



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR CICLÓNICO DE
ENTRADA TANGENCIAL Y DESCARGA AXIAL PARA MATERIAL
PARTICULADO DE TAMAÑO MENOR A 40 μm .**

Trabajo de titulación previa la obtención del Título de:
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORES: GEOVANNA ELIZABETH LOBATO FREIRE
ÁNGEL FERNANDO CASTILLO CASTILLO
TUTOR: DR. FAUSTO YAULEMA.

Riobamba – Ecuador
2015

©2015, Geovanna Elizabeth Lobato Freire y Ángel Fernando Castillo Castillo.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA CIENCIAS QUÍMICAS

El Tribunal de Tesis del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación : “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR CICLÓNICO DE ENTRADA TANGENCIAL Y DESCARGA AXIAL PARA MATERIAL PARTICULADO DE TAMAÑO MENOR A 40 μm** ”, de responsabilidad con los señores Geovanna Elizabeth Lobato Freire y Ángel Fernando Castillo Castillo, ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación , quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

Dr. Fausto Yaulema

**DIRECTOR DE TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Ing. Juan González

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Nosotros, Geovanna Elizabeth Lobato Freire, Ángel Fernando Castillo Castillo, autores y ejecutores de la presente tesis nos responsabilizamos de los pensamientos, ideas y resultados expuestos en el presente trabajo de investigación, siendo la Escuela Superior Politecnica de Chimborazo la dueña intelectual de la misma.

GEOVANNA ELIZABETH LOBATO FREIRE

ANGEL FERNANDO CASTILLO CASTILLO

DEDICATORIA

A Dios por darme salud, sabiduría y por ser siempre mi guía y fortaleza para poder culminar mis estudios de la mejor manera.

A mis padres Yola y Gustavo por ser el pilar fundamental en toda mi vida y por ser mi inspiración y ejemplo a seguir de lucha y superación, por haberme dado el regalo más preciado la vida y brindarme la oportunidad de estudiar y poder llegar a formarme como un profesional con valores éticos y morales. A mis hermanos Christian, Juan, Luis y Maria por haberme brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera y darme la fuerza para cumplir mi meta. A mi abuelita que ha sido como mi segunda madre quien con sus consejos ha sabido sacar lo mejor de mi y dar todo por sus nietos.

A mi novia Andrea (mi princesa) quien se ha convertido en una parte fundamental en mi vida brindándome sus consejos, alentándome para que nunca perdiera mi camino y llegar juntos a este sueño que prometimos cumplir.

Ángel

A Dios y a la Virgen por acompañarme y guiarme a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mis padres José y Rosa por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un ejemplo de vida, lucha y superación. A mis Hermanos y sobrinos por ser parte importante de mi vida. A Dario por ser un ejemplo de superación, tenacidad, y por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

A mi novio Patricio Méndez por ser mi apoyo incondicional, por su comprensión, paciencia, amor y por la confianza que has depositado en mi.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”. Thomas Chalmers

Geovanna

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por ser nuestra guía espiritual a lo largo de toda nuestra vida, a nuestros padres por brindarnos siempre su apoyo incondicional y sus sabios consejos durante toda nuestra formación como personas con valores éticos y morales, por ser nuestro ejemplo de superación para alcanzar juntos nuestro sueño de convertirnos en profesionales.

A nuestros hermanos por ser una parte importante en nuestras vidas y brindarnos sus experiencias y encaminarnos para lograr nuestro objetivo de culminar nuestra carrera.

A la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO y a nuestra escuela de CIENCIAS QUÍMICAS por brindarnos conocimientos y ayudarnos a desempeñarnos como futuros profesionales.

Al Dr. Fausto Yaulema y al Dr. Juan González por brindarnos su tiempo e invaluable conocimiento para poder concluir con este trabajo de titulación.

A nuestros amigos por acompañarnos siempre a lo largo de toda nuestra vida universitaria y por brindarnos su apoyo de una u otra manera para culminar de manera exitosa nuestra carrera.

Geovanna y Ángel

INDICE DE ABREVIATURAS

Dc = Diámetro del ciclón o colector

Δp = Caída de presión.

Vs = Velocidad de saltación

P = Longitud de la plancha de acero

a = Altura de Entrada (m)

b = Ancho de Entrada (m)

S = Altura de salida (m)

Ds = Diámetro de salida (m)

h = Altura de la parte cilíndrica (m)

z = Altura de la parte cónica (m)

H = Altura total del ciclón (m)

B = Diámetro de salida del material particulado (m)

A = Área (m²)

Vi = Velocidad inicial (m/s)

Q = Caudal de la corriente de aire (m³/s)

δ_p = *Densidad de la partícula* 2650 Kg/m³

δ = *Densidad del gas portador* 1.127Kg/m³

μ = *Viscosidad del gas* 1.9×10^{-5} kg/ms

W = Velocidad equivalente m/s

Kb = Relación del ancho de entrada con respecto al diámetro del ciclón

Vi = Velocidad de entrada del gas al ciclón m/s

B = Diámetro de salida del material particulado (m)

KL = Factor de dimensiones lineales

V_{sc} = Volumen del ciclón evaluado sobre la salida (m^3)

V_R = Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural (m^3)

δp = Densidad de la partícula (Kg/m^3)

D_{pi} = Diámetro de la partícula (m)

G = Factor de configuración

T_i = Tiempo de relajación para partículas de $40\mu m$ (s)

n = Exponente del Vórtice

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACION DE RESPONSABILIDAD	iii
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE DE ABREVIATURAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO	6
1.1 Origen del material particulado.....	6
1.2 Clasificación del material particulado.....	7
<i>1.2.1 Partículas gruesas (PM10).....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2. Partículas finas (PM 2,5).....</i>	<i>9</i>
1.3 Clasificación de las fuentes de emisión de partículas	9
<i>1.3.1. Fuentes naturales de material particulado.....</i>	<i>9</i>
<i>1.3.2. Fuentes antropogénicas de material particulado</i>	<i>10</i>
<i>1.3.2.1. Fuentes Fijas.....</i>	<i>10</i>
<i>1.3.2.2. Fuente Móviles</i>	<i>10</i>
1.4. Efectos del material particulado	10
<i>1.4.1. Reducción de visibilidad.....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.2 Efectos en la salud.....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.3. Tracto respiratorio y las partículas</i>	<i>11</i>
1.5 Separadores de partículas	12
<i>1.5.1 Cámaras de sedimentación por gravedad.....</i>	<i>13</i>
<i>1.5.2 Separadores ciclónicos</i>	<i>14</i>
<i>1.5.2.1 Teoría del funcionamiento de los separadores ciclónicos</i>	<i>15</i>

1.5.2.2	<i>Clasificación de los separadores ciclónicos</i>	18
1.6	Perfiles de velocidad del separador ciclónico	26
1.7	Separación de partículas en un ciclón. Modelos de eficiencia	27
1.7.1.	<i>Modelo de lapple</i>	28
1.8	Extracción de sólidos de los ciclones	29
1.9	Diseño	29
1.9.1.	<i>Tipo de ciclón</i>	30
1.9.1.1	<i>Cálculo del diámetro</i>	31
1.9.1.2.	<i>Altura y ancho de entrada</i>	31
1.9.1.2.1	<i>Altura</i>	31
1.9.1.2.2	<i>Ancho</i>	32
1.9.1.3.	<i>Altura y ancho de salida</i>	32
1.9.1.3.1	<i>Altura de salida</i>	32
1.9.1.3.2	<i>Diámetro de salida</i>	32
1.9.1.4.	<i>Altura de la parte cilíndrica</i>	33
1.9.1.5.	<i>Altura parte cónica</i>	33
1.9.1.6.	<i>Altura total del ciclón</i>	33
1.9.1.7.	<i>Diámetro de salida de mp</i>	34
1.9.1.8.	<i>Caudal de la corriente de aire</i>	34
1.9.1.9.	<i>Velocidad equivalente</i>	35
1.9.1.10.	<i>Velocidad de saltación</i>	35
1.9.1.11.	<i>Volumen del ciclón evaluado sobre la salida</i>	36
1.9.1.12.	<i>Longitud natural del ciclón</i>	37
1.9.1.13.	<i>Factor de dimensiones lineales</i>	37
1.9.1.14.	<i>Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural</i>	38
1.9.1.16.	<i>Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón</i>	39
1.9.1.17.	<i>Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón</i>	39
1.9.1.18.	<i>Exponente del vórtice</i>	39
1.9.1.19.	<i>Tiempo de relajación para partículas de 40 μm</i>	40
1.9.1.20.	<i>Eficiencia fraccional por intervalo de trabajo</i>	40
1.9.1.21.	<i>Eficiencia total del ciclón</i>	41

CAPITULO II

MARCO METODOLOGICO

2. PARTE EXPERIMENTAL	42
2.1 Muestreo	42
2.2 Metodología	43
2.2.1 Métodos y Técnicas	43
2.2.1.1 Métodos	43
2.3 Método de medición de tamaño de partículas	45
2.3.1 Tamizado	45
2.4 Diagnostico.....	50

