido dentro de la unión un ángulo de 45°. El cordón angosto debe hacerse también en los pases subsiguientes.

Para llevar a buen término el proceso de soldadura, las planchas de acero deberán ser precalentadas.

El precalentamiento de las piezas a reparar con soldadura resistente al desgaste puede ser necesario, para evitar grietas en el metal base, como también en el depósito.

La temperatura de precalentamiento para cada aleación está indicada en su descripción respectiva y dependerá del contenido de Carbono y elementos de aleación en el metal base.

Cuanto más alto el contenido del Carbono, mayor debe ser la temperatura de precalentamiento.

Las temperaturas indicadas en esta tabla representan los valores mínimos para cada material, por lo que se recomienda usar siempre la temperatura más alta de las cifras indicadas para el metal base y para el material de aporte.

Aceros	Designación	% Carbono	Pre calentamiento Recomendado
ACEROS AL CARBONO	Aceros al Carbono	Bajo 0,20	Sobre 90°C
	Aceros al Carbono	0,20-0,30	90°C - 150°C
	Aceros al Carbono	0,30 - 0,45	150°C - 260°C
	Aceros al Carbono	0,45 - 0,80	260°C - 420°C
ACEROS CARBONO-MOLIBDENO	Aceros Carbono-Molibdeno	0,10 - 0,20	150°C - 260°C
	Aceros Carbono-Molibdeno	0,20 - 0,30	200°C - 320°C
	Aceros Carbono-Molibdeno	0,30 - 0,35	260°C - 420°C
ACEROS AL MANGANESO	Aceros al Mn Medio	0,20 - 0,25	150°C - 260°C
	SAET 1330	0,30	200°C - 320°C
	SAET 1340	0,40	260°C - 420°C
	SAET 1350	0,50	320°C - 480°C
	Ac. Mn. 12% (HADFIELD)	1,25	No requiere
ACEROS DE ALTA RESISTENCIA	Aceros Molibdeno-Manganeso	0,20	150°C - 260°C
	Aceros T1	0,10 - 0,20	90°C - 200°C
	Aceros Alta Resistencia ARMCO	0,12 Máx.	Sobre 90°C
	Aceros Mayari R	0,12 Máx.	Sobre 150°C
	Aceros DUR-CAP	0,25 Máx.	90°C - 200°C
	Aceros YOLOY	0,05 - 0,35	90°C - 320°C
	Aceros Cr-Cu-Ni	0,12 Máx.	90°C - 200°C
	Aceros CROMO-MANGANESO	0,40	200°C - 320°C
	Aceros Hi	0,12 Máx.	90°C - 260°C

Tabla 1.17

Aceros	Designación	% Carbono	Pre calentamiento Recomendado
ACEROS AL NIQUEL	SAE 2015	0,10—0,20	Sobre 150°C
	SAE 2115	0,10—0,20	90°C - 150°C
	Acero Niquel 2 1/2%	0,10—0,20	90°C - 200°C
	SAE 2315	0,15	90°C - 260°C
	SAE 2330	0,20	90°C - 260°C
	SAE 2340	0,30	150°C - 320°C
ACEROS CROMO-NIQUEL	SAE 3115	0,15	90°C - 200°C
	SAE 3125	0,25	150°C - 260°C
	SAE 3130	0,30	200°C - 370°C
	SAE 3140	0,40	260°C - 430°C
	SAE 3150	0,50	320°C - 480°C
	SAE 3215	0,15	150°C - 260°C
	SAE 3230	0,30	260°C - 370°C
	SAE 3240	0,40	370°C - 540°C
	SAE 3250	0,50	480°C - 600°C
	SAE 3315	0,15	260°C - 370°C
	SAE 3325	0,25	480°C - 600°C
	SAE 3435	0,35	480°C - 600°C
	SAE 3450	0,50	480°C - 600°C
ACEROS AL MOLIBDENO	SAE 4140	0,40	320°C - 430°C
	SAE 4340	0,40	370°C - 480°C
	SAE 4615	0,15	200°C - 320°C
	SAE 4630	0,30	260°C - 370°C
	SAE 4640	0,40	320°C - 430°C
	SAE 4820	0,20	320°C - 430°C
ACEROS CROMO-MOLIBDENO	Aceros 2% Cr - 1/2% Mo	Sobre 0,15	200°C - 320°C
	Aceros 2% Cr - 1/2% Mo	0,15 - 0,25	260°C - 430°C
	Aceros 2% Cr - 1% Mo	Sobre 0,15	260°C - 370°C
	Aceros 2% Cr - 1% Mo	0,15 - 0,25	320°C - 430°C
	Aceros 5% Cr - 1/2% Mo	Sobre 0,15	260°C - 430°C
	Aceros 5% Cr - 1/2% Mo	0,15 - 0,25	320°C - 480°C
ACEROS AL CROMO	12 - 14% Cr tipo 410	0,10	150°C - 260°C
	16 - 18% Cr tipo 430	0,10	150°C - 260°C
	23 - 30% Cr tipo 446	0,10	150°C - 260°C
ACEROS INOXIDABLES CROMO - NIQUEL	18% Cr - 8% Ni tipo 304	0,07	Estos aceros no requieren de pre calentamiento
	25 - 12 tipo 309	0,07	
	25 - 20 tipo 310	0,10	
	18 - 8 Cb tipo 347	0,07	
	18 - 9 Mo tipo 316	0,07	
	18 - 8 Mo tipo 317	0,07	

Tabla 1.17

El ciclón será construido íntegramente en maestranza se dividirá en tres partes para facilitar sus traslado, esta partes serán ensambladas mediante flanges de 6mm de espesor de igual material antes mencionado, que serán apernados con pernos de ½" \* 1" de acero carbono.

#### 4.1.3 Dimensionamiento y cálculo del peso de acero requerido

Este Ítem representa un punto muy importante, dentro de la vida laboral, ya que nos dirá si nuestro proyecto es rentable o no, es por eso que se debe estimar muy adecuadamente el aprovechamiento de plancha, ya que un mal aprovechamiento, nos disparará los costos de fabricación, teniendo en consideración que el precio de un kilogramo de acero T1 es considerablemente alto.

Para hacer esta estimación se construyó una planilla Excel, que nos dará las dimensiones adecuadas para confeccionar el cono de la parte inferior del ciclón, hay que consignar que este cono será dividido en dos partes, para facilitar su traslado las otras secciones cilíndricas del ciclón serán calculadas numéricamente.

**4.1.3.1 Cono Número 1**

CALCULO PARA DESARROLLO DE TRANSICION TRONCOCONICAS						
<b>DATOS</b>						
Diametro Mayor Interior (D)	1219	mm	A=	0,126710224	Y=	3311,539347
Diametro Menor Interior (d)	833	mm	G=	1527,243923	R=	4838,783269
Espesor de Plancha (E)	4	mm	M=	1,983965989	P=	2629,412303
Altura del Tronco Conico (H)	1515	mm	Z=	836,967932	S=	3842,117439
			D=	1222,983966	B=	0,794025528
<b>RESULTADOS</b>						
Radio Curva Exterior =	4838,783269	mm			L=	3741,978029
Radio Curva Interior =	3311,539347	mm			F=	376,3597534
Largo Tronco Conico =	1527,243923	mm				
Cuerda Mayor =	3741,978029	mm				
Cuerda Menor =	2560,913929	mm				
Angulo Beta (util) =	45,49431161	Grados				
	314,505688					

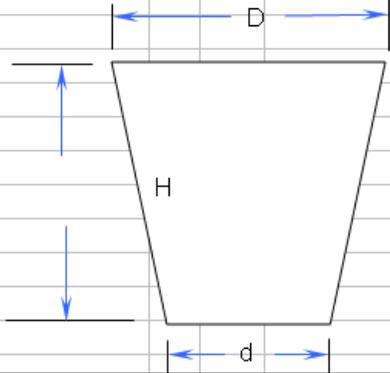


Figura 22

Teniendo las dimensiones del cono, se procede a dibujar en Autocad su desarrollo, con las dimensiones obtenidas, en la tabla vista. (Ver detalle en plano adjunto).

### 4.1.3.2 Cono Número 2

CALCULO PARA DESARROLLO DE TRANSICION TRONCOCONICAS						
<b>DATOS</b>						
Diametro Mayor Interior (D)	840	mm	A=	0,126710224	Y=	1811,991557
Diametro Menor Interior (d)	454	mm	G=	1527,243923	R=	3339,23548
Espesor de Plancha (E)	4	mm	M=	1,983965989	P=	1438,748689
Altura del Tronco Conico (H)	1515	mm	Z=	457,967932	S=	2651,453824
			D=	843,983966	B=	0,794030202
<b>RESULTADOS</b>						
Radio Curva Exterior =	3339,23548	mm			C=	1401,275903
Radio Curva Interior =	1811,991557	mm			L=	2582,346587
Largo Tronco Conico =	1527,243923	mm			F=	259,7281951
Cuerda Mayor =	2582,346587	mm				
Cuerda Menor =	1401,275903	mm				
Angulo Beta (util) =	45,49457946	Grados				
	314,505421					

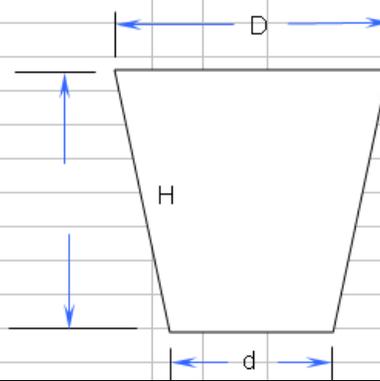


Figura 23

Teniendo las dimensiones del cono, se procede a dibujar en Autocad su desarrollo, con las dimensiones obtenidas, en la tabla vista. (Ver detalle en plano adjunto).

### 4.1.3.3 Cilindro Número 1

Su desarrollo se hará de acuerdo a la formula  $\pi * \text{Diámetro}$ , entonces tenemos:

$$3,1415 * 1,21 \text{ m} = 3,8 \text{ m de largo}$$

Y el alto de la plancha es 1,821 m.

### 4.1.3.4 Cilindro Número 2

Su desarrollo se hará de acuerdo a la formula  $\pi * \text{Diámetro}$ , entonces tenemos:

$$3,1415 * 0,606 \text{ m} = 1,938 \text{ m de largo}$$

Y el alto de la plancha es 0,909 m.

#### 4.1.3.5 Refuerzos

Los refuerzos se que se colocarán son de la siguiente forma:

Alto 0,304 m

Ancho 0,302 m

#### 4.1.3.6 Flanges

Para la construcción de este ciclón se estimó la necesidad de utilizar flanges de 6 mm de espesor en toda su extensión, consiguiendo con ello facilidad de transporte, facilidad en operaciones de montaje, optimización en mantención, pero como contrapartida se aumenta el peso del acero, además se añaden 12 pernos por unión de flanges, que tendrán las dimensiones de 14 mm de diámetro por una altura de 30 mm.

Se realizó el aprovechamiento de plancha en plataforma Autocad y se concluyó que para la construcción de todos los flanges se necesita una plancha de dimensiones 1500 \* 1600 \* 6 mm (ver plano adjunto).

A modo de aumentar la aislación del flange, antes de proceder a apretar los pernos, se colocará silicona alta temperatura entre estos.

La figura 24 y 25 muestran la colocación de un flange en un ducto.

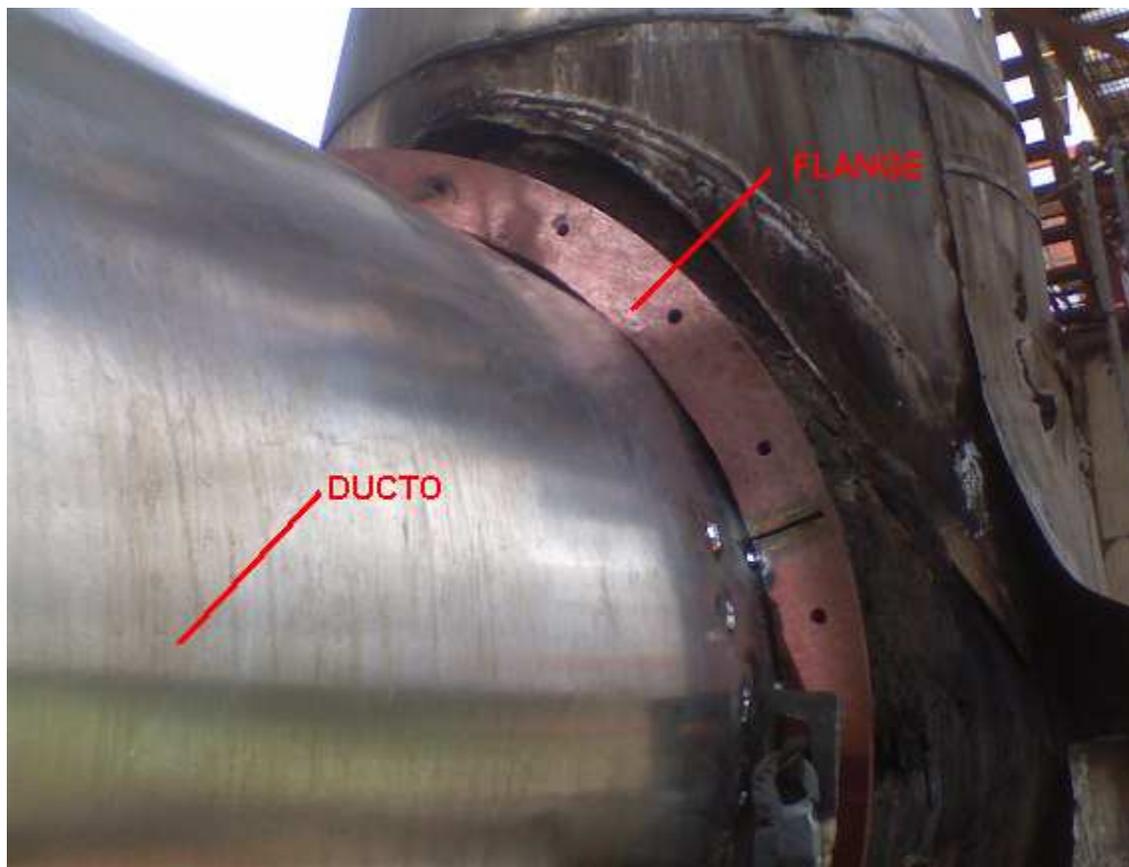


Fig. 24 Colocación de flange en un ducto.



Fig. 25 Colocación flange en un ducto

Todas las planchas utilizadas en la confección de este ciclón, son de espesor 4 mm, excepto los flanges que serán en 6mm.

Ítem	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Espesor (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso Kg
<b>Cono 1</b>	3,422	2,497	8,545	0,004	0,03418	8000	274
<b>Cono 2</b>	2,358	2,058	4,853	0,004	0,01941	8000	155
<b>Cilindro 1</b>	3,800	1,821	6,920	0,004	0,02768	8000	222
<b>Cilindro 2</b>	1,938	0,909	1,761	0,004	0,00704	8000	56
<b>Refuerzos (triangular) 4 unidades</b>	0,302	0,304	0,184	0,004	0,00074	8000	6
<b>Flanges</b>	1,600	1,500	2,4	0,006	0,0144	8000	155

Tabla 1.18 de pesos y dimensiones

Terminada la suma parcial de los pesos tenemos que el peso total del ciclón que será de 868 Kg.

#### 4.1.4 Cálculo de horas hombre invertidas en confeccionar el ciclón

Para este cálculo se utilizará una ecuación matemática de uso naval, que nos relaciona el peso del acero con las horas hombre que se deberán invertir, se debe decir que esta ecuación ha resultado bastante efectiva con la planificación de los tiempos.

$$H/H = C (Ws / 1000) ^{0,85}$$

H/H = Horas hombre total a invertir

Ws = Peso del acero en toneladas largas, 1 ton larga = 1016 Kg

C = Coeficiente que depende de la efectividad de la empresa, para una empresa promedio este coeficiente toma el valor de 50000.

Por tanto tenemos:

$$Ws = 868 \text{ Kg} / 1016 = 0,8543$$

$$H/H = 50000 \times (0,8543 / 1000) ^{0,85}$$

$$H/H = 124$$

#### 4.1.5 Procedimiento constructivo

El primer paso para la confección del ciclón consiste en cilindrar las planchas para este procedimiento se deberá usar una máquina cilindadora, como la que muestran las figuras 26 y 27

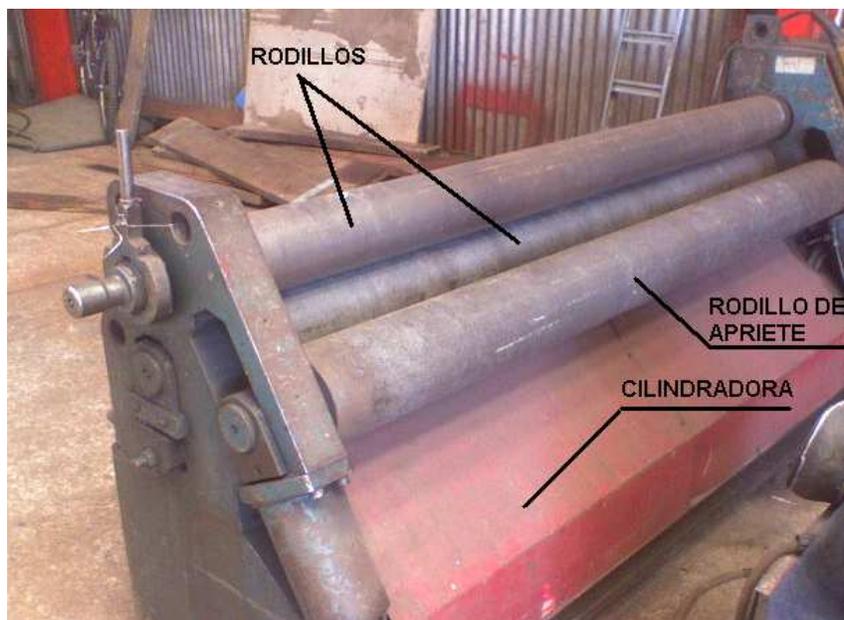


Fig. 26 Muestra máquina cilindadora, vista frontal.

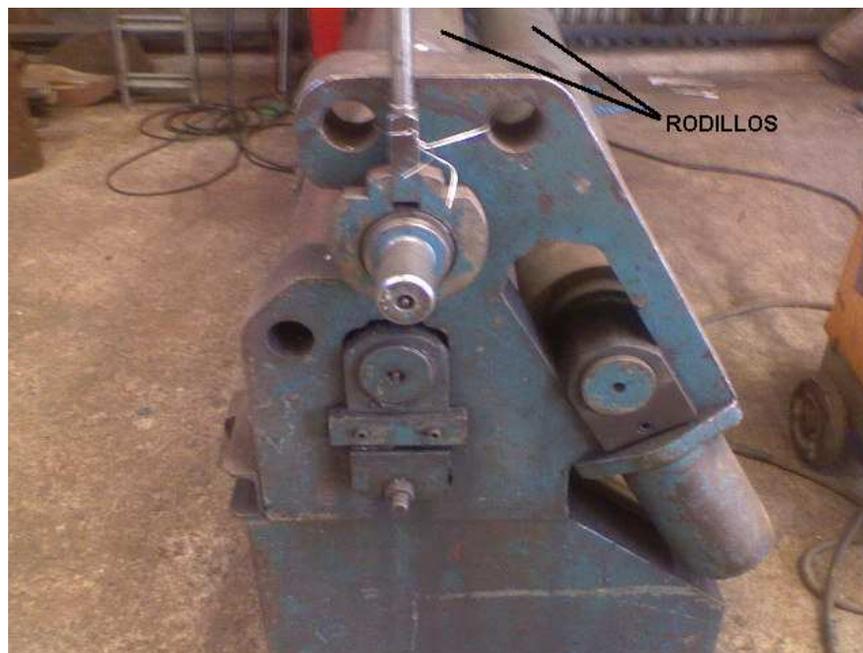


Fig. 27 Muestra máquina cilindradora, Vista lateral.

Esta maquina es capaz de cilindrar planchas hasta 6 mm de espesor con un ancho, de 2 metro

Las siguientes figuras muestran el cilindrado de un cono



Fig. 28 Cono cilindrándose vista lateral



Fig. 29 Cilindrado de cono vista frontal



Fig. 30 Cilindrado cono



Fig. 31 Cono terminado de cilindrado

El cilindrado para confeccionar un cilindro es idéntico al del cono y se muestra en la siguiente figura.

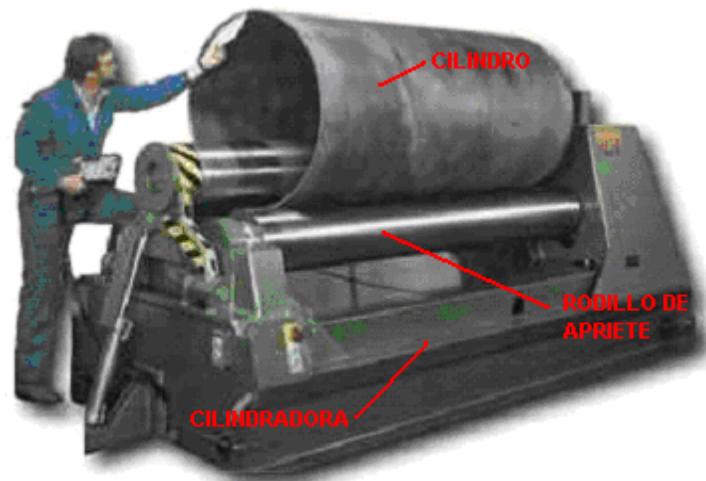


Fig. 32 Máquina cilindradora confeccionando un cilindro

Una vez finalizado el proceso de cilindrado, se procede a emplantar las planchas, es decir, se forman las partes correspondientes y se “pinchan” (ver imagen 33), en la posición en que deberían quedar, para posteriormente, ser “rematadas”, cuando el conjunto de piezas este listo y se haya cerciorado que calcen en forma adecuada.

La siguiente fotografía muestra planchaje del interior de un ciclón en el se puede apreciar el emplantillado de las planchas que solo se “pinchan”, para posteriormente mostrar el mismo planchaje rematado, (ver imagen 34)



Fig. 33 Muestra planchaje emplantillado dentro de un ciclón



Fig. 34 Muestra planchaje rematado dentro del ciclón

Las siguientes fotografías muestran la confección del ciclón en maestranza.



Fig. 35 Muestra la construcción de un ciclón

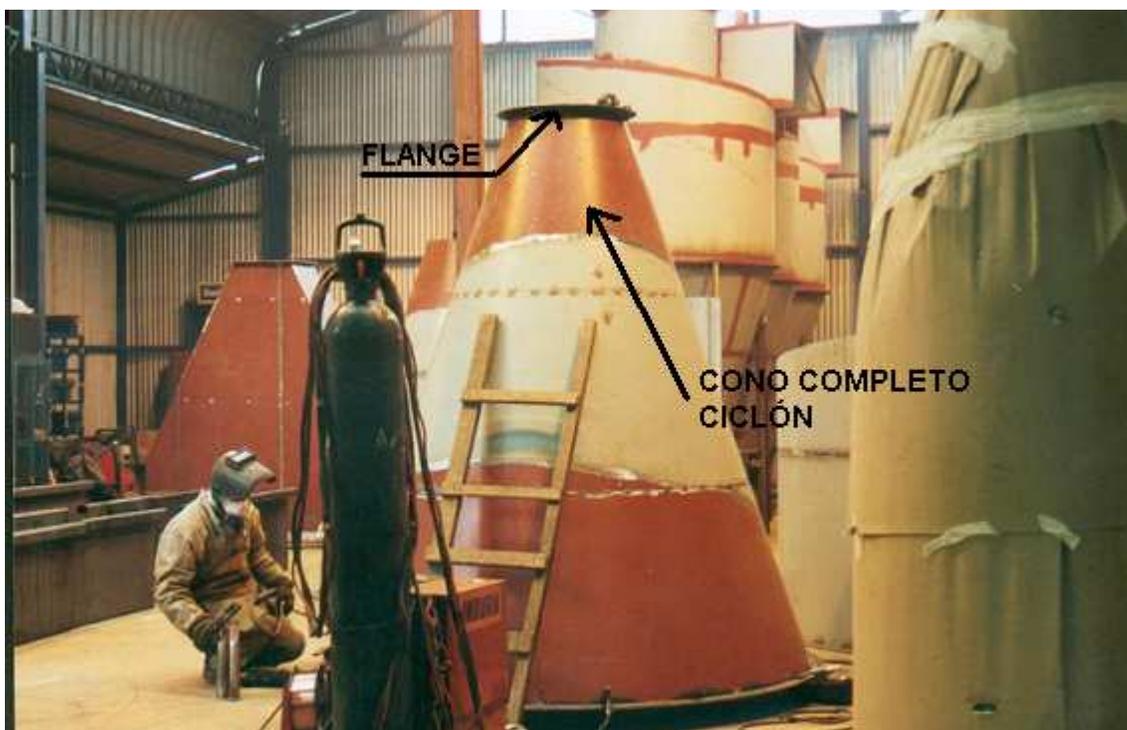


Fig. 36 Muestra el cono completo de un ciclón, para posteriormente añadirle su cuerpo cilíndrico.