CAPITULO III

MARCO DE RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

3. CÁLCULOS Y RESULTADOS	51
3.1 Cálculos	51
3.1.1 <i>cálculo del diámetro</i>	51
3.1.1.2.1 <i>Altura</i>	52
3.1.1.2.2 <i>Ancho</i>	53
3.1.1.3.1 <i>Altura de salida</i>	53
3.1.1.3.2. <i>Diámetro de salida</i>	54
3.1.1.4.1 <i>Altura de la parte cilíndrica</i>	55
3.1.1.5. <i>Altura parte cónica</i>	56
3.1.1.6. <i>Altura total del ciclón</i>	57
3.1.1.7.1 <i>Diámetro de salida de mp</i>	58
3.1.1.8. <i>Caudal de la corriente de aire</i>	59
3.1.1.9. <i>Velocidad equivalente</i>	59
3.1.1.10. <i>Velocidad de saltación</i>	60
3.1.1.10.1.1 <i>Relación de velocidad</i>	60
3.1.1.11. <i>Volumen del ciclón evaluado sobre la salida</i>	61
3.1.1.12. <i>Longitud natural del ciclón</i>	61
3.1.1.13. <i>Factor de dimensiones lineales</i>	63
3.1.1.15.1 <i>Factor dimensional de las proporciones volumétricas</i>	64
3.1.1.16. <i>Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón</i>	65
3.1.1.17. <i>Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón</i>	66
3.1.1.18. <i>Exponente del vórtice</i>	67
3.1.1.19. <i>Tiempo de relajación para partículas de 40 µm</i>	67

3.1.1.20.	<i>Eficiencia fraccional por intervalo de trabajo</i>	68
3.1.1.21.	<i>Eficiencia del ciclón</i>	68
3.4.	Procedimiento de construcción	70
3.4.1.	<i>Proceso de construcción del separador ciclónico</i>	70
3.4.1.1	<i>Diseño de planos</i>	70
3.4.1.2	<i>Selección de la materia prima</i>	70
CONCLUSIONES		74
RECOMENDACIONES		75
BIBLIOGRAFIA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1-1	Distribución de tamaño de partículas atmosféricas.....	8
Figura N° 2-1.	Cámara de sedimentación por gravedad	14
Figura N° 3-1	Mecanismos de recolección de partículas en un ciclón	16
Figura N° 4-1.	Fuerzas que actúan sobre una partícula dentro del separador ciclónico	16
Figura N° 5-1	Curva de eficiencia de captación de un ciclón.....	17
Figura N°6-1	Ciclones con entrada circular.....	19
Figura N° 7-1	Ciclones con entrada rectangular	19
Figura N° 8-1	Ciclones con entrada tipo voluta o en espiral	20
Figura N° 9-1	Separador ciclónico con entrada de gas axial	21
Figura N° 10-1	Tipos de salida de gas y las partículas en los ciclones.....	22
Figura N° 11-1	Partes principales de un separador ciclónico.	23
Figura N° 12-1	Perfiles de velocidad de un ciclón (a) tangencial (b) radial (c) axial.....	27
Figura N° 13-1	Dispositivos comunes de Extracción de Sólidos de un Ciclón	29
Figura N° 14-1	Separador ciclonico de alta eficiencia starman	31
Figura N° 15-3	Plano del separador ciclónico	51
Figura N° 16-3	Altura de Entrada.....	52
Figura N° 17-3	Altura de Salida	53
Figura N° 18-3	Diámetro de Salida.....	54
Figura N° 19-3	Altura de la parte Cilíndrica.....	55
Figura N° 20-3	Altura parte cónica.....	56
Figura N° 21-3	Altura total	57
Figura N° 22-3	Diámetro de salida	58
Figura N° 23-3	Volumen del Ciclón sobre la salida	61
Figura N° 24-3	Longitud natural del ciclón	62
Figura N° 25-3	Dimensiones lineales	63
Figura N° 26-3	Relación entre la Altura y Diámetro	65
Figura N° 27-3	Relación entre base y Diámetro	66
Figura N° 28-3	Sistema de soldadura	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Dimensiones principales de un separador ciclónico.....	23
Tabla N° 2 Eficiencia de remoción de los separadores ciclónicos de entrada tangencial.....	24
Tabla N° 3 Características de los ciclones convencionales.....	25
Tabla N° 4 Características de los ciclones de alta eficiencia.....	25
Tabla N° 5 Características de los ciclones de alta capacidad.....	25
Tabla N° 6 Resultados del tamizado de la muestra 1 (Angar de matrias primas).....	46
Tabla N° 7 Resultados del tamizado de la muestra 2 (Angar de matrias primas).....	46
Tabla N° 8 Resultados del tamizado de la muestra 3 (Angar de matrias primas).....	46
Tabla N° 9 Resultados del tamizado de la muestra 4 (Banda transportadora).....	46
Tabla N° 10 Resultados del tamizado de la muestra 5 (Banda transportadora).....	47
Tabla N° 11 Resultados del tamizado de la muestra 6 (Banda transportadora).....	47
Tabla N° 12 Resultados del tamizado de la muestra 7 (Banda transportadora).....	48
Tabla N° 13 Resultados del tamizado de la muestra 8 (Banda transportadora).....	48
Tabla N° 14 Resultados del tamizado de la muestra 9 (Banda transportadora).....	48
Tabla N° 15 Resultados del tamizado de la muestra 10 (Banda transportadora).....	49
Tabla N° 16 Resultados del tamizado de la muestra 11 (Banda transportadora).....	49
Tabla N° 17 Resultados del tamizado de la muestra 12 (Angar de empacado).....	49
Tabla N° 18 Total de muestra recolectada.....	50
Tabla N° 19 Eficiencia total del Separador Ciclonico.....	68
Tabla N° 20 Tabla de Cálculos finales del Separador Ciclonico.....	68
Tabla N° 21 Características de la plancha de acero inoxidable.....	71

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A** Puntos de muestreo en la industria Union Cementera Nacional
- ANEXO B** Construcción de los muestreadores de material particulado
- ANEXO C** Colocación de los muestreadores en la Union Cementera Nacional
- ANEXO D** Recolección de los muestreadores de material particulado
- ANEXO E** Caracterización del tamaño de la particula
- ANEXO F** Planos en AUTOCAD del separador ciclónico
- ANEXO G** Planos en AUTOCAD del separador ciclónico dimensionamiento
- ANEXO H** Equipos utilizados en la construcción del separador ciclónico
- ANEXO I** Materiales utilizados en la construcción del separador ciclónico
- ANEXO J** Construcción del separador cilconico

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño y construcción de un separador ciclónico de entrada tangencial y descarga axial para material particulado de tamaño menor a 40 μm , con la finalidad de disminuir la contaminación atmosférica generada por los procesos industriales antropogénicos, basados en estudios realizados por investigadores se recopiló información sobre los procesos industriales y los efectos provocados en la salud de los trabajadores y de la población que se halla alrededor de fábricas. En la etapa inicial se determinó mediante un muestreo tomado del Texto Unificado de Legislación Ambiental Libro VI Anexo IV Norma de la Calidad del Aire ambiente. Método Gravimétrico, mediante la captación de partículas en envases abiertos, en base a esto se determinó una concentración de material particulado de 10 μm y 2,5 μm , incumpliendo con la norma de calidad de aire, por ende se realizó una caracterización donde se determinó el tamaño de la partícula obteniéndose que el 65,87% del total de las partículas recolectadas corresponden a un diámetro superior a los 53 μm , el resto es de 34,13% que corresponde a partículas menores e iguales a los 38 μm de diámetro. Se estableció que el método de tratamiento más adecuado es un separador ciclónico que remueve las partículas transportadas por una corriente gaseosa basada en el principio de impacto inercial generada por una fuerza centrífuga dentro del conducto, removiendo material particulado y gases. Se concluye que es necesario la construcción del ciclón, con el que se prevee disminuir la concentración del material particulado en un 98%. Se recomienda la construcción de separadores ciclónicos en industrias donde existan procesos de combustión y genere material particulado para cumplir con los límites permisibles en la norma legislativa ambiental y así evitar las multas por incumplimiento.

Palabras claves: < MATERIAL PARTICULADO >, < PROCESOS INDUSTRIALES >, <SEPARADOR CICLONICO>, < CONTAMINACION ATMOSFRERICA >, < MUESTREO GRAVIMETRICO >, < MITIGACION AMBIENTAL >, < TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION AMBIENTAL [TULSMA] >.

SUMMARY

This research work is the design and construction of a tangential inlet cyclone separator with axial discharge for particulate material smaller than $40\ \mu\text{m}$. The objective is to diminish atmospheric pollution that is generated by anthropogenic industrial processes. Based on some research, some information about the industrial processes was gathered, as well as their effects on worker's and nearby population's health. At the initial stage, the sampling was taken from Unified Text of Environmental Legislation Book VI Annex IV Air Quality Environmental Rule. Based on the gravimetric method through particle capture in open containers, it was determined that there was a concentration of particulate material of $10\ \mu\text{m}$ and $2.5\ \mu\text{m}$. This breaks the rule of air quality; therefore, a characterization was done in order to determine the particle size resulting that 65.87% of the total particles collected had a diameter greater than $53\ \mu\text{m}$. The rest is 34.13% that corresponds to particles smaller than or the same as $38\ \mu\text{m}$ of diameter. It was established that the most adequate method of treatment is a cyclone separator that removes the particles driven by a gas current based on the principle of inertial impaction generated by a centrifugal force inside the duct. It removes the particulate material and gases. It is concluded that it is necessary to build this cyclone with which it is planned to diminish particulate material by 98%. It is recommended to build cyclonic separators in industries where there is combustion processes and which generate particulate material to comply with the permitted limits shown in the environmental legislative regulations and avoid fines.

Key words: < PARTICULATE MATERIAL >, < INDUSTRIAL PROCESSES >, < CYCLONE SEPARATOR >, < ATMOSPHERIC POLLUTION >, < GRAVIMETRIC SAMPLING >, < ENVIRONMENTAL MITIGATION >, < UNIFIED TEXT OF ENVIRONMENTAL LEGISLATION [TULSMA] >.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es una problemática ambiental que ha aumentado en los últimos años en las grandes urbes. Una de los países que presenta mayores índices de contaminación atmosférica es España donde se atribuye el 16 % de las muertes por causas ambientales y enfermedades asociadas a la exposición a contaminantes atmosféricos y se manifiesta especialmente en asentamientos de tipo urbano e industrial.

El material particulado (mp) es considerado uno de los contaminantes del aire que tiene un efecto perjudicial en la salud de las personas y de los demás seres vivos. Según la organización Mundial de la salud (OMS) se estima que la contaminación atmosférica causa aproximadamente dos millones de muertes prematuras al año en todo el mundo; investigaciones realizadas en distintos centros urbanos en diferentes países del mundo revelaron que el nivel de gravedad de las enfermedades está relacionado directamente con la concentración de partículas en el ambiente. (Martin, P. 2004. <http://digital.bl.fcen.uba.ar>) En nuestro país no se ha logrado identificar la magnitud de dicha problemática puesto que se cuenta con pocas investigaciones sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud de las personas, no se tienen redes de monitoreo para este tipo de contaminantes y es de suma importancia medir concentraciones reales en las ciudades de manera que puedan utilizarse estos datos para evaluaciones de riesgo y desarrollo de futuras de políticas de control.

A partir de la aprobación del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización en 2008 (COOTAD) y el Plan del Buen Vivir se empieza hablar sobre los impactos que genera la contaminación, sin embargo esto repercute en la escasa valoración de los impactos que la contaminación atmosférica genera en el tema del desarrollo social y económico.

En la ciudad de Riobamba, una de las mayores problemáticas es la gran cantidad de contaminación atmosférica provocada por la emisión de gases generadas por los procesos industriales de las empresas que se encuentran dentro de la zona urbana de la ciudad, tales como Ecuaceramica, Tubasec, Unión Cementera Nacional, y algunas otras empresas que en sus procesos emiten material particulado y gases a la atmosfera provocando daños al medio ambiente y a la población.

Uno de los efectos que producen daño en la atmosfera es el material particulado y emisiones de gases; tenemos el neblumo que se acumula y permanece sobre un centro urbano o industrial lo que

origina una radiación solar alta, dando origen a varios compuestos ácidos sulfúrico y nítrico, dañinos para la salud y el ambiente. (Manahan, S. 2007. Pp: 420-425)

Las partículas incrementan las reacciones en la atmósfera, reducen la visibilidad; aumentan la posibilidad de la precipitación, la niebla y las nubes; reducen la radiación solar, con los cambios en la temperatura ambiental y en las tasas biológicas de crecimiento de las plantas; y ensucia las materias del suelo.

El material particulado causa impactos negativos a la salud de las personas además de producir daños a la flora y fauna. Por tal motivo es de interés público, ya que tiene una alta complejidad como elemento ambiental de la atmosfera por lo que su estudio establece un desafío científico tanto experimental como teórico.

La exposición de este material causa problemas a la salud que son difíciles de diagnosticar y tratar. Actualmente las legislaciones y políticas ambientales se han dirigido a la prevención de los efectos en la salud, no se ha establecido las dosis bajo la cual no se percibe efectos nocivos, porque se ha encontrado que a bajas concentraciones de material particulado se constata efectos a la salud.

Los efectos provocados por el material particulado (PM) son principalmente: efectos fibrogénicos, efectos irritantes, efectos carcinogénicos, efecto alérgicos, efectos tóxicos sistémicos y efectos en la piel. (Lozada,H. 2006. Pp:5-6)

Hay una gran variedad de enfermedades que se pueden considerar típicas de la mayoría de las profesiones, neumopatías y que provienen del medio ambiente que rodea a los trabajadores en industrias que generan material particulado. Son una causa muy importante de incapacidad laboral transitoria y permanente, suponiendo una grave alteración de la calidad de vida de estas personas y un coste elevado para los sistemas de salud de todos los países del mundo, tratándose paradójicamente de un grupo de enfermedades que suele estar unido al desarrollo industrial de una región. (Interactivo, 2003. <http://www.elmedicointeractivo.com>)

ANTECEDENTES

En el 2008 fue presentado de Tesis Diseño y Construcción de un Separador Ciclónico para la industria naval por José Luis Bahamondes Santos. Este trabajo tiene la finalidad de prevenir la contaminación hacia la atmosfera con la presencia de material particulado indeseable en el aire, en cantidades bastante grandes como para producir efectos nocivos. Este material particulado contaminante pueden causar daños a las personas y al entorno, creando paisajes desagradables. La gran cantidad de material particulado nocivo entra a la atmosfera procedente de fuentes de emision antropogénicas, que no están dentro del alcance del ser humano, se pretende llegar a restringir, para poder mitigar la contaminación atmosférica

Los objetivos están orientados a la utilización del separador ciclónico y poder incorporarlos a procesos de estiba y desestiba de carga a granel, así como separaciones de partículas sólidas en procesos de combustión, entre otras aplicaciones industriales que provocan la emisión de material particulado. La experiencia sobre el uso 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. (Bahamondes, S. 2008. <http://www.bvsde.paho.org/>)

JUSTIFICACIÓN

El creciente interés existente en la actualidad por la investigación en el campo del material particulado atmosférico se debe a la identificación de efectos adversos de este contaminante ya que produce daño ecosistema aledaño a las industrias y que estos viajan grandes distancias debido a la corriente de aire que está presente en la ciudad.

Buscando minimizar los efectos causados por el material particulado que producen afectaciones en el aparato respiratorio y si se tiene una exposición prolongada puede producir efectos cancerígenos al ser humano, en busca del bienestar de la población que genera los procesos industriales de la Ciudad de Riobamba, se propone el diseño de un sistema de desempolvado (ciclón) para material particulado de menor tamaño de $2.5 \mu m$ hasta $50 \mu m$ en las áreas donde hay gran emisión de partículas generadas por los procesos industriales.

Los separadores ciclónicos son dispositivos simples, que no poseen secciones móviles y además son de fácil mantenimiento, es uno de los dispositivos mas económicos para la recolección de material particulado, desde la perspectiva operación así como la inversión.

básicamente son construcciones sencillas, que proporciona operaciones de mantenimiento que requieren un mínimo trabajo ; los cuales se los puede realizar de diversos tipos de materiales y diseñados para soportar rangos altos de temperatura (que pueden llegar a los $1000^{\circ} C$) y presiones de operación.

El perfeccionamiento de este dispositivo ha generado una búsqueda para proponer nuevas formas de aumentar la eficiencia. Por ejemplo, la variación de las magnitudes geométricas, es un tema de gran interés que puede proponer nuevas alternativas e incluso un patrón estándar para la fabricación de nuevos y mejores separadores ciclónicos.

Según el Instituto de Vigilancia Sanitaria Francés en el proyecto "Mejora del conocimiento y la comunicación para la toma de decisiones en materia de contaminación atmosférica y salud en Europa" (**APHEKOM**) confirman que si se mejora la calidad de nuestro aire, el bienestar mejoraría considerablemente. Por último, servirá para que el público en general se informe mejor sobre los riesgos, contribuyendo así a mantener controlada su salud.

Es muy importante el tratamiento y seguimiento de las enfermedades pulmonares profesionales, siendo fundamental la prevención, que puede fortalecerse con las medidas legales de prevención de riesgos laborales y con equipos que minimicen el contacto del material particulado con los trabajadores de las industrias en las que son frecuentes estas neumopatías, es por ello que los separadores ciclónicos son una alternativa de bajo costo y alta efectividad al momento de prevenir estos problemas.

OBJETIVOS

Objetivo General.

- Diseñar y Construir un separador ciclónico de entrada tangencial y descarga axial para material particulado de tamaño menor a $40 \mu m$.

Objetivos específicos.

- Determinar el tamaño del material particulado de diferentes procesos industriales aplicables al separador ciclónico de entrada tangencial y descarga axial.
- Realizar los cálculos de diseño del separador ciclónico de entrada tangencial y descarga axial.
- Construir el separador ciclónico de entrada tangencial y descarga axial.
- Medir la eficiencia del separador ciclónico de entrada tangencial y descarga axial después de haber realizado su construcción.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Origen del material particulado

Según Carlos Ayora Ibáñez dice que es necesario considerar que el termino material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro $>20 \mu m$), caracterizadas por permanecer un periodo de tiempo corto. (Ibáñez, C.2004. p: 134)

El material particulado atmosférico comprende a las partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire, ya sean estas partículas sedimentables o en suspensión, pudiendo ser de origen natural o antropogénico. (Morales, R. 2006. Pp: 107-108)

Estas partículas pueden ser emitidas hacia la atmosfera de manera directa, denominándose partículas de tipo primario (el polvo y el hollín), o bien pueden ser generados por reacciones químicas propias de la atmosfera denominándose partículas de tipo secundario (condensación de vapores).

Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmosfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación. (Ibáñez, C.2004. Pp: 134)

Dependiendo de las características físicas y químicas del material particulado, estas partículas participan en procesos fisicoquímicos atmosféricos y meteorológicos a escala global, regional, local o urbana, ya sean en la formación de nubes, proveyendo de núcleos de condensación de vapor de agua, o modificando el balance radiactivo de la tierra, al alterar la reflexión de la radiación solar previendo superficies polifásicas en las que se producen reacciones químicas heterogéneas.

Las características físicas de las partículas ejercen influencia en su transporte, tiempo de permanencia y la posibilidad de depositación, tanto en el medio ambiente como a través del sistema respiratorio, y la composición química interviene directamente sobre los efectos en la salud.

El PM está constituido por una variedad de sustancias incluyendo compuestos orgánicos, óxidos de silicio, sulfatos, nitratos, amonio. En forma típica, las partículas interactúan con diferentes compuestos presentes en el aire y de esta manera da lugar a compuestos orgánicos e inorgánicos. La combinación más común de las partículas finas es con los sulfatos. (Morales, R. 2006. Pp: 107-108)

El material particulado que causa grandes daños significativos en el medio ambiente y en la salud varían de tamaño de 0.01-10 μ , los cuales son mucho menores que el diámetro fino de un cabello. Los contaminantes industriales en partículas (por ejemplo la molienda del Clinker, que tiene un tamaño de 3 – 400 μ) estos se pueden crear de forma mecánica, pero la mayor parte de los procesos de trituración y molido no producen partículas con tamaño menor de 10 μm .

1.2 Clasificación del material particulado

El material particulado es una mezcla de partículas sólidas finas y gotas líquidas suspendidas en el aire. Se presenta de dos formas: sólido en forma de polvo, ceniza u hollín; y líquido como aerosol o sólidos suspendidos en mezclas líquidas. Su tamaño varía de 0.01 a 100.0 μm , se divide en polvo fino (menor de 100 μm de diámetro), polvo grueso (mayor de 100 μm de diámetro), vapores (0.01-1.00 μm de diámetro) y neblinas (0.1-10.0 μm de diámetro).

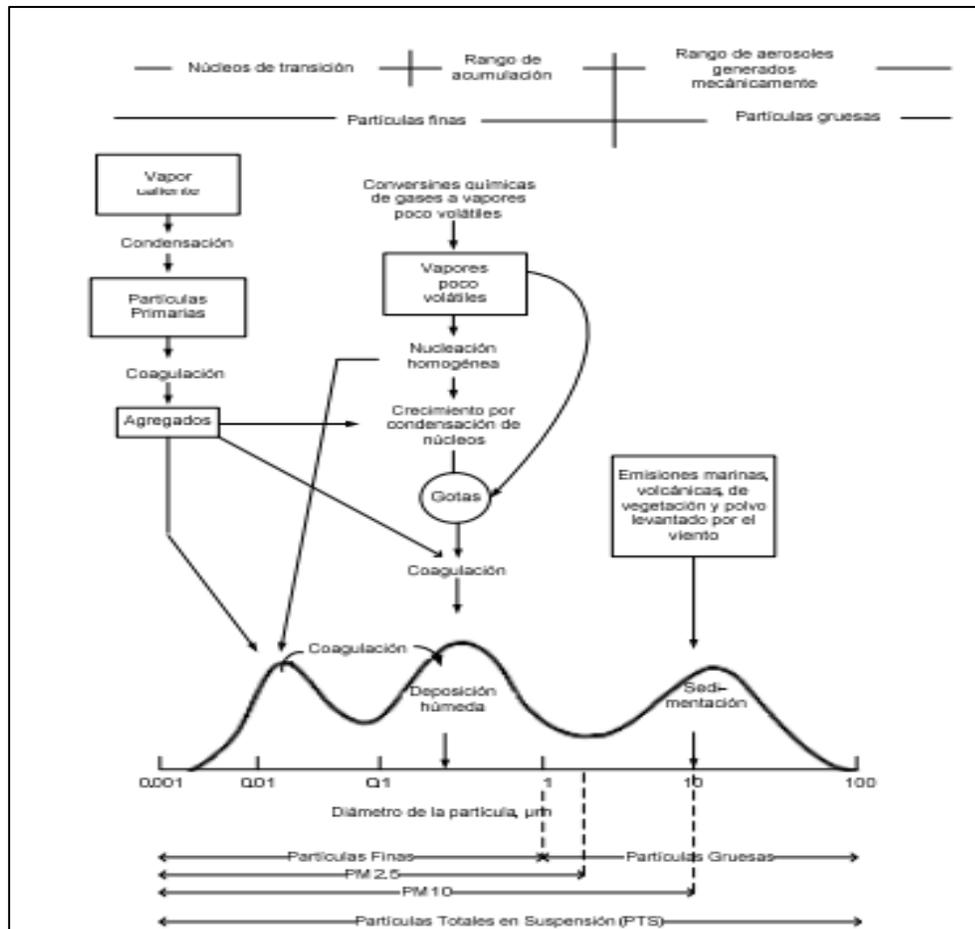


Figura N° 1-1 Distribución de tamaño de partículas atmosféricas
Fuente. (Nevers., 1997.Pp.439)

1.2.1 Partículas gruesas (PM10)

Se refiere al conjunto de partículas de tamaño inferior a las de $10 \mu m$. La mayoría de estas partículas tienen su origen en procesos de erosión de la superficie terrestre o forman parte de las emisiones marinas y debido a su mayor tamaño suelen alcanzar la superficie de sedimentación.

Las partículas más grandes (de $10 \mu m$ a $100 \mu m$) se generan en forma mecánica; algunas provienen de fuentes industriales. La mayor parte de estas partículas son removidas gracias a la sedimentación por la gravedad.

Las PM_{10} pueden permanecer en la atmósfera desde minutos hasta horas y pueden llegar hasta una distancia de 10 Km. (Gallego, A. 2012. Pp.84)

1.2.2. Partículas finas (PM 2,5)

Son las partículas con un diámetro inferior a $1\mu m$ o inferior a $2,5\mu m$ respectivamente a las partículas finas se las denomina $PM_{2,5}$. En general son las consideradas más nocivas para la salud humana, además de su composición se encuentran elementos tóxicos, como metales pesados. Las partículas finas lo constituyen cenizas, partículas orgánicas y partículas generadas por condensación de otros contaminantes en la atmosfera. Al ser tan pequeñas, su tiempo de resistencia en suspensión en la atmosfera es elevado y pueden ser transportados a miles de kilómetros de su origen. (Gallego, A.2012.Pp.84).

1.3 Clasificación de las fuentes de emisión de partículas

El material particulado puede ser de origen natural o de origen antropogénico y estas son emitidas directamente por fuentes primarias o pueden crearse en la atmósfera mediante precedentes gaseosos considerados fuentes secundarias.

1.3.1. Fuentes naturales de material particulado

La contaminación generada por fuentes naturales es menor que por origen antropogénico. Algunas partículas provienen de fuentes naturales tales como partículas provenientes de erupciones volcánicas, así como el arrastre de partículas derivados de la erosión del suelo. Las partículas generadas por fuentes naturales tienden hacer gruesas por lo que el periodo de tiempo de permanencia es corto.

Como por ejemplo tenemos las fuentes Geológicas, estas se refieren al material particulado que queda flotando en el aire debido a la actividad minera, procesos de construcción y del polvo arrastrado por el viento. (Álvarez, M.2014. <http://bibdigital.epn.edu.ec>)

Entre los procesos importantes que emiten material particulado se encuentra la industria cementera en la mayoría de los procesos se genera partículas de tamaño superior a 2.5μ .

1.3.2. Fuentes antropogénicas de material particulado

La mayoría de las fuentes antropogénicas emiten partículas finas con un diámetro menor a $10\ \mu\text{m}$, la mayor parte de las partículas es generado por fuentes primarias, es decir en procesos de combustión, como lo es la incineración de quema de combustible fósil para generar vapor y este ser utilizado en procesos industriales de extracción y transformación.

Las partículas que son generadas en las fuentes primarias incluyen elementos tóxicos, en comparación con las partículas emitidas por fuentes naturales.

1.3.2.1. Fuentes Fijas

Las fuentes fijas son aquellas que la emisión se produce en un solo sitio, estas se localizan en los procesos industriales de combustión las cuales ocasionan una gran cantidad de material particulado que es emitido por chimeneas o ductos.