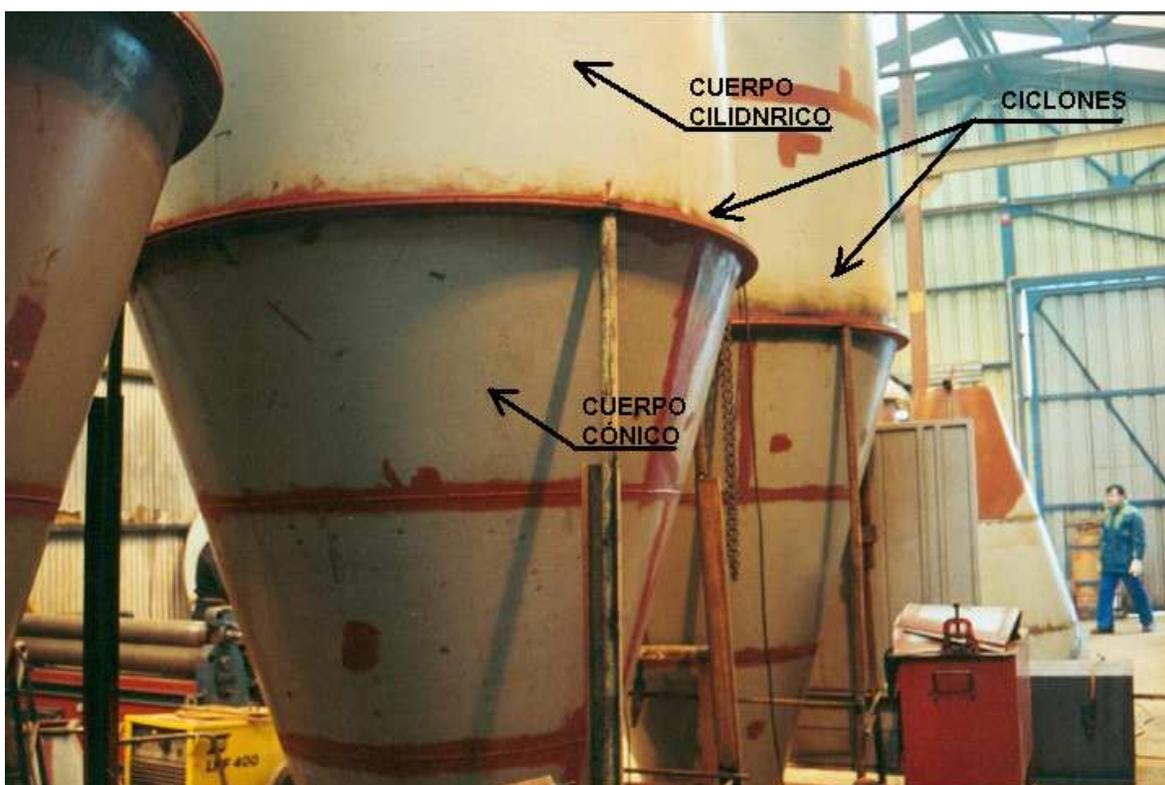


Fig. 37 Muestra el ciclón con su cono y cuerpo cilíndrico

Las figuras siguientes muestran el montaje ciclonos en plantas de procesos.



Fig. 38 Ciclonos montados en una planta

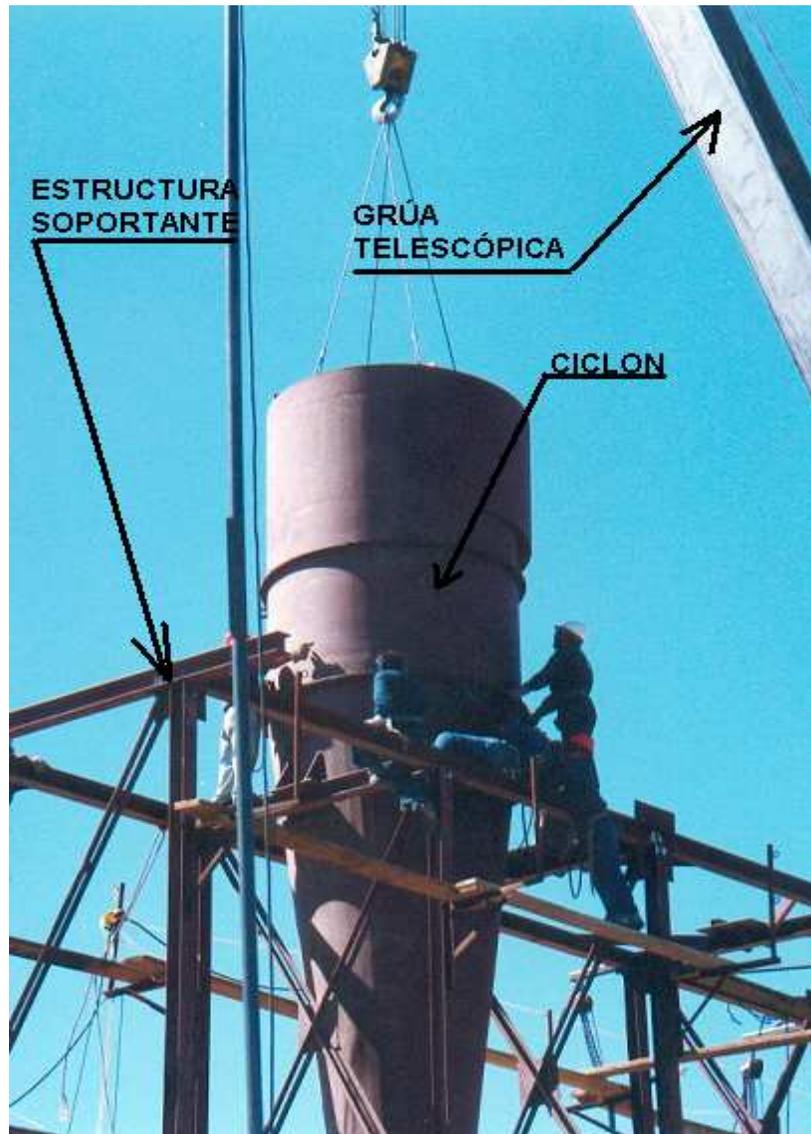


Fig. 39 Muestra montaje de ciclón en estructura soportante

## 4.2 USOS DENTRO DE LA INDUSTRIA NAVAL.

Dentro de los variados usos que he encontrado factibles de incluir ciclones, por sus características mencionadas en esta tesis puedo nombrar:

4.2.1.- En instalaciones donde se realicen procesos de soldadura, en que se incluya dispositivos de extracción localizada, basada en la aspiración y a su vez estas estén conectadas a filtros de separación, siendo estos ciclones, con dimensiones propias de acuerdo a las partículas que se requiere separar, con esto se conseguiría reducir la ducteria en lugares donde para llegar al exterior fuese necesario una gran cantidad de estos ductos, siendo para este caso el ciclón una solución ideal, de extracción, una medida de protección ambiental que impide eficazmente la liberación de gases y sustancias procedentes del material de soldadura y de los fundentes. Esta técnica también es aplicable para reducir el impacto ambiental originado por fases de producción.

4.2.2.- En procesos productivos en que exista arranque de virutas (amolado), como podría ser en astilleros donde exista construcción de naves en madera, en estos procesos sus características distintivas que originan riesgo para la salud, tienen que ver principalmente, con emisiones de polvo o partículas de abrasión desprendidas de elementos mecánicos, como podría ser el proceso de esmerilado. En las siguientes tablas se presentan las potenciales fuentes de materias nocivas durante el esmerilado de materiales metálicos.

Riesgos derivados del material	Riesgos derivados del proceso
Dispositivo de amolar:	Formación de polvo fino al:
<ul style="list-style-type: none"> <li>- sustancia abrasiva con contenido en circón</li> <li>- cloruro de plomo, sulfuro de antimonio en tronzadoras de muela estacionarias</li> <li>- aditivos fluorados en las cintas de esmerilado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- perfilar y ajustar muelas abrasivas</li> <li>- afilar herramientas</li> <li>- rebabar piezas de colada</li> <li>- esmerilar a mano, donde generalmente se trabaja sin aspiración del aire</li> </ul>
Sustancias lubricantes refrigerantes: <ul style="list-style-type: none"> <li>- aditivos (toxicidad, potencial carcinógeno y posibles reacciones entre diversas sustancias)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- desbastar</li> <li>- aplicar enlaces de magnesita</li> </ul>
Materiales con contenido de: <ul style="list-style-type: none"> <li>- más del 80% en peso de níquel (p. Ej.,</li> </ul>	Desprendimiento de productos de combustión y de pirólisis, que pueden

<p>en el caso de materiales soldados)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- menos del 80% en peso de níquel (p. ej. acero de alta norma, resistente a la corrosión)</li> </ul>	<p>originarse en la descomposición térmica de compuestos de caucho o resinas sintéticas.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- plomo (p. Ej. en acero para tornos automáticos)</li> <li>- cobalto (p. Ej. metal duro, aleaciones de Co)</li> <li>- berilio (p. Ej. aleaciones de Ni y Be)</li> </ul>	<p>Acumulación de metales pesados y partículas ultrafinas en las sustancias lubricantes refrigerantes, ya sea por filtrado insuficiente o empleo prolongado.</p>
	<p>Atomización de la sustancia lubricante y con ello formación de nieblas de aditivos, productos de reacción, metales pesados disueltos y partículas ultrafinas no eliminadas</p>

4.2.3.- Sin lugar a dudas de que los sistemas de transporte neumático son los métodos más confiables y eficientes en el manejo de una amplia gama de materiales sólidos a granel, es por eso que se podría incluir en procesos de estiba y desestiba un transporte neumático, en reemplazo de las usualmente utilizadas cintas transportadoras, en este proceso el material inyectado neumáticamente pasaría a través de tubos, de acero carbono sin costura, o con su respectiva costura hacia arriba, sin que esta costura entre en contacto con el material, para reducir a electricidad estática, llegando a un ciclón que decantaría en una tolva de recepción, donde se distribuiría a las bodegas del buque.

4.2.4.- En procesos de arenado, en lugares con poca ventilación o espacios reducidos, donde se requiera una rápida extracción de material particulado, que se encuentra suspendido en el ambiente.

4.2.5.- Implementación en buques que transporten carga a granel, como podrían ser buques de carbón, metales, o salitre, cuando se deba realizar algún traslado en forma neumática de este material desde diferentes compartimentos del buque, minimizando con esto la contaminación ocasionada por éstos procesos, guardando como precaución y teniendo como principal problema el material particulado inferior a 2 micras, pues este material no es captado eficazmente por los ciclones, debiendo implementarse un sistema de filtración, a continuación del ciclón este sistema de uso generalizado y de gran rendimiento, cercano al 99% consiste en colocar un ciclón que capte el material "mas grueso", es decir, el

material que sale en conjunto con el aire por la chimenea, en ese momento la mezcla de aire con material particulado microscópico, entrará en un filtro tipo manga, que a continuación se detallará.

#### **4.2.5.1 Características de los filtros manga**

Los filtros de mangas son considerados como los equipos más representativos de la separación sólido-gas mediante un medio poroso. Su función consiste en recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa, esto se consigue haciendo pasar dicha corriente a través de un tejido.

El tamaño de las partículas a separar por los filtros de mangas será entre 2 y 30  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, no es usual disponer de medios filtrantes con poros tan pequeños como para retener las partículas que transporta el gas, debido a que los diámetros de éstas son extraordinariamente pequeños. Por tanto la filtración no comienza a efectuarse de manera efectiva hasta que no se han acumulado una cierta cantidad de partículas sobre la superficie de la bolsa en forma de torta filtrante.

Así puede decirse que el sistema de filtración que se da en los filtros de mangas es análogo al de los filtros por torta, donde el medio filtrante actúa únicamente como soporte de la torta y es ésta la que realiza realmente la operación.