1.3.2.2. Fuente Móviles

Estas fuentes móviles son generadores de sustancias nocivas para la salud, que al llegar a la atmósfera dan lugar a partículas secundarias a través de reacciones químicas. Entre algunos contaminantes secundarios son el ácido sulfúrico, ácido nítrico, siendo el más relevante el ozono troposférico. (Lozada, H. 2006. Pp.5-6)

1.4. Efectos del material particulado

1.4.1. Reducción de visibilidad

La reducción de visibilidad es un problema frecuente que se da en el medio ambiente por las partículas y la luz solar directa.

Las partículas comprendidas entre 0.4 y 0.8 micras, provocan interferencia en la transmisión de la luz en el aire, reducción de la claridad visual, visibilidad a largas distancias y cantidad de luz que llega al suelo, debido a que no permiten el paso de la luz, por la proximidad de su tamaño a la longitud de onda de la luz visible. (Álvarez, M. 2014. <http://bibdigital.epn.edu.ec>)

1.4.2 Efectos en la salud

Los efectos que las partículas causan en la salud de las personas a la exacerbación de enfermedades de tipo respiratorio, tales como la bronquitis, y más recientemente también se han analizado y demostrado sus efectos sobre dolencias de tipo cardiovascular.

En el caso de las PM 2,5 su tamaño hace que sean 100% respirables ya que viajan profundamente en los pulmones, penetrando en el aparato respiratorio y depositándose en los alvéolos pulmonares, incluso pueden llegar al torrente sanguíneo. Además estas partículas de menor tamaño están compuestas por elementos que son más tóxicos (como metales pesados y compuestos orgánicos) que los que componen, en general, las partículas más grandes. (Linares, C. 2008. Pp.10-11)

Las partículas PM 2,5 por tanto, se pueden acumular en el sistema respiratorio y están asociadas, cada vez con mayor consistencia científica, con numerosos efectos negativos sobre la salud, como el aumento de las enfermedades respiratorias y la disminución del funcionamiento pulmonar. Los grupos más sensibles a los niños, ancianos y personas con padecimientos respiratorios y cardíacos—corren más riesgo de padecer los efectos negativos de este contaminante. (Linares, C. 2008. Pp.10)

1.4.3. Tracto respiratorio y las partículas

Los tóxicos que normalmente se absorben a través de los pulmones son gases, (monóxido de carbono, bióxido de nitrógeno, bióxido de azufre, etc.), vapores de líquidos volátiles (benceno, tetracloruro de carbono, etc.), y partículas suspendidas en el aire (polvos y aerosoles). Los pulmones son dos órganos que se encuentran en la cavidad torácica en un espacio que se denomina espacio intrapleural. (Carlos E. 2001. Pp.50-63)

Los pulmones están formados por dos unidades:

- La unidad de conducción de aire, compuesta por tráquea, bronquios y bronquiolos, se Encarga de mover el aire hacia adentro y fuera de los pulmones.
- La membrana alveolar-capilar que se encarga del intercambio gaseoso (bióxido de carbono por oxígeno).

La tráquea, los bronquios y los bronquiolos tienen una estructura cartilaginosa que permite mantener todas estas ramificaciones abiertas. Los bronquiolos además dependen de la estructura muscular de las células circundantes para mantenerse abiertos. La unidad alveolar está formada por dos áreas, el área gruesa, de estructura proteica incluyendo colágeno y fibras de elastina, que se encarga del intercambio de fluidos, y el área delgada que se encarga del intercambio gaseoso. (Carlos E. 2001. Pp.54)

El PM_{10} se deposita en la región traqueo bronquial, en un tiempo de 2 días, contribuyendo al aumento de enfermedades respiratorias como el asma y la bronquitis, mientras que partículas menores a 2,5 micras pueden alcanzar la cavidad alveolar, por lo las zonas que se encuentran en riesgo son los bronquiolos, donde existe una estructura de intercambio gaseoso.

Si las partículas logran llegar a los bronquiolos puede generar una acción agresiva en la zona local dando lugar a la neumoconiosis o pasar al torrente sanguíneo. (Falagán M. 2013. <http://www.inpahu.edu.co>)

1.5 Separadores de partículas

Los separadores de partículas son equipos o dispositivos de control de emisión de partículas al medio ambiente para evitar que los gases, humos, vapores o polvos se emitan de forma directa que puedan provocar daños ambientales considerables en especial cuando se trabaja con sustancias tóxicas por tal razón la importancia de que existan sistemas filtradores y separadores de partículas.

El objetivo principal de los separadores de partículas es recolectar las partículas que se emiten en un proceso industrial antes de que estos ingresen a la atmósfera. Los separadores ciclónicos pueden ser varios tipos de acuerdo al sistema de separación que este emplee, las propiedades físicas de las partículas es un aspecto fundamental para seleccionar el dispositivo adecuado. Los dispositivos de control más utilizados para la separación de partículas son:

- Cámaras de sedimentación por gravedad.
- Separadores ciclónicos.

1.5.1 Cámaras de sedimentación por gravedad

Los equipos por gravedad o cámaras de sedimentación por gravedad son uno de los dispositivos más simples utilizados para la separación de polvo ya que la única fuerza que utiliza es la del peso de las partículas en un flujo de gas con una velocidad baja.

Consiste en hacer entrar al gas a una cámara de gran sección, por lo cual disminuye su velocidad de tal forma que el tiempo de permanencia de la partícula en la cámara es suficiente para sedimentarse. Es un método válido para partículas en la cámara cuya velocidad de sedimentación sea mayor a 13 cm/s lo que suele dar en las de tamaño relativamente grande (superior a $50 \mu m$) si la densidad de la partícula es baja y en las de tamaño inferiores, incluso de orden de $10 \mu m$, si la densidad es más alta.

Se puede calcular la velocidad de sedimentación mediante la ecuación de Stokes y determinarse el tamaño de la cámara de sedimentación para una partícula de tamaño dado ya que la eficiencia de recolección varía en función del tamaño de partícula y del diseño de la misma, la eficacia del proceso suele ser aproximadamente el 50 % en estos dispositivos.

Las ventajas de este dispositivo de separación es su sencillo proceso de diseño y mantenimiento además de que el coste energético y la pérdida de carga son bajos. Sin embargo puede constituir un problema debido al gran espacio superficial que necesita, de acuerdo con estas características estas cámaras de sedimentación se emplean para la limpieza de cargas de altos volúmenes.

En la **figura N° 2-1** se representa el esquema de un sedimentador por gravedad, la longitud (L) y la altura (H) de la cámara deben diseñarse en función de la velocidad del gas (V) y del tamaño de la partícula. Se calcula que el tiempo mínimo para que una partícula recorra la altura H y por tanto caiga y se elimine de la corriente gaseosa debe ser menor que el tiempo requerido para moverse horizontalmente la longitud L. (Delgado M. 2003. Pp. 389)

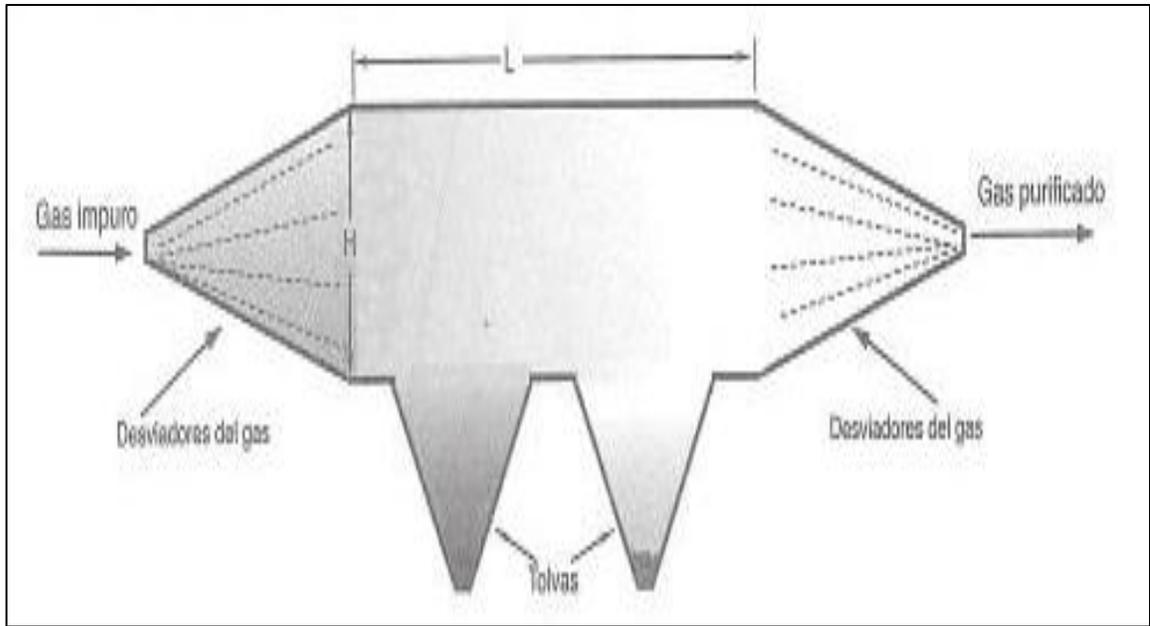


Figura N° 2-1. Cámara de sedimentación por gravedad
Fuente: (Delgado M. 2003. Pp. 398)

1.5.2 Separadores ciclónicos

El funcionamiento del separador ciclónico no está completamente entendido. Los separadores ciclónicos son los dispositivos de menor costo en la recolección de polvo desde el punto de inversión y operación, ya que los rubros de inversión son de menor costo frente a otros equipos como filtros de talegas y precipitadores electrostáticos. Debido a su sencillez el rubro menos costoso es el valor económico de la electricidad para vencer la caída de presión a través del separador ciclónico.

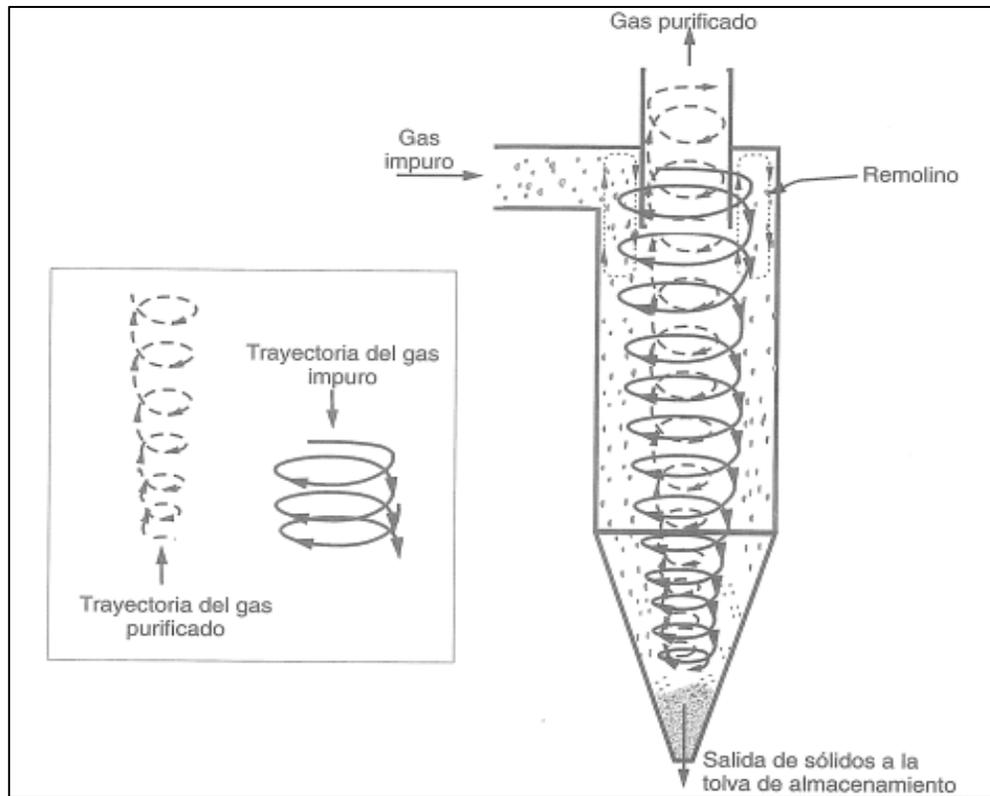


Figura N° 3-1. Esquema de un separador ciclónico.

Fuente: (Delgado M. 2003. Pp. 399)

1.5.2.1 Teoría del funcionamiento de los separadores ciclónicos

Los ciclones, son dispositivos que remueven las partículas transportados por una corriente gaseosa que se basa en el principio de impacto inercial generada por una fuerza centrífuga dentro del conducto entre sus aplicaciones utiliza en la limpieza de material particulado y gases donde se produce un ambiente agresivo como por ejemplo en la sedimentación de polvo en concentraciones superiores a $5g/m^3$.

En la siguiente figura se presenta como las partículas se mueven a las paredes del separador ciclónico ya que la fuerza centrífuga dentro del dispositivo la aceleración gravitacional se cambia con la aceleración centrífuga.

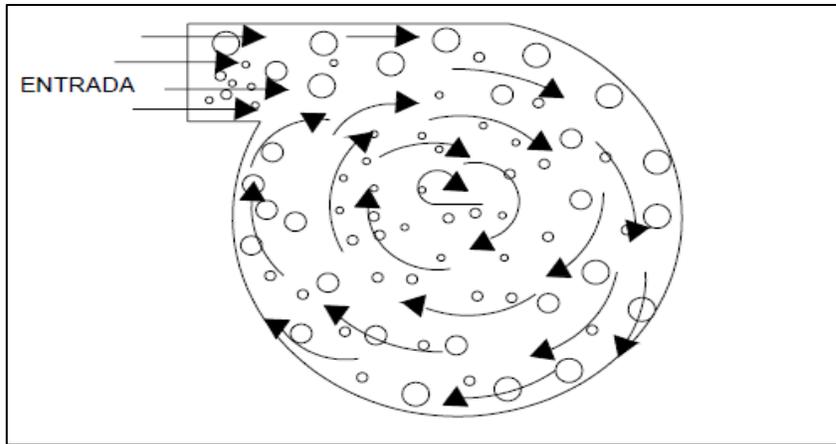


Figura N° 3-1 Mecanismos de recolección de partículas en un ciclón
Fuente: (Londoño, C. 2006. Pp.2)

Una partícula al interior del separador ciclónico es sometida a una fuerza centrífuga (F_c) que es debida a la aceleración centrífuga y a la masa de la partícula. Esta fuerza centrífuga es balanceada por una fuerza opuesta que es creada debido a la gradiente de presión estática a lo largo de la dirección radial, esta fuerza (fuerza de arrastre F_d) actúa hacia el eje de rotación y mantiene a la partícula en su trayectoria. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11)

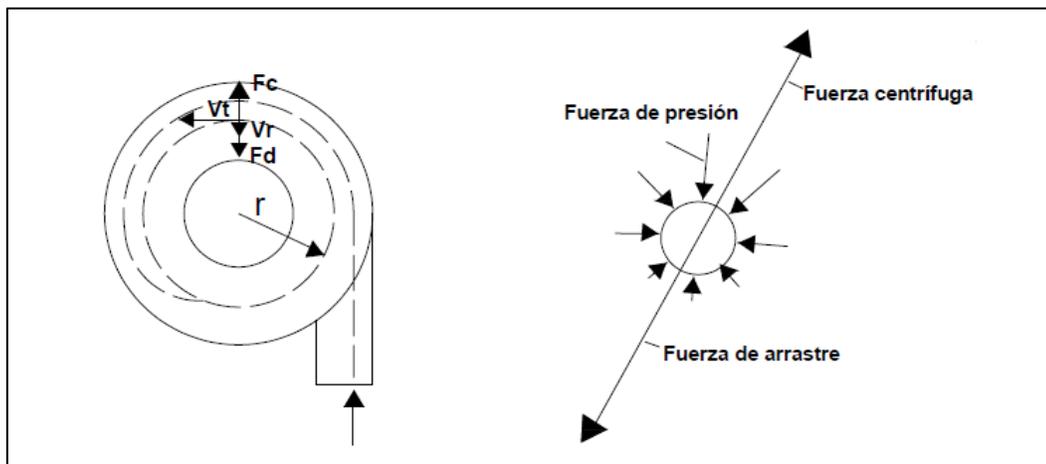


Figura N° 4-1. Fuerzas que actúan sobre una partícula dentro del separador ciclónico
Fuente: (Londoño, C. 2006. Pp.3)

En la **Figura N° 4-1** Se observa que la fuerza que se dirige hacia el exterior procede sobre la partícula incrementando el componente tangencial de la velocidad además de la fuerza ejercida en el interior del componente radial, por tanto se debe diseñar tomando en cuenta que la velocidad tangencial (V_t) sea la mayor posible y que la velocidad radial (V_r) se minimice.

Los separadores ciclónicos son adecuados para la separación de partículas que tengan un diámetro mayor a $5 \mu\text{m}$; aunque en algunos casos se pueden remover partículas más pequeñas.

La eficiencia del separador ciclónico es muy alta, sin embargo, se observa que las partículas de tamaño menor al mínimo calculado son capturadas mientras que otras mayores salen en la corriente de gas. Esto implica que existen factores que interfieren la correcta captura de las partículas, como colisiones entre las partículas y turbulencia que afectan de manera directa en la eficiencia del dispositivo. En la siguiente figura se tiene los distintos valores de eficiencia para distintos diámetros de la partícula.

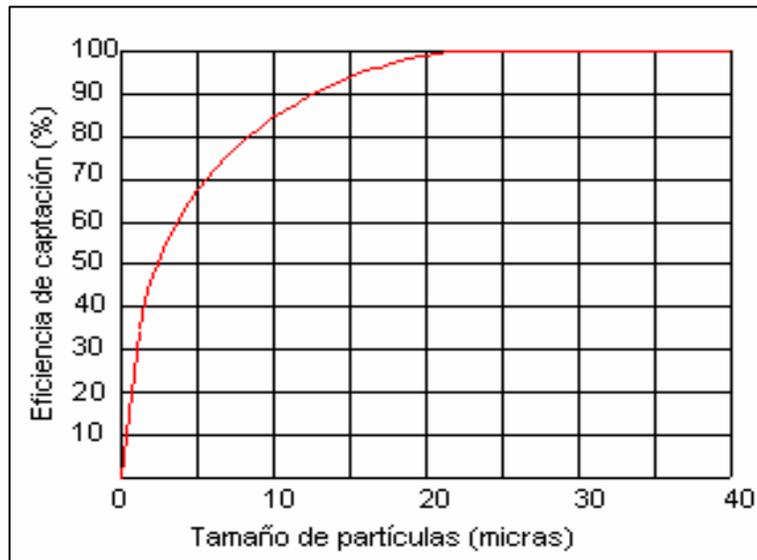


Figura N° 5-1 Curva de eficiencia de captación de un ciclón.