Los filtros de mangas constan de una serie de bolsas con forma de mangas, normalmente de fibra sintética o natural, colocadas en unos soportes para darles consistencia y encerrados en una carcasa de forma y dimensiones muy similares a las de una casa. El gas sucio, al entrar al equipo, fluye por el espacio que está debajo de la placa a la que se encuentran sujetas las mangas y hacia arriba para introducirse en las mangas. A continuación el gas fluye hacia afuera de las mangas dejando atrás los sólidos. El gas limpio fluye por el espacio exterior de los sacos y se lleva por una serie de conductos hacia la chimenea de escape.

Contienen además una serie de paneles para redireccionar el aire, dispositivos para la limpieza de las mangas y una tolva para recoger las partículas captadas.

La eliminación de polvo o de las pequeñas gotas que arrastra un gas puede ser necesaria bien por motivos de contaminación, para acondicionar las características de un gas a las tolerables para su vertido a la atmósfera, bien como necesidad de un proceso para depurar una corriente gaseosa intermedia en un proceso de fabricación. En ocasiones el condicionante de la separación será un

factor de seguridad, ya que algunos productos en estado de partículas muy finas forman mezclas explosivas con el aire.

#### **4.2.5.2 Aplicaciones**

Los filtros de mangas aparecen en todos aquellos procesos en los que sea necesaria la eliminación de partículas sólidas de una corriente gaseosa.

Los filtros de mangas son capaces de recoger altas cargas de partículas resultantes de procesos industriales de muy diversos sectores, tales como: cemento, yeso, cerámica, caucho, química, petroquímica, siderúrgica, automovilística, cal, minera, amianto, aluminio, hierro, coque, silicatos, almidón, carbón, anilina, fibras de granos, etc.

La recogida de polvo o eliminación de partículas dispersas en gases se efectúa para finalidades tan diversas como:

1.- Control de la contaminación del aire; como la eliminación de cenizas volantes de los gases de escape en una central eléctrica.

2.- Reducción del coste de mantenimiento de los equipos; como la filtración de la toma de aire de un motor o el tratamiento del gas de tostación de piritas previo a su entrada a una planta de ácido sulfúrico.

3.- Eliminación de peligros para la salud o para la seguridad; como la recogida de polvos silíceos y metálicos resultantes de equipos de molienda y trituración y en algunas operaciones metalúrgicas y en el ensacado.

4.- Mejora de la calidad del producto; como la limpieza del aire para la producción de productos farmacéuticos o de película fotográfica.

5.- Recuperación de productos valiosos; como la recogida de partículas procedentes de secadores y hornos de tostación.

6.- Recogida de productos en polvo; aplicado a casos como en el transporte neumático.

#### 4.2.5.3 Tipos

La característica principal que diferencia unos tipos de filtros de mangas de otros es la forma en que se lleve a cabo su limpieza. Esto además condiciona que los filtros sean continuos o discontinuos.

- continuos: la limpieza se realiza sin que cese el paso del aire por el filtro
- discontinuos: es necesario aislar temporalmente la bolsa de la corriente de aire.

Según este criterio, se tienen tres tipos principales de filtros de mangas:

- **Por sacudida:** se realiza cuando existe la posibilidad de suspender el servicio del filtro durante un corto periodo de tiempo. Por tanto, exige un funcionamiento discontinuo con un ciclo de filtración y otro de limpieza. El tipo más barato y sencillo consiste en un cierto número de bolsas reunidas en el interior de una carcasa. Funciona con una velocidad aproximada de 0,01 m/s a través de la bolsa filtrante. La limpieza se puede llevar a cabo manualmente para unidades pequeñas.

Existe también una versión más complicada y robusta que incluye un mecanismo automático de agitación para la limpieza de las telas que puede funcionar por métodos mecánicos, vibratorios o de pulsación. Las bolsas están sujetas a un soporte mecánico conectado a un sistema capaz de emitir sacudidas o vibraciones mediante un motor eléctrico. Al ser el tejido más grueso, se pueden utilizar velocidades frontales más elevadas, de hasta 0,02 m/s, y permite el funcionamiento en condiciones más severas que las admisibles en el caso anterior.

- **por sacudida y aire inverso:** Se emplea para conseguir un funcionamiento en continuo, para ello los elementos filtrantes deben encontrarse distribuidos entre dos o más cámaras independientes, cada una de las cuales dispone de su propio sistema de sacudida y de una entrada de aire limpio. El aire entra en las mangas en sentido contrario por medio de un ventilador que fuerza el flujo, de fuera a dentro, lo que favorece la separación de la torta.

- **por aire inverso:** existen muchos dispositivos diferentes pero el mecanismo habitual de limpieza consiste en la introducción, en contracorriente y durante un breve periodo de tiempo de un chorro de aire a alta presión mediante una tobera conectada a una red de aire comprimido. La velocidad frontal alcanza aproximadamente 0,05 m/s y es posible tratar altas concentraciones de polvo con

elevadas eficacias. Mediante este tipo de filtro se pueden tratar mezclas de difícil separación en una unidad compacta y económica. Este mecanismo de limpieza se denomina también de chorros pulsantes o 'jet pulse' y es más eficaz que las anteriores.

Para seleccionar el tipo de manga necesaria se debe tener en cuenta que debe cumplir una serie de condiciones como:

- ser resistente química y térmicamente al polvo y al gas
- que la torta se desprenda fácilmente
- que la manga recoja el polvo de manera eficiente
- que sea resistente a la abrasión ocasionada por el polvo
- el caudal y la velocidad del gas.

#### **4.2.5.4 Funcionamiento**

La separación del sólido se efectúa haciendo pasar el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador, a través de la tela que forma la bolsa, de esa forma las partículas quedan retenidas entre los intersticios de la tela formando una torta filtrante. De esta manera la torta va engrosando con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema. Para evitar disminuciones en el caudal se procede a efectuar una limpieza periódica de las mangas.

#### **4.2.5.5 Operación de filtración**

- Una corriente de gas cargado de polvo entra al equipo, choca contra una serie de paneles y se divide en varias corrientes.
- Las partículas más gruesas se depositan directamente en el fondo de la tolva cuando chocan contra dichos paneles.
- Las partículas finas se depositan en la superficie del tejido cuando el gas pasa a través de la bolsa.
- Una vez que el gas ha sido filtrado, éste fluye (ya limpio) a través de la salida y se descarga a la atmósfera por medio de un ventilador.

## ESQUEMA FUNCIONAL

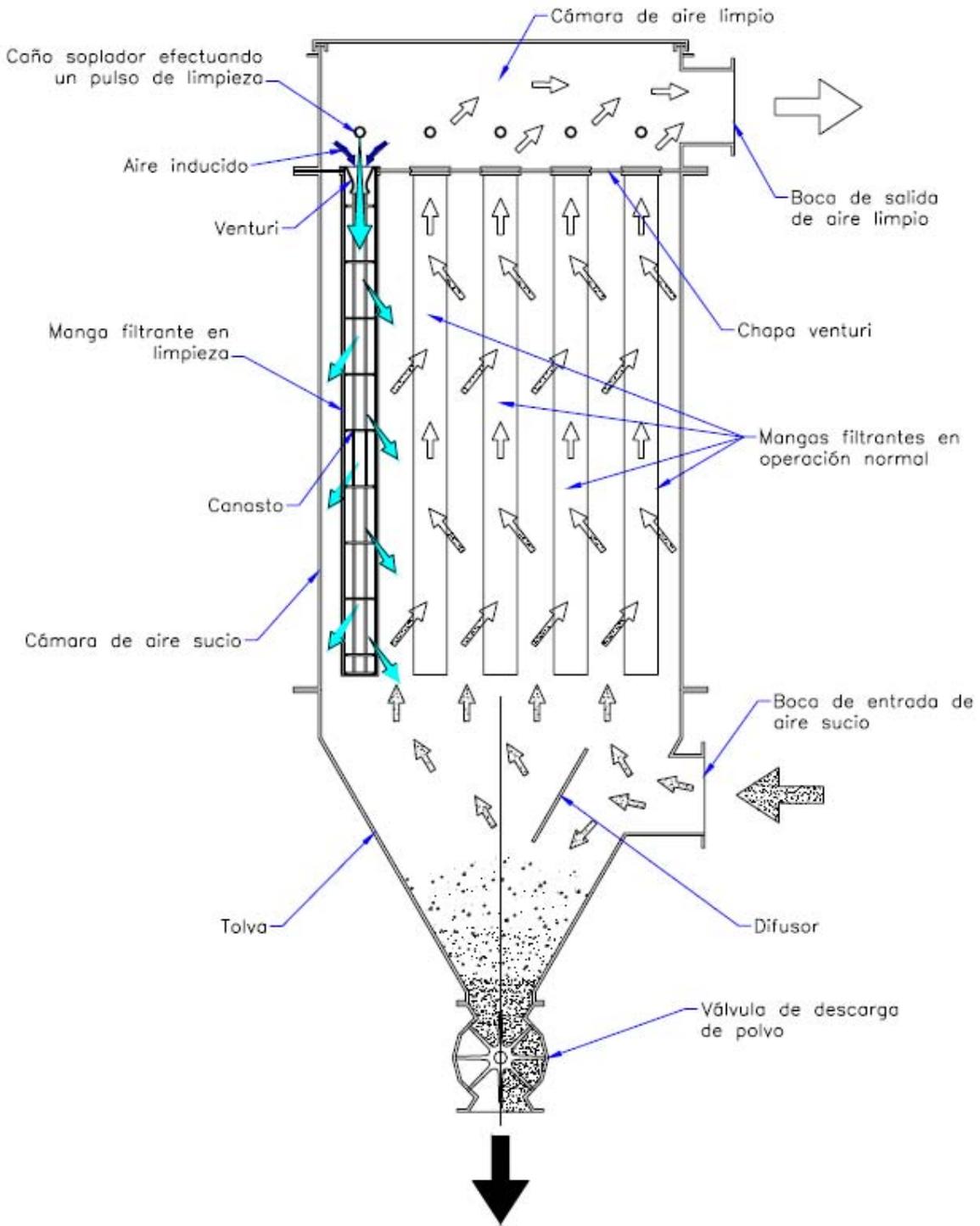


Fig. 40 Muestra el esquema funcional de un filtro de manga

#### 4.2.5.6 Operación de limpieza

- Las partículas depositadas en la superficie de la bolsa se sacuden durante un breve periodo de tiempo por medio de aire comprimido inyectado desde una tobera hacia la bolsa, o bien de manera mecánica.
- El chorro de propulsión actúa periódicamente mediante un controlador automático de secuencia.
- El polvo recogido en el fondo de la tolva se descarga mediante un transportador de tornillo helicoidal y una válvula rotativa.

La limpieza de las mangas no es completa en ningún caso debido a la dificultad para desprender la torta en su totalidad y también porque, si se aplicaran procedimientos más vigorosos de limpieza, el desgaste de las mangas sería mayor y se provocaría un mayor número de paradas de planta motivadas por el cambio de las mangas.

La eficacia del filtro será baja hasta que se forme sobre la superficie del tejido filtrante una capa que constituye el medio filtrante para la separación de partículas finas.

Una vez superada la fase inicial, los filtros de mangas son equipos muy eficientes (sus eficacias sobrepasan con frecuencia el 99,9%), con lo que su aplicación en la industria es cada vez mayor.

La limitación más importante que se da en los filtros de mangas es la debida a la temperatura, ya que se debe tener en cuenta el material del que está constituida la tela para conocer la temperatura máxima que se puede aplicar.

Así para fibras naturales la temperatura máxima a aplicar es alrededor de 90°C. Los mayores avances dentro de este campo se han dado en el desarrollo de telas hechas a base de vidrio y fibras sintéticas, que han aumentado la temperatura máxima aplicable hasta rangos de 230 a 260 °C.

Otros factores que pueden afectar a la operación del filtro de mangas son el punto de rocío y el contenido de humedad del gas, la distribución del tamaño de las partículas y su composición química.

#### 4.2.5.7 Cálculo

Los dos parámetros fundamentales a considerar en el diseño de un filtro de mangas son la velocidad del gas y la pérdida de carga. La velocidad del gas es bastante reducida, por lo que se considera flujo laminar, y se puede aplicar la ecuación de Darcy para calcular la velocidad de circulación del gas.

$$V = (K/\mu) * \Delta P / \Delta X$$

Donde k es la permeabilidad del material filtrante, que en la mayoría de los casos se determina de manera experimental.