Fuente: (Londoño, C. 2006. Pp.2)

Teóricamente cuando existe un aumento en la velocidad de entrada de la corriente de gas al separador ciclónico implica un aumento sustancial de la fuerza centrífuga lo que deriva en un aumento de la eficiencia del mismo, sin embargo velocidades de entrada demasiado altas generan una resuspensión de las partículas de las paredes internas del separador ciclónico lo cual provoca una menor eficiencia, adicional a esto cuando se aumenta la velocidad de entrada genera un mayor consumo de energía.

Estos separadores ciclónicos son de sencilla construcción que no cuentan con partes móviles por lo cual facilita la operación de mantenimiento, y de acuerdo al material que está construido puede soportar condiciones ásperas de operación y trabajar temperaturas que ascienden incluso a los 1000°C .

Además del uso para el control de la contaminación, los ciclones se usan ampliamente en varios procesos de las industrias; por ejemplo, en la recuperación y reciclaje de ciertos catalizadores en refinerías de petróleo y para recuperar el café liofilizado en plantas dedicadas a la transformación de alimentos. En tiempo pasado, los separadores ciclónicos se han visto como recolectores de baja eficiencia, sin embargo, su eficiencia varía considerablemente de acuerdo al tamaño de la partícula y el diseño del separador ciclónico.

1.5.2.2 *Clasificación de los separadores ciclónicos*

Existen varios tipos de ciclones todos ellos tienen como fundamento la de una corriente de torbellinos en el interior del ciclón lo que provoca que las partículas pierdan energía por el choque con las paredes del dispositivo y terminen depositándose.

Los separadores ciclónicos existen de varios tipos los cuales están determinados por características propias de estos dispositivos. Una de las características para clasificar estos dispositivos es la configuración de entrada de la corriente de gas y las partículas la cual puede ser tangencial o axial dentro de los ciclones con entrada tangencial se tienen los siguientes.

1.5.2.2.1 *Ciclones con entrada circular o de tipo tubo*

Tales entradas se encuentran típicamente en ciclones de bajo costo construidas a partir de metal sheet en el cual el rendimiento de separación es aceptable. Muchos talleres de madera y procesamiento de granos están diseñados con este tipo de tecnología. A diferencia de las entradas de tipo ranura que se describen a continuación, las entradas de tipo tubo eliminan la necesidad de fabricar una ronda a la sección de transición de la entrada rectangular.

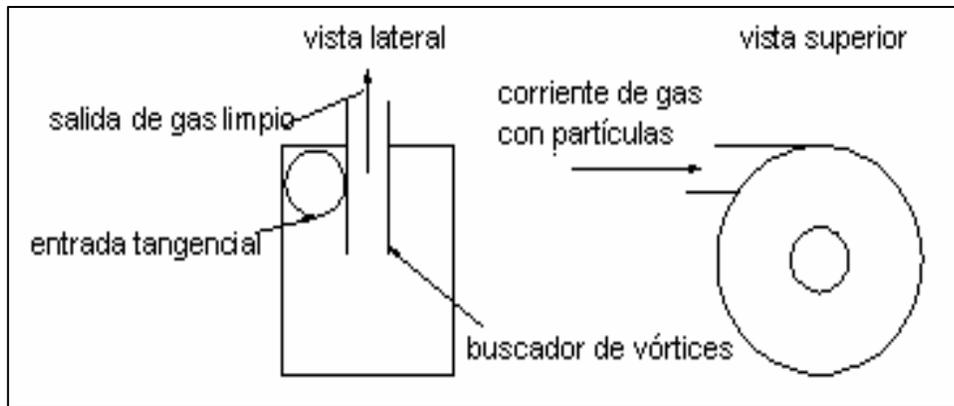


Figura N°6-1 Ciclones con entrada circular
Fuente. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.12)

1.5.2.2.2 *Ciclones con entrada rectangular*

Entrada rectangular o entrada tipo ranura. Esta entrada es la más utilizada en la industria química y de procesamiento de petróleo. Tiene una entrada tangencial en lugar de la axial, normalmente no son difíciles de construir, y por lo general dan buen rendimiento. Desde el punto de fabricación a menudo se prefiere que la parte superior de la entrada se encuentra ligeramente por debajo de la línea del techo, en lugar que este en la misma elevación que la línea del techo, sin embargo, la presencia de tales anillos no parece influir significativamente en el rendimiento del ciclón.

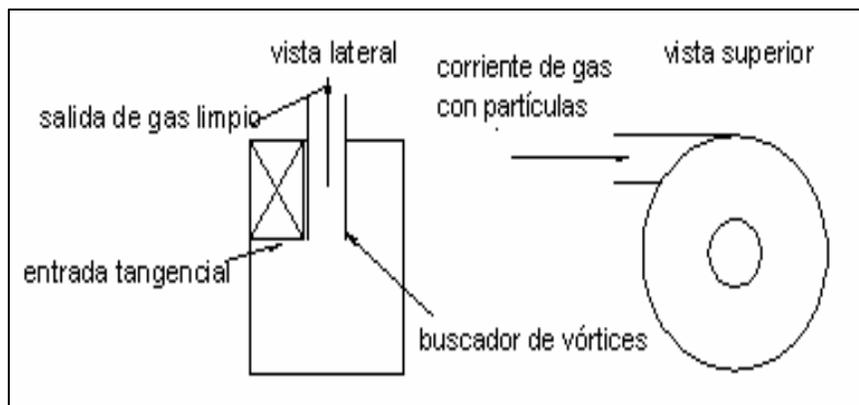


Figura N° 7-1 Ciclones con entrada rectangular
Fuente: (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11)

1.5.2.2.3 Ciclones con entrada tipo voluta o en espiral

En este tipo de entrada el flujo de gas es gradualmente estrechado como el área disponible para disminuciones de flujo, por lo tanto, se somete a una aceleración del espacio principal de la separación. Dado que el radio de entrada de desplazamiento es mayor que la de cualquiera de los otros tipos de entrada, en este tipo de entrada se produce un mayor momento angular de entrada y, como consecuencia, una velocidad de centrifugado más alta dentro del núcleo interior del vórtice. Por lo tanto, una entrada de desplazamiento es una manera de darse cuenta de la mayor parte de los beneficios de un ciclón más grande de cuerpo sin tener que fabricar una sección de barril de diámetro y el cono más grande. Se prefiere en geometrías con un amplio localizador de torbellino, ya que el gas entrante y mezcla sólida no serán entonces un impacto en la pared del localizador de torbellino. Entradas de desplazamiento también son ampliamente utilizados en los ciclones altos de sólidos cargados en el que una gran fracción de los sólidos entrantes se separa dentro de la sección de desplazamiento. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11,12)

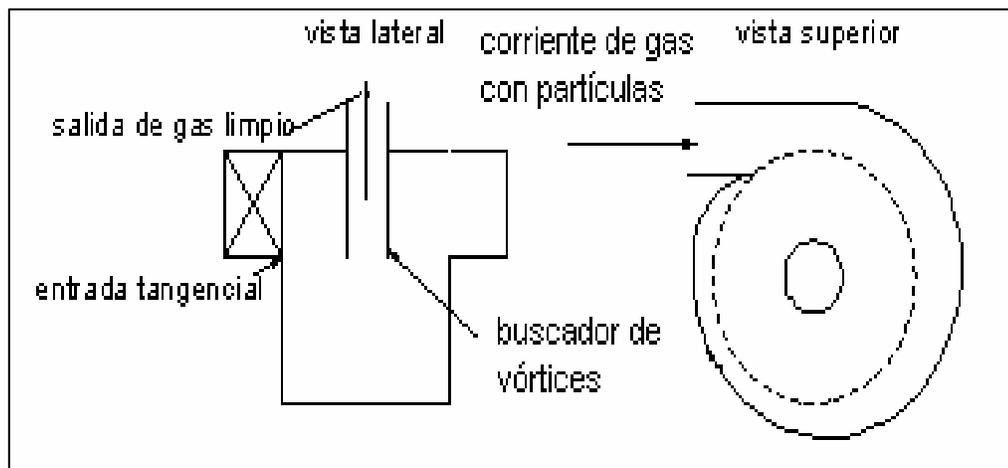


Figura N° 8-1 Ciclones con entrada tipo voluta o en espiral
Fuente. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11)

1.5.2.2.4 Ciclones con entrada axial

Los ciclones con entrada axial cuentan con un arreglo de paletas en espiral a la entrada

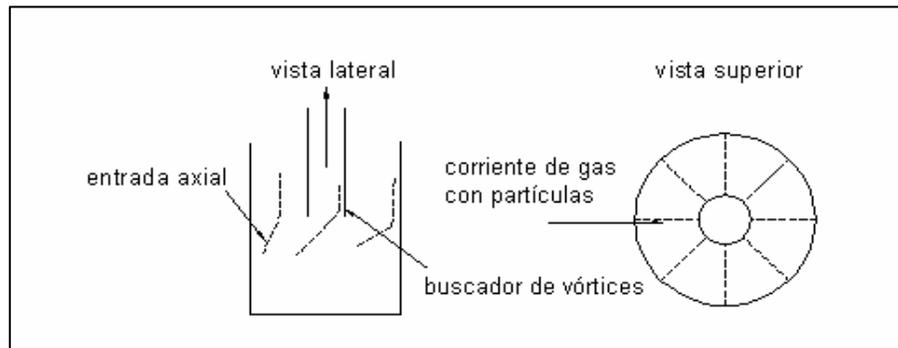


Figura N° 9-1 Separador ciclónico con entrada de gas axial

Fuente. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11)

Otra característica utilizada en las clasificaciones de los separadores ciclónicos es la forma de su cuerpo en la cual encontramos de dos tipos.