$\mu$  = Densidad del gas

La velocidad a la que los gases pasan por la tela debe ser baja, normalmente entre 0,005 y 0,03 m/s, para evitar una excesiva compactación de la torta de sólidos con la consiguiente elevación de la pérdida de carga, o para impedir la rotura local del lecho filtrante que permitiría el paso de partículas grandes a través del filtro.

Para mantener una velocidad aproximadamente constante es evidente que se debe aumentar la presión a medida que aumenta el espesor de la torta. Para realizar esta función de aumento de la presión se dispone de un ventilador o una soplante, que se encargará de impulsar el gas.

Normalmente la resistencia del material filtrante es despreciable en comparación con la de la torta de modo que el volumen del gas procesado resulta proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de filtración.

A la hora de determinar la capacidad de un filtro de mangas se debe tener en cuenta:

- la cantidad de gas a tratar.
- si se van a disponer varios equipos en paralelo (práctica de extensa aplicación por su utilidad).
- si va a haber algún equipo parado durante el proceso (en operación de limpieza, por ejemplo).



Fig. 41 Muestra un ciclón trabajando en conjunto con un filtro de manga



Fig. 42 Muestra un filtro de manga.

## ESQUEMA ISOMÉTRICO

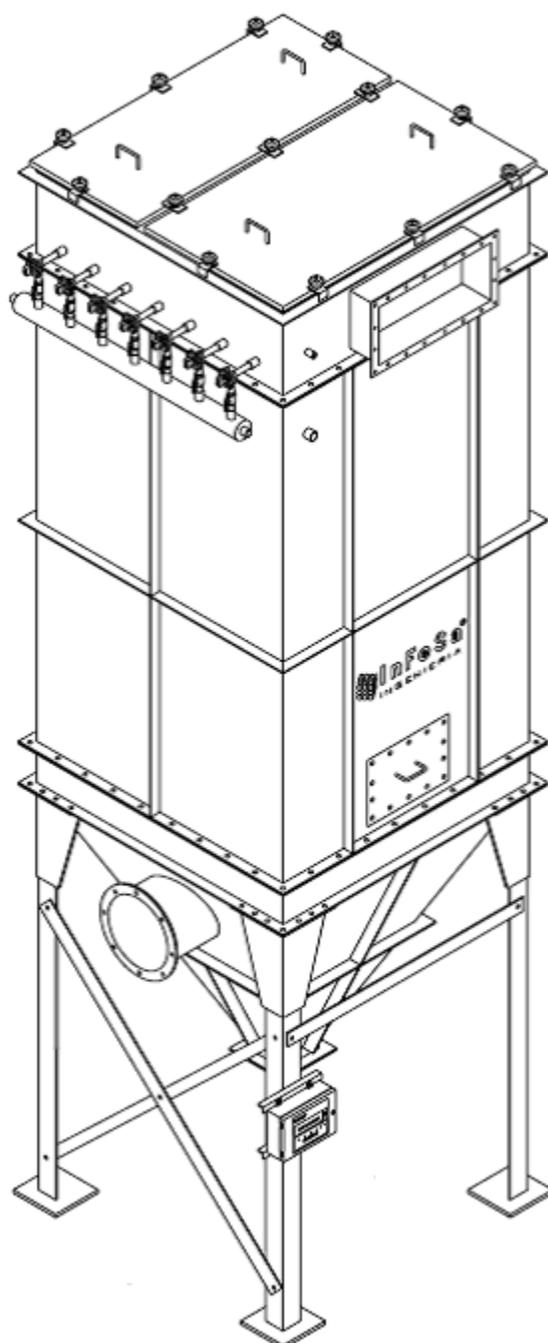


Fig. 43 Muestra una vista en isométrica de la forma de un filtro tipo manga

## CONCLUSIÓN

Sin lugar a dudas los ciclones podrían ser de gran utilidad en el área naval, ya que actualmente su uso está delimitado meramente al rubro de procesos industriales, procesos químicos, alimentación y control de la polución, siendo este último fácilmente abordable en los buques, como una especie de “filtro” de gases remanentes de combustión y otros procesos, que van dirigidos al medio ambiente.

También se pueden usar estos ciclones en lo que se refiere a la separación de aire y algún tipo de fluido, como podría utilizarse en los sistemas de aire comprimido dentro de un buque, otra utilidad que se ve con claridad, sería la de cambiar los métodos de estiba y desestiba de carga a granel, en los cuales generalmente se usa una cinta transportadora y esta es cargada por medios lentos, desgastantes y caros, como son grúas, cargadores frontales etc. Cambiar este sistema de estiba y desestiba, por un sistema en que se incluya una manga y se mueva la carga a granel por medio de una inyección neumática, en que llegue a un ciclón y caiga en alguno de los medio nombrados en esta tesis, sería una excelente alternativa, con esto se reducirían considerablemente los costos de mantenimiento, y se disminuirían los tiempos de estadía en puerto, haciendo estos procesos muchos más eficientes.

Otra cosa importante de destacar es que si se desea una eficiencia alta en la separación y control de material particulado microscópico, sería recomendable usar un ciclón como pre-filtro, dada sus características de diseño y bajo precio, para posteriormente ser utilizado un filtro tipo manga el cual presenta un costo mucho más elevado, y su función presenta mayor delicadeza y mantenimiento.

**BIBLIOGRAFÍA**

Vatavuk, M.W.; *Air Pollution Control – Escalate Equipment Costs*, Chemical Engineering, 194-203 (1995).

Zenz, F. A.; *Cyclone design tips*, Chemical Engineering, 60–64 (2001).

Manual de soldadura de Indura.

Catálogo de aceros Kupfer.

Ley 19300 Bases Generales del medio ambiente.

Decreto supremo 594.

Control de la contaminación atmosférica por C. D. Cooper y F.C. Callejón, 1986)

- Solid, Liquid Separation Equipmen.

Prof. Dr. H. Trawinsky. Chapter 7. Hydrocyclones

Evaluación y manejo en una planta productora de plomo  
Coronel Ramirez, Jhonny Jeffry y Graefling Alva, Wilfred.

Algunas de las páginas web consultadas

[www.Soler&palau.com](http://www.Soler&palau.com)

[www.mailmix.com](http://www.mailmix.com)

[www.airjet.com.ar](http://www.airjet.com.ar)

[www.redalyc.uaemex.mx](http://www.redalyc.uaemex.mx)

[www.monorafias.com](http://www.monorafias.com)

[www.diquima.upm.es](http://www.diquima.upm.es)

[www.scielo.org.ve](http://www.scielo.org.ve)

[www.ingenieroambiental.com](http://www.ingenieroambiental.com)

[www.lenntech.com](http://www.lenntech.com).

[www.quiminet.com](http://www.quiminet.com)

[www.lapsolite.com](http://www.lapsolite.com)

[www.engineeringfundamentals.com](http://www.engineeringfundamentals.com)

[www.portaldelaindustria.com](http://www.portaldelaindustria.com)

**ANEXO I****NORMATIVA LEGAL SOBRE CONTAMINACION POR MATERIAL PARTICULADO****Decreto Supremo 594 (extracto).**

## TITULO III

## De las Condiciones Ambientales

## PARRAFO I

## De la Ventilación

Artículo 32. Todo lugar de trabajo deberá mantener, por medios naturales o artificiales, una ventilación que contribuya a proporcionar condiciones ambientales confortables y que no causen molestias o perjudiquen la salud del trabajador.

Artículo 33. Cuando existan agentes definidos de contaminación ambiental que pudieran ser perjudiciales para la salud del trabajador, tales como aerosoles, humos, gases, vapores u otras emanaciones nocivas, se deberá captar los contaminantes desprendidos en su origen e impedir su dispersión por el local de trabajo. Con todo, cualquiera sea el procedimiento de ventilación empleado se deberá evitar que la concentración ambiental de tales contaminantes dentro del recinto de trabajo exceda los límites permisibles vigentes.

Artículo 34. Los locales de trabajo se diseñarán de forma que por cada trabajador se provea un volumen de 10 metros cúbicos, como mínimo, salvo que se justifique una renovación adecuada del aire por medios mecánicos. En este caso deberán recibir aire fresco y limpio a razón de 20 metros cúbicos por hora y por persona o una cantidad tal que provean 6 cambios por hora, como mínimo, pudiéndose alcanzar hasta los 60 cambios por hora, según sean las condiciones ambientales existentes, o en razón de la magnitud de la concentración de los contaminantes.

Artículo 35. Los sistemas de ventilación empleados deberán proveer aberturas convenientemente distribuidas que permitan la entrada de aire fresco en reemplazo del extraído. La circulación del aire estará condicionada de tal modo que en las áreas ocupadas por los trabajadores la velocidad no exceda de un metro por segundo.

TITULO IV  
De la Contaminación Ambiental  
PARRAFO I  
Disposiciones Generales

Artículo 55.- Los límites permisibles de aquellos agentes químicos y físicos capaces de provocar efectos adversos en el trabajador serán, en todo lugar de trabajo, los que resulten de la aplicación de los artículos siguientes.

Artículo 56.- Los límites permisibles para sustancias químicas y agentes físicos son índices de referencia del riesgo ocupacional.

Artículo 57.- En el caso en que una medición representativa de las concentraciones de sustancias contaminantes existentes en el ambiente de trabajo o de la exposición a agentes físicos, demuestre que han sido sobrepasados los valores que se establecen como límites permisibles, el empleador deberá iniciar de inmediato las acciones necesarias para controlar el riesgo, sea en su origen, o bien, proporcionando protección adecuada al trabajador expuesto. En cualquier caso el empleador será responsable de evitar que los trabajadores realicen su trabajo en condiciones de riesgo para su salud.

Artículo 58.- Se prohíbe la realización de trabajos, sin la protección personal correspondiente, en ambientes en que la atmósfera contenga menos de 18% de oxígeno.

PARRAFO II  
De los Contaminantes Químicos

Artículo 59.- Para los efectos de este reglamento se entenderá por:

a) Límite Permisible: Valor máximo permitido para el Ponderado promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos existente en los lugares de trabajo durante la jornada normal de 8 horas diarias, con un total de 48 horas semanales.

b) Límite Permisible Temporal: Valor máximo permitido para el promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos en los

lugares de trabajo, medidas en un período de 15 minutos continuos dentro de la jornada de trabajo. Este límite no podrá ser excedido en ningún momento de la jornada.

c) Límite Permisible Absoluto: Valor máximo permitido para las concentraciones ambientales de contaminantes químicos medida en cualquier momento de la jornada de trabajo.

Artículo 60.- El promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos no deberá superar los límites permisibles ponderados (LPP) establecidos en el artículo 66 del presente Reglamento. Se podrán exceder momentáneamente estos límites, pero en ningún caso superar cinco veces su valor. Con todo, respecto de aquellas sustancias para las cuales se establece además un límite permisible temporal (LPT), tales excesos no podrán superar estos límites. Tanto los excesos de los límites permisibles ponderados, como la exposición a límites permisibles temporales, no podrán repetirse más de cuatro veces en la jornada diaria, ni más de una vez en una hora.

Artículo 61.- Las concentraciones ambientales de las sustancias capaces de causar rápidamente efectos narcóticos, cáusticos o tóxicos, de carácter grave o fatal, no podrán exceder en ningún momento los límites permisibles absolutos siguientes:

Sustancia	Límite Permisible Absoluto		Observaciones
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Ácido Bromhídrico	3	9,9	-
Ácido Cianhídrico (expresado como CN)	4,7	5	Piel
Ácido Clorhídrico	5	6	-
Ácido Fluorhídrico (expresado como F)	3	2,3	-
Alcohol n-Butílico	50	152	Piel
Cianuros (expresado como CN)	4,7	5	Piel
Etilenglicol, Aerosol de	40	100	A.4
Formaldehido	0,3	0,37	A.2
Glutaraldehido	0,05	0,2	A.4
Hidróxido de Potasio	-	2	-
Hidróxido de Sodio	-	2	-
Isoforona	5	28	A.3
Peróxido de metil etil cetona	0,2	1,5	-
Triclorofluorometano (FREON 11)	1000	5620	-
Yodo	0,1	1	-

Artículo 62º. Cuando la jornada de trabajo habitual sobrepase las 48 horas semanales, el efecto de la mayor dosis de tóxico que recibe el trabajador unida a la reducción del período de recuperación durante el descanso, se compensará multiplicando los límites permisibles ponderados del artículo 66º por el factor de reducción "Fj" que resulte de la aplicación de la fórmula siguiente, en que "h" será el número de horas trabajadas semanalmente:

$$F_j = \frac{48}{h} \times \frac{168 - h}{120}$$

Artículo 63º. Cuando los lugares de trabajo se encuentran a una altura superior a 1.000 metros sobre el nivel del mar, los límites permisibles absolutos, ponderados y temporales expresados en mg/m<sup>3</sup> y en fibras/cc, establecidos en los artículos 61 y 66 del presente reglamento, se deberán multiplicar por el factor "Fa" que resulta de la aplicación de la fórmula siguiente, en que "P" será la presión atmosférica local medida en milímetros de mercurio:

$$F_a = \frac{P}{760}$$

Artículo 64º. En lugares de trabajo en altura y con jornada mayor de 48 horas semanales se corregirá el límite permisible ponderado multiplicándolo sucesivamente por cada uno de los factores definidos en los artículos 62 y 63, respectivamente. Los límites permisibles temporales y absolutos se ajustarán aplicando solamente el factor "Fa" del artículo 63.

Artículo 65º. Prohíbese el uso en los lugares de trabajo de las sustancias que se indican a continuación, con excepción de los casos calificados por la autoridad sanitaria.

- Aldrín
- Bencina o Gasolina para vehículos motorizados en cualquier uso distinto de la combustión en los motores respectivos.
- Benzidina
- Beta - Naftilamina
- Beta - Propiolactona
- Clorometil Metiléter

- Dibromocloropropano
- Dibromo Etileno
- Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)
- Dieldrín
- Dimetilnitrosamina (N - Nitrosodimetilamina)
- Endrín
- 2-4-5T
- 4 - Nitro Difenilo
- 4 - Amino Difenilo (para - Xenilamina)

Artículo 66º: Los límites permisibles ponderados y temporales para las concentraciones ambientales de las sustancias que se indican, serán los siguientes:

Sustancia	Limite Permisible Ponderado		Limite Permisible Temporal		Observs.
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Acetato de n-Amilo	80	425			
Acetato de sec-Amilo	100	532			
Acetato de n-Butilo	120	570	200	950	
Acetato de sec-Butilo	160	760			
Acetato de ter-Butilo	160	760			
Acetato de Cellosolve	4	22			Piel
Acetato de Etilo	320	1150			
Acetato de Isoamilo	80	424			
Acetato de Isobutilo	120	570			
Acetato de Isopropilo	200	830	310	1290	
Acetato de Metilcellosolve	4	19			Piel
Acetato de Metilo	160	485	250	757	
Acetato de n-Propilo	160	668	250	1040	
Acetona	600	1424	1001	2380	A.4
Ácido Acético	8	20	15	37	
Ácido Crómico y Cromatos (expresado como Cr)		0,04			A.1
Ácido Fórmico	4	7,5	10	19	
Ácido Nítrico	1,6	4,2	4	10	

Sustancia	Límite Permisible Ponderado		Límite Permisible Temporal		Observs.
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Ácido Pírico		0,08			
Ácido Sulhídrico	8	11,2	15	21	
Ácido Sulfúrico		0,8		3	
Aguarrás Mineral (Varsol)	240	1100			
Aguarrás Vegetal (Tremantina)	80	445			
Alcohol Etilico	800	1500			
Alcohol Isobutilico	40	122			
Alcohol Isopropilico	320	786	500	1230	
Alcohol Metilico	160	210	250	328	Piel (1)
Algodón crudo		0,16			A.1
Alquitrán de hulla, humos de (expres. como solubles en benceno)		0,16			
Aluminio, polvo metálico		8			
Aluminio, humos de soldad. (expresado como Al)		4			
Aluminio, polvo protécnico (expresado como Al)		4			
Aluminio, sales solubles y compuestos alquílicos (expresado como Al)		1,6			
Amoniaco	20	14	35	24	
Anhidrido Carbónico	4000	7200	30000	54000	
Anhidrido Ftálico	0,8	4,9			
Anhidrido Sulfuroso	1,6	4	5	13	
Anilina y homólogos	1,6	6			Piel-A3
Antimonio		0,4			
Arsénico y comp. sol. (expresado como As)		0,16			A.1
Arsina (Hidrógeno Arseniado)	0,04	0,13			
Asbesto azul - Crocidolita	0,16	fibras/cc			A.1 (2)
Asbesto pardo - Amosita	0,4	fibras/cc			A.1 (2)
Asbesto - Crisotilo	1,6	fibras/cc			A.1 (2)
Asbesto - Otros tipos	1,6	fibras/cc			A.1 (2)
Asfalto (deriv. Petróleo), Humos		4			
Atrazna		4			
Bario - Comp. Solubles (expresado como Ba)		0,4			
Baritina - Sulfato de Bario		8			(3)
Benceno	8	26	40	130	Piel-A.1
Bencina Blanca	240	712	500	1480	
Benomyl	0,67	8			
Bis - Cloro - Metil Eter	0,0008	0,004			A.1
Bromo	0,08	0,53	0,2	1,3	
Bromuro de Metilo	4	15			Piel-A.4
2 Butanona (Metil Etil Cetona)	160	472	300	885	
Butil Cellosolve (2 - Butoxietanol)	20	97			Piel
2 - Butoxietanol (Butil Cellosolve)	20	97			Piel
Cadmio (expresado como cadmio)		0,04			A.2-(3)
Cal viva (Oxido de Calcio)		1,6			
Captan		4			
Carbaryl		4			
Carbofurano		0,08			

Sustancia	Límite Permisible Ponderado		Límite Permisible Temporal		Observs.
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Carbón de retorta grafitico		1,6			(4)
Carbón bituminoso					
<5% Cuarzo		1,6			(4)
Carbonato de Calcio (Calza)		8			(3)
Cellosolve (2 - Etoxietanol)	4	14			Piel
Celulosa - fibra papel		8			
Cemento Portland		8			(3)
Cereales - Polvo de Granos		3,2			
Cianamida Cálcica		0,4			
Ciclohexano	240	820			
Ciclohexanol	40	160			Piel
Ciclohexanona	20	80			Piel
Cloro	0,4	1,2	1	2,9	
Cloroformo	8	40			A.2
Clorpirifos		0,16			Piel
Cloruro de Metileno	40	140			A.2
Cloruro de Vinilo	4	10			A.1
Cobalto		0,016			A.3
Cobre - Humos		0,16			
Cobre - Polvo y nieblas (expresado como Cu)		0,8			
Cristobalita		0,04			(4)
Cromo, metal y comp. di y trivalentes		0,4			A.4
Cromo, compuestos hexavalentes solubles		0,04			A.1
Cromo, compuestos hexavalentes insolubles		0,008			A.1
Cuarzo (silice cristalizada)		0,08			(4)
Cumeno (Isopropilbenceno)	40	200			Piel
Diazinon		0,08			Piel
2-4-D		8			
Diclorodifluoro metano (Freón 12)	800	4000			
Diclorvos	0,08	0,72			Piel
Diethyléter (Eter Etilico)	320	970	500	1520	
Diisocianato de Difenilmetano (MDI)	0,004	0,04			
Dinitrobenzono	0,12	0,8			Piel
Dinitro - O - Cresol		0,16			Piel
Dinitro Tolueno		1,2			Piel-A.3
Dióxido de Cloro	0,08	0,22	0,3	0,83	
Dióxido de Nitrógeno	2,4	4,5	5	9,4	
Disurón		8			
Estaño - Metal y comp. inorgánicos		1,6			
Estaño - comp. orgánicos		0,08		0,2	Piel
Estireno (monómero) - (Vinilbenceno)	40	170	100	425	Piel-A.4
Eter Etilico (Diethyléter)	320	970	500	1520	
Etilbenceno	80	348	125	543	
Etil Mercaptano	0,4	1			
2 - Etoxietanol (Cellosolve)	4	14			Piel
Fenol	4	15			Piel

Sustancia	Limite Permisible Ponderado		Limite Permisible Temporal		Observs.
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Ferbam		8			
Fibra de vidrio	0,8	8 fibras /cc			(2)
Flúor	0,8	1,3	2	3,1	
Fluoruros (Expresado como F)		2			
Fosfina (Hidrógeno Fosforado)	0,24	0,34	1	1,4	
Ftalato de dibutilo		4			
Ftalato de dietilo		4			
Ftalato de dimetilo		4			
Gas Licuado de Petróleo	800	1400			
Gasolina con menos de 0,5% de Benceno	240	712	500	1480	
Grafito de cualquier tipo (excepto fibras)		1,6			(4)
Hexano (n)	40	141			
Hexano comercial con menos de 5% n-Hexano	400	1410	1000	3500	
2 - Hexanona (Metil n-Butil Cetona)	4	16			Piel
Hidrógeno Fosforado (Fosfina)	0,24	0,34	1	1,4	
Hidrógeno Sulfurado	8	11,2	15	21	
Hidroquinona		1,6			
Humos de soldadura al arco eléctrico		4			(5)
Lana mineral, fibras		1 fibras/cm <sup>3</sup>			(2)
Lindano		0,4			Piel
Maderas coníferas, Polvo de (pino, etc.)		4		10	
Maderas de otros tipos, polvo de (encina, haya, eucalipto)		0,8			
Malation		8			Piel
Manganeso - Humos		0,8		3	
Manganeso - Polvo y compuestos		4			
Mercurio vapor y compuestos inorgánicos (expresado como Hg)		0,04			Piel-A.4
Mercurio - Comp. Alquílicos		0,008		0,03	Piel
Mercurio - Comp. Anílicos		0,08			Piel
Metaacrilato de Metilo	80	328			
Metabisulfito de Sodio		4			
Metanol	160	210	250	328	Piel
Metilamina	8	10	24	30	
Metil Cellosolve (2 - metoxietanol)	4	13			Piel
Metilcloroformo (1,1,1 Tricloroetano)	280	1530	450	2460	
Metil Etil Cetona (2 - Butanona)	160	472	300	885	
Metil Isobutil Cetona	40	164	75	307	
Metil Mercaptano	0,4	0,78			
Metil n-Butil Cetona (2 - Hexanona)	4	16			Piel
Metilen Bifenil Isocianato	0,004	0,04			
2 - Metoxietanol (Metil Cellosolve)	4	13			Piel
Mica		2,4			(4)

Sustancia	Limite Permisible Ponderado		Limite Permisible Temporal		Observs.
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Molibdeno - Comp. Insol. (expresado como Mo)		8			
Molibdeno - Comp. Sols. (expresado como Mo)		4			
Monocrotofos		0,2			Piel
Monóxido de Carbono	40	46			
Nafta de Petróleo (Heptano comercial)	320	1310	500	2050	
Nafta liviana con n-Hexano <5%	400	1400	1000	3500	
Negro de Humo		2,8			
Niquel, metal y comp. Insol (expresado como Ni)		0,8			A.1
Niquel, comps. solubles (expresado como Ni)		0,08			A.4
p - Nitroanilina		2,4			Piel
Nitrobenzeno	0,8	4			Piel
Nitroglicerina	0,04	0,37			Piel
1 - Nitropropano	20	73			
2 - Nitropropano	8	29			A.2
Oxido de Calcio (Cal viva)		1,6			
Oxido de Etileno	0,8	1,4			A.2
Oxido nítrico	20	25			
Ozono	0,08	0,16			
Parafina Sólida (humos)		1,6			
Paraquat (polvo total)		0,4			
Paraquat (fracción respirable)		0,08			(4)
Pentaclorofenol		0,4			Piel
Percloroetileno (Tetracloroetileno)	40	270	200	1357	A.3
Peróxido de Hidrógeno	0,8	1,10			
Piretro		4			
Plomo - Polvo y Humos Inorgánicos (expresado como Pb)		0,12			A.3
Plomo, Cromato de (expresado como Cr)		0,01			A.2
Plomo Tetraetilico (expr. Como Pb)		0,08			Piel
Plomo Tetrametilico (expr. Como Pb)		0,12			Piel
Polvo de Granos (Cereales)		3,2			
Polvos no clasificados (total)		8			(3)
Polvos no clasificados (fracción respirable)		2,4			(4)
Selenio y comp.		0,16			
Silice amorfa precipitada - Silica Gel		8			
Silice amorfa diatomea sin calcinar		8			(3)
Silice amorfa - humos metalúrgicos		0,16			(4)
Silice amorfa - cuarzo fundido		0,08			(4)
Silice cristalizada cristobalita		0,04			(4)
Silice cristalizada cuarzo		0,08			(4)
Silice cristalizada tridimita		0,04			(4)

Sustancia	Limite Permissible Ponderado		Limite Permissible Temporal		Observs.
	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	p.p.m.	mg/m <sup>3</sup>	
Silice cristalizada tierra de Tripoli		0,08			(4)
Sulfato de Dimetilo	0,08	0,42			Piel A.2
Sulfuro de Carbono	8	25			Piel
Talco fibroso	1,6	fibras/cm <sup>3</sup>			A.1 (6)
Talco no fibroso		1,60			(4)
Talco, comp. solubles		0,08			Piel
Teluro y comp.		0,08			
1,1,2,2, Tetracloroetano	0,8	5,5			Piel-A.3
Tetracloroetileno (Percloroetileno)	40	270	200	1357	A.3
Tetracloruro de Carbono	4	25	10	63	Piel A.3
Tetrahidrofurano	160	470	250	737	
Tierra de Diatomeas no calcinada		8			(3)
Tierra de Diatomeas calcinada		0,08			(4)
Tolueno	80	300			Piel
Toluen - Di - Isocianato (MDI)	0,004	0,03	0,02	0,14	
Trementina (aguarrás vegetal)	80	445			
1,1,1 Tricloroetano (Metilcloroformo)	280	1530	450	2460	
1,1,2 Tricloroetano	8	44			Piel
Tricloroetileno	40	215	200	1070	A.3
Tridimita		0,04			(4)
2, 4, 6 Trinitrotolueno		0,4			Piel
Vanadio (Polvo resp. Y humos expr. V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		0,04			
Varsol (aguarrás mineral)	240	1100			
Vinilbenceno (monómero) - (Estireno)	40	170	100	425	Piel-A.4
Warfarina		0,08			
Xileno	80	347	150	651	
Yeso (sulfato de Calcio)		8			(3)
Zinc, Cloruro de - Humos		0,8		2	
Zinc, Cromato de (exp. como Cr)		0,008			A.1
Zinc, Oxido de - Humos		4		10	

(1) =Muestras exentas de fibras tomadas con elutriador vertical.

(2) =Recuento mediante Microscopio de Contraste en Fase con 400 - 450 diámetros de aumento, en muestras tomadas en filtro de membrana, contando fibras de longitud mayor a 5 µm y de una relación largo a diámetro igual o mayor de 3:1.

(3) =Polvo total exento de asbesto y con menos de 1 % de sílice cristalizada libre.

(4) =Fracción respirable de diámetro aerodinámico < 5 µm (PM 5).

(5) =Solamente en ausencia de elementos tóxicos en el metal base y los electrodos y en condiciones en que no haya acumulación o producción de gases tóxicos.

(6) =Recuento según (2), pero no deberá existir más de 1,6 mg/m<sup>3</sup> de polvo respirable.(\*).

(\*)Artículo modificado de acuerdo a D.S. N° 201 del 27 de abril de 2001, del Ministerio de Salud (D.O. 5.7.2001).

Artículo 67º: Las sustancias de los artículos 61 y 66 que llevan calificativo "Piel" son aquellas que pueden ser absorbidas a través de la piel humana. Con ellas deberán adoptarse todas las medidas necesarias para impedir el contacto con la piel de los trabajadores y se extremarán las medidas de protección y de higiene personal.

Artículo 68º: Las sustancias calificadas como "A.1" son comprobadamente cancerígenas para el ser humano y aquellas calificadas como "A.2" son sospechosas de ser cancerígenas para éstos, por lo cual en ambos casos se deberán extremar las medidas de protección y de higiene personal frente a ellas.

Respecto de aquellas calificadas como "A.3", no se ha demostrado que sean cancerígenas para seres humanos pero sí lo son para animales de laboratorio y las designadas como "A.4" se encuentran en estudio pero no se dispone aún de información válida que permita clasificarlas como cancerígenas para el ser humano o para animales de laboratorio, por lo que la exposición de los trabajadores a ambos tipos de ellas deberá ser mantenida en el nivel lo más bajo posible.

Artículo 69º: Cuando en el ambiente de trabajo existan dos o más sustancias de las enumeradas en el artículo 66º, y actúen sobre el organismo humano de igual manera, su efecto combinado se evaluará sumando las fracciones de cada concentración ambiental dividida por su respectivo límite permisible ponderado, no permitiéndose que esta suma sea mayor que 1 (uno). Si la acción de cada una de estas sustancias fuera independiente de las otras o cuando actúen sobre órganos diferentes deberán evaluarse independientemente respecto a su límite permisible ponderado.

**ANEXO II**

DIARIO OFICIAL DE LA REPUBLICA DE CHILE

N° 37.886 miércoles 16 de junio de 2004

**Decreto Supremo 148 (extracto)****Ministerio de Salud****APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS  
PELIGROSOS.**

Núm. 148.- Santiago, 12 de junio de 2003.- Vistos: las facultades que me confieren los artículos 24 y 32 N°8 de la Constitución Política de la República y lo dispuesto en los artículos 2, 67, 68, 78, 79, 80,81 y 90 del Código Sanitario, aprobado por Decreto con fuerza de Ley N°725 de 1967, del Ministerio de Salud, en los artículos 4° letra b) y 6° del decreto Ley N° 2763 de 1979 y en la Resolución N° 520 de 1996, de la Contraloría general de la República.

Considerando:

- 1.- Que al Estado le corresponde velar que se haga efectivo el derecho de las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación así como garantizar su derecho a la protección de la salud.
- 2.- Que el crecimiento de la actividad económica ha multiplicado la generación de residuos peligrosos, con el consiguiente aumento de los riesgos que amenazan la salud humana y el medio ambiente.
- 3.- Que para cumplir cabalmente los compromisos del Estado y enfrentar el peligro creciente que representan los residuos peligrosos, es indispensable regular el proceso completo de su manejo, desde que se generan y hasta que se eliminan, en términos que permitan su adecuado control y seguimiento, en un marco de certeza jurídica necesario para el desenvolvimiento de la actividad económica, que sirva también de garantía para la comunidad en su conjunto.

4.- Que un adecuado marco normativo puede inducir a la incorporación de una gestión de los residuos más eficientes, que ayude a minimizar la generación de residuos peligrosos.

5.- Que como resultado de la implementación de este reglamento se dispondrá de información relativa a los residuos peligrosos que se generan en el país, cuyo procesamiento y análisis será de utilidad para la autoridad sanitaria, la comunidad y las actividades productivas, en los que respecta al conocimiento de los residuos peligrosos y las mejores alternativas para su manejo, entre otros posibles usos de la información,

**D e c r e t o:**

Apruébase, el siguiente Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos:

## TITULO I

### Disposiciones generales

Artículo 1 Este Reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reuso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

Artículo 2 Corresponderá a la Autoridad Sanitaria fiscalizar y controlar el cumplimiento de las disposiciones del presente reglamento y del Código Sanitario en estas materias, todo ello de acuerdo con las normas e instrucciones generales que imparta el Ministerio de Salud. Los órganos del Estado que ejerzan funciones relacionadas con los residuos peligrosos deberán cumplir tales cometidos coordinadamente propendiendo a la unidad de acción y a la colaboración recíproca.

Artículo 3 Para los efectos del presente reglamento, las expresiones que aquí se indican tendrán el significado que se señala:

Almacenamiento o acumulación: se refiere a la conservación de residuos en un sitio y por un lapso determinado.

Cancerígeno o carcinogénico: sustancia capaz de inducir cáncer.

Concentración Letal 50 (CL50): concentración de vapor, niebla o polvo que, administrado por inhalación continua durante una hora a un grupo de ratas albinas adultas jóvenes, machos y hembras, causa con la máxima probabilidad, en el plazo de 14 días, la muerte de la mitad de los animales del grupo.

Contenedor: recipiente portátil en el cual un residuo es almacenado, transportado o eliminado.

Corrosividad: proceso de carácter químico causado por determinadas sustancias que desgastan a los sólidos o que puede producir lesiones más o menos graves a los tejidos vivos.

Destinatario: propietario, administrador o persona responsable de una instalación expresamente autorizada para eliminar residuos peligrosos generados fuera de ella.

Disposición final: procedimiento de eliminación mediante el depósito definitivo en el suelo de los residuos peligrosos, con o sin tratamiento previo.

Dosis Letal 50 (DL50) por ingestión: concentración de la sustancia que, administrada por la vía oral a un grupo de ratas albinas adultas jóvenes, machos y hembras, causa con la máxima probabilidad, en el plazo de 14 días, la muerte de la mitad de los animales del grupo.

Dosis Letal 50 (DL50) por absorción cutánea: concentración de la sustancia que, administrada por contacto continuo a un grupo de conejos albinos causa con la máxima probabilidad, en el plazo de 14 días, la muerte de a lo menos la mitad de los animales del grupo.

Eliminación: cualquiera de las operaciones señaladas en el artículo 86.

Estabilización: proceso mediante el cual un residuo es convertido a una forma química más estable, el que puede incluir la solidificación cuando ésta produce cambios químicos para reducir la movilidad de los contaminantes.

Generador: titular de toda instalación o actividad que dé origen a residuos peligrosos.

Hoja de Seguridad para el Transporte de Residuos Peligrosos: documento para transferir información sobre las características esenciales y grados de riesgo que presentan los residuos peligrosos para las personas y el medio ambiente, incluyendo aspectos de transporte, manipulación, almacenamiento y acción ante emergencias desde que una carga de residuos peligrosos es entregada por el generador a un medio de transporte hasta que es recibido por el destinatario.

Incineración: destrucción mediante combustión o quema técnicamente controlada de las sustancias orgánicas contenidas en un residuo.

Inflamabilidad: la capacidad para iniciar la combustión provocada por la elevación local de la temperatura. Este fenómeno se transforma en combustión propiamente tal cuando se alcanza la temperatura de inflamación.

Instalación de Eliminación: planta o estructura destinada a la eliminación de residuos peligrosos.

Lixiviado: líquido que ha percolado o drenado a través de un residuo y que contiene componentes solubles de este.

Lodo: cualquier residuo semisólido que ha sido generado en plantas de tratamiento de efluentes que se descarguen a la atmósfera, de aguas servidas, de residuos industriales líquidos o de agua potable. Se incluyen en esta definición los residuos en forma de fangos, barros o sedimentos provenientes de procesos, equipos o unidades de industrias o de cualquier actividad.

Manejo: todas las operaciones a las que se somete un residuo peligroso luego de su generación, incluyendo, entre otras, su almacenamiento, transporte y eliminación.

Minimización: acciones para evitar, reducir o disminuir en su origen, la cantidad y/o peligrosidad de los residuos peligrosos generados. Considera medidas tales como la reducción de la generación, la concentración y el reciclaje.

Mutágeno: sustancia que induce cualquier alteración hereditaria en el material genético.

**Reactividad:** potencial de los residuos para reaccionar químicamente liberando en forma violenta energía y/o compuestos nocivos ya sea por descomposición o por combinación con otras sustancias.

**Reciclaje:** recuperación de residuos peligrosos o de materiales presentes en ellos, por medio de las operaciones señaladas en el artículo 86 letra B, para ser utilizados en su forma original o previa transformación, en la fabricación de otros productos en procesos productivos distintos al que los generó.

**Relleno de Seguridad:** Instalación de Eliminación destinada a la disposición final de residuos peligrosos en el suelo, diseñada, construida y operada cumpliendo los requerimientos específicos señalados en el presente Reglamento.

**Residuo o desecho:** sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.

**Residuos incompatibles:** residuos que al entrar en contacto pueden generar alguno de los efectos señalados en el artículo 87.

**Residuo peligroso:** residuo o mezcla de residuos que presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar algunas de las características señaladas en el artículo 11.

**Reuso:** recuperación de residuos peligrosos o de materiales presentes en ellos por medio de las operaciones señaladas en el artículo 86 letra B para ser utilizados en su forma original o previa transformación como materia prima sustitutiva en el proceso productivo que les dio origen.

**Riesgo:** probabilidad de ocurrencia de un daño.

**Solidificación:** proceso en el que ciertos materiales son adicionados a los residuos para convertirlos en un sólido, para reducir la movilidad de contaminantes o mejorar su manipulación y sus propiedades físicas. El proceso puede o no involucrar una unión química entre el residuo, sus contaminantes y el material aglomerante.

Toxicidad: capacidad de una sustancia de ser letal en baja concentración o de producir efectos tóxicos acumulativos, carcinogénicos, mutagénicos o teratogénicos.

Transportista: persona que asume la obligación de realizar el transporte de residuos peligrosos determinados.

Teratógeno: agente que, cuando se administra al animal materno antes del nacimiento de la cría, induce anomalías estructurales permanentes en esta última.

Tratamiento: todo proceso destinado a cambiar las características físicas y/ o químicas de los residuos peligrosos, con el objetivo de neutralizarlos, recuperar energía o materiales o eliminar o disminuir su peligrosidad.

Artículo 4 Los residuos peligrosos deberán identificarse y etiquetarse de acuerdo a la clasificación y tipo de riesgo que establece la Norma Chilena Oficial NCh 2.190 of.93.- Esta obligación será exigible desde que tales residuos se almacenen y hasta su eliminación.

Artículo 5 El Ministerio de Salud establecerá los procedimientos y metodologías de determinación de las características de peligrosidad, así como, un reglamento para la acreditación de laboratorios que presten servicios de caracterización de residuos peligrosos.

Artículo 6 Durante el manejo de los residuos peligrosos se deberán tomar todas las precauciones necesarias para prevenir su inflamación o reacción, entre ellas su separación y protección frente a cualquier fuente de riesgo capaz de provocar tales efectos. Además, durante las diferentes etapas del manejo de tales residuos, se deberán tomar todas las medidas necesarias para evitar derrames, descargas o emanaciones de sustancias peligrosas al medio ambiente.

Artículo 7 En cualquier etapa del manejo de residuos peligrosos, queda expresamente prohibida la mezcla de éstos con residuos que no tengan ese carácter o con otras sustancias o materiales, cuando dicha mezcla tenga como fin diluir o disminuir su concentración. Si por cualquier circunstancia ello llegare a

ocurrir, la mezcla completa deberá manejarse como residuo peligroso, de acuerdo a lo que establece el presente reglamento.

Artículo 8 Los contenedores de residuos peligrosos deberán cumplir con los siguientes requisitos:

- a) tener un espesor adecuado y estar contruidos con materiales que sean resistentes al residuo almacenado y a prueba de filtraciones,
- b) estar diseñados para ser capaces de resistir los esfuerzos producidos durante su manipulación, así como durante la carga y descarga y el traslado de los residuos, garantizando en todo momento que no serán derramados,
- c) estar en todo momento en buenas condiciones, debiéndose reemplazar todos aquellos contenedores que muestren deterioro de su capacidad de contención,
- d) estar rotulados indicando, en forma claramente visible, las características de peligrosidad del residuo contenido de acuerdo a la Norma Chilena NCh 2.190 Of 93, el proceso en que se originó el residuo, el código de identificación y la fecha de su ubicación en el sitio de almacenamiento.

Los contenedores sólo podrán ser movidos manualmente si su peso total incluido el contenido, no excede de 30 kilogramos. Si dicho peso fuere superior, se deberán mover con equipamiento mecánico.

Sólo se podrán reutilizar contenedores cuando no se trate de residuos incompatibles, a menos que hayan sido previamente descontaminados.

Artículo 9 Sólo se podrán mezclar o poner en contacto entre sí residuos peligrosos cuando sean de naturaleza similar o compatible. Para estos efectos la "Tabla de Incompatibilidades" del artículo 87 tendrá carácter referencial.

Con todo, en los procesos de eliminación podrán mezclarse residuos de los grupos A y B de dicha Tabla, cuando se demuestre que los efectos de la reacción que ellos generan se encuentran bajo control.

## TITULO II

## De la Identificación y Clasificación.

Artículo 10 Un residuo o una mezcla de residuos es peligrosa si presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar alguna de las características que se definen en el artículo siguiente.

Artículo 11 Para los efectos del presente reglamento las características de peligrosidad son las siguientes:

- a) toxicidad aguda,
- b) toxicidad crónica,
- c) toxicidad extrínseca,
- d) inflamabilidad,
- e) reactividad y
- f) Corrosividad.

Bastará la presencia de una de estas características en un residuo para que sea calificado como residuo peligroso.

Artículo 12 Un residuo tendrá la característica de toxicidad aguda, cuando es letal en bajas dosis en seres humanos. Se considerará que un residuo presenta tal característica en los siguientes casos:

- a) Cuando su toxicidad por ingestión oral en ratas, expresada como Dosis Letal 50, DL50 oral, arroja en un ensayo de laboratorio un valor igual o menor que 50 mg de residuo/kg de peso corporal,
- b) Cuando el valor de su toxicidad por inhalación en ratas, expresado como Concentración Letal 50, CL50 inhalación, arroja en un ensayo de laboratorio un valor igual o menor que 2 mg de residuo/litro,
- c) Cuando su toxicidad por absorción cutánea en conejos, expresada como Dosis Letal 50, DL50 dermal, arroja en un ensayo de laboratorio un valor igual o menor que 200 mg de residuo/ kg. de peso corporal.

La toxicidad aguda de un residuo podrá estimarse en base a la información técnica disponible respecto de la toxicidad aguda de sus sustancias componentes. Se considerará que un residuo tiene la característica de toxicidad aguda, cuando el contenido porcentual en el residuo de una sustancia tóxica listada en el artículo 88 o de otra sustancia tóxica aguda reconocida como tal mediante decreto supremo del Ministerio de Salud, sea superior a la menor de las concentraciones tóxicas agudas límites, CTAL, definidas para ese constituyente, calculadas de la siguiente forma:

$$\text{CTAL oral} = [ \text{DL50 oral} / 50 \text{ mg/kg} ] \times 100$$

$$\text{CTAL inhalación} = [ \text{CL50 inhalación} / 2 \text{ mg/lt} ] \times 100$$

$$\text{CTAL dermal} = [ \text{DL50 dermal} / 200 \text{ mg/kg} ] \times 100$$

En caso que el residuo contenga más de una sustancia tóxica aguda, se considerará peligroso si la suma de las concentraciones porcentuales de tales sustancias, divididas por sus respectivas Concentraciones Tóxicas Agudas Límites, es mayor o igual a 1 para cualquiera de las vías de exposición antes mencionadas.

$$C(1) / \text{CTAL} (1) + C(2) / \text{CTAL} (2) + \dots + C(n) / \text{CTAL} (n) > 1$$

Artículo 13 Un residuo tendrá la característica de toxicidad crónica en los siguientes casos:

a) si contiene alguna sustancia no incluida en el Artículo 89 del presente Reglamento, que sea declarada toxica crónica mediante decreto supremo del Ministerio de Salud por presentar efectos tóxicos acumulativos, carcinogénicos, mutagénicos o teratogénicos en seres humanos. La Autoridad Sanitaria deberá fundar su decisión en estudios científicos nacionales o extranjeros.

b) cuando contiene alguna sustancia incluida en el Artículo 89 del presente Reglamento que sea cancerígena y cuya concentración en el residuo, expresada como porcentaje, es superior a CTAL/1000, en donde CTAL es la concentración tóxica aguda límite de dicha sustancia.

c) si contiene alguna de las sustancias que presentan efectos acumulativos, teratogénicos o mutagénicos incluidas en el Artículo 89, cuya concentración en el residuo, expresada como porcentaje, es superior a CTAL/100, en donde CTAL es la concentración tóxica aguda límite de la sustancia tóxica crónica.

Para efectos de las letras b) y c) precedentes el Ministerio de Salud determinará mediante decreto supremo aquellas sustancias del artículo 89 que tienen efectos cancerígenos.

Cuando un residuo contenga más de una sustancia tóxica, se considerará que presenta la característica de toxicidad crónica si:

d) la suma de las concentraciones porcentuales de las sustancias cancerígenas en el residuo divididas por sus respectivas concentraciones tóxicas agudas límites (CTAL) es superior o igual a 0,001.

$$C(1) /CTAL(1) + C(2) /CTAL(2) +.....+ C(n) /CTAL(n) > 0,001$$

e) la suma de las concentraciones porcentuales de las sustancias con efectos acumulativos, teratogénicos o mutagénicos divididas por sus respectivas concentraciones tóxicas agudas límites (CTAL) es superior o igual a 0,01.

$$C(1) /CTAL(1) + C(2) /CTAL(2) +.....+ C(n) /CTAL(n) > 0,01$$

Artículo 14 Un residuo tendrá la característica de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueda dar origen a una o más sustancias tóxicas agudas o tóxicas crónicas en concentraciones que pongan en riesgo la salud de la población.

Cuando la eliminación se haga a través de su disposición final en el suelo se considerará que el respectivo residuo tiene esta característica cuando el Test de Toxicidad por Lixiviación arroje, para cualquiera de las sustancias mencionadas, concentraciones superiores a las señaladas en la siguiente tabla:

## Concentraciones Máximas Permisibles (CMP)

Código RP	Nº CAS	Sustancia	CMP (mg/l)
D004	7440-38-2	Arsénico	5
D007	7440-47-3	Cromo	5
D009	7439-97-6	Mercurio	0,2
D008	7439-92-1	Plomo	5
D010	7782-49-2	Selenio	1
D005	7440-39-2	Bario	100
D018	71-43-2	Benceno	0,5
D006	7440-43-9	Cadmio	1
D019	56-23-5	Tetracloruro de carbono	0,5
D020	57-74-9	Clordano	0,03
D021	108-90-7	Clorobenceno	100
D022	67-66-3	Cloroformo	6
D023	95-48-7	o-Cresol (*)	200
D024	108-39-4	m-Cresol (*)	200
D025	106-44-5	p-Cresol (*)	200
D026	-----	Cresol (*)	200
D016	94-75-7	2,4-D	10
D027	106-46-7	1,4 Diclorobenceno	7,5
D028	107-06-2	1,2 Dicloroetano	0,5
D029	75-35-4	1,1 Dicloroetileno	0,7
D030	121-14-2	2,4 Dinitrotolueno	0,13
D012	72-20-8	Endrin	0,02
D031	76-44-8	Heptacloro (y su epóxido)	0
D032	118-74-1	Hexaclorobenceno	0,13
D033	87-68-3	Hexacloro-1,3-butadieno	0,5
D034	67-72-1	Hexacloroetano	3
D013	58-89-9	Lindano	0,4
D014	72-43-5	Metoxicloro	10
D035	78-93-3	Metiletilcetona	200
D036	98-95-3	Nitrobenceno	2
D037	87-86-5	Pentaclorofenol	100
D038	110-86-1	Piridina	5
D011	7440-22-4	Plata	5
D039	127-18-4	Tetracloroetileno	0,7
D015	8001-35-2	Toxafeno	0,5
D040	49-01-6	Tricloroetileno	0,5
D041	95-95-4	2,4,5-Triclorofenol	400
D042	88-06-2	2,4,6-Triclorofenol	2
D017	93-72-1	2,4,6,-TP(silvex)	1
D043	75-01-4	Cloruro de vinilo	0,2

(\*) La suma de las concentraciones de los isómeros (o-Cresol, m-Cresol y p-Cresol) debe ser inferior a la CMP establecida para el Cresol.

También incluyo en esta parte de normativa, un extracto de la Ley 19300 sobre bases generales del medio ambiente.

**ANEXO III****LEY 19.300  
SOBRE BASES GENERALES  
DEL MEDIO AMBIENTE****Modificada por la ley 20.173  
2007**

Las actividades contaminantes ubicadas en zonas afectas a planes de prevención o descontaminación, quedarán obligadas a reducir sus emisiones a niveles que permitan cumplir los objetivos del plan en el plazo que al efecto se establezca.

Artículo 46. En aquellas áreas en que se esté aplicando un plan de prevención o descontaminación, sólo podrán desarrollarse actividades que cumplan los requisitos establecidos en el respectivo plan. Su verificación estará a cargo de la respectiva Comisión Regional del Medio Ambiente, o de la Comisión Nacional del Medio Ambiente si el plan abarca zonas situadas en distintas regiones.

Artículo 47. Los planes de prevención o descontaminación podrán utilizar, según corresponda, los siguientes instrumentos de regulación o de carácter económico:

- a) Normas de emisión;
- b) Permisos de emisión transables;
- c) Impuestos a las emisiones o tarifas a los usuarios, en los que se considerará el costo ambiental implícito en la producción o uso de ciertos bienes o servicios, y
- d) Otros instrumentos de estímulo a acciones de mejoramiento y reparación ambientales.

Artículo 48. Una ley establecerá la naturaleza y las formas de asignación, división, transferencia, duración y demás características de los permisos de emisión transables.