- a) Cilindro sobre cono
- b) Únicamente cilíndrico

Cuando el gas abandona el ciclón a través de la parte superior del equipo se le llama flujo inverso. Cuando el gas abandona el ciclón por la parte inferior se la llama uni-flujo. En la Figura N° se muestran los dos tipos de flujo de salida de gas. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11)

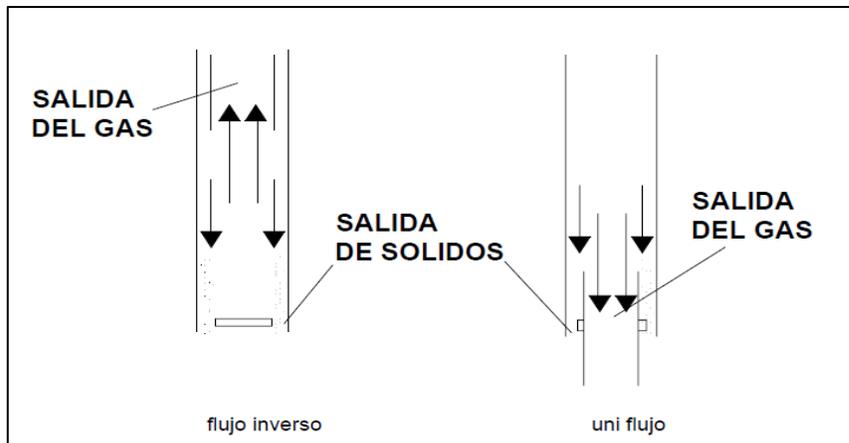


Figura N° 10-1 Tipos de salida de gas y las partículas en los ciclones
Fuente. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.11, 12)

Los separadores ciclónicos con entrada tangencial son los que se utilizan en la industria para la separación de partículas transportadas por una corriente de aire por medio de la fuerza centrífuga. Dichos dispositivos constan esencialmente de un cuerpo de sección cilíndrica (3) al que está unida una base cónica (2) para facilitar la descarga de sólidos. El gas sucio entra en dirección tangencial por la parte superior del ciclón (1). Las partículas son separadas de la corriente gaseosa por fuerzas centrífugas, descendiendo helicoidalmente hacia el conducto de salida (4). El gas invierte su trayectoria saliendo finalmente por un conducto situado en la parte superior (5), denominado “vortexfinder” o “buscador de vórtices”, como se muestra en la figura. N° 11-1. (Martinez G. 2000. Pp.97)

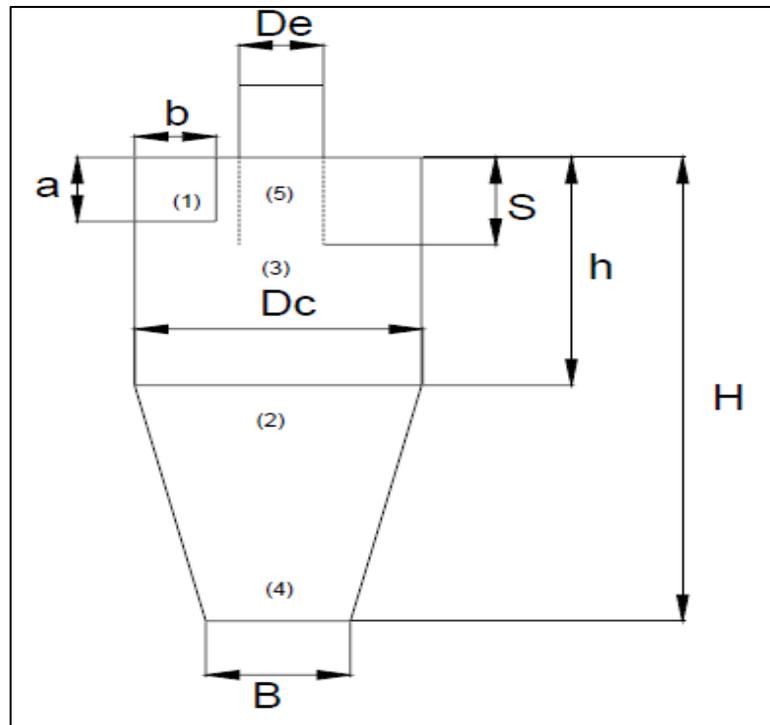


Figura N° 11-1 Partes principales de un separador ciclónico.
Fuente: (Martinez G. 2000. Pp.97)

Tabla N° 1-1 Dimensiones principales de un separador ciclónico.

Partes de un separador ciclónico	
De	Diámetro del buscador de vórtices
Dc	Diámetro del cuerpo del cilindro del ciclón
A	Altura de la entrada tangencial
B	Ancho de la entrada tangencial
S	Altura del buscador de vórtices
H	Altura del cuerpo del cilindro del ciclón
H	Altura del separador ciclónico
B	Diámetro del ducto de descarga del separador ciclónico

Fuente: Modelo Experimental de flujo frío del ciclón primario de una planta de lecho fluido a presión . Martinez, Gil Antonia

Entre las principales familias de los separadores ciclónicos de entrada tangencial están los siguientes:

- Ciclones de alta eficiencia
- Ciclones convencionales
- Ciclones de alta capacidad

Los separadores ciclónicos de alta eficiencia tienen un diseño que permite una mayor remoción de las partículas pequeñas con relación a los ciclones convencionales. Los separadores ciclónicos de alta eficiencia logran una remoción aproximada del 90 % de partículas de 5 μm y un mayor porcentaje con partículas más grandes.

Estos separadores ciclónicos de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión por lo cual requieren mayor gasto de energía para remover las partículas a través del separador ciclónico, el diseño tiene una limitación específica de caída de presión en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control específica.

Los separadores ciclónicos de alta capacidad tienen una eficiencia garantizada en la remoción de partículas mayores a los 20 μm , aunque en ocasiones se remueva partículas más pequeñas.

Tabla N° 2-1 Eficiencia de remoción de los separadores ciclónicos de entrada tangencial

Eficiencia de remoción (%)			
Familia de ciclones	Total de partículas	PM10	PM2,5
Convencionales	70-90	30-90	0-40
Alta eficiencia	80-99	60-95	20-70
Alta capacidad	80-99	10-40	0-10

Fuente: Modelo Experimental de flujo frío del ciclón primario de una planta de lecho fluido a presión, Martínez, Gil Antonia
Realizado por: Lobato G, Castillo F. 2015

A continuación se presenta parámetros adimensionales de los separadores ciclónicos de entrada tangencial.

Tabla N° 3-1 Características de los ciclones convencionales

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de separador ciclónico			
		Lapple	Swift	Peterson Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	Dc	1,0	1,0	1,0	1,0
Altura de entrada	A	0,5	0,5	0,583	0,5
Ancho de entrada	B	0,25	0,25	0,208	0,25
Altura de salida	S	0,625	0,6	0,583	0,75
Diámetro de salida	Ds	0,5	0,5	0,5	0,5
Altura parte cilíndrica	H	2,0	1,75	1,333	2,0
Altura parte cónica	Z	2,0	2,0	1,837	2,0
Altura total del ciclón	H	4,0	3,75	3,17	4,0
Diámetro de salida partículas	B	0,25	0,4	0,5	0,25
Factor de configuración	G	402,88	381,79	342,29	425,41
Número de cabezas de velocidad	NH	8,0	8,0	7,76	8,0
Número de vórtices	N	6,0	5,5	3,9	6,0

Fuente: Diseño óptimo de los ciclones, Echeverri, Carlos

Realizado por : Lobato G, Castillo F. 2015

Tabla N° 4-1 Características de los ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de separador ciclónico		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc	1,0	1,0	1,0
Altura de entrada	a	0,5	0,44	0,5
Ancho de entrada	b	0,2	0,21	0,2
Altura de salida	S	0,5	0,5	0,625
Diámetro de salida	Ds	0,5	0,4	0,5
Altura parte cilíndrica	h	1,5	1,4	1,5
Altura parte cónica	z	2,5	2,5	2,5
Altura total del ciclón	H	4,0	3,9	4,0
Diámetro de salida de partículas	B	0,375	0,4	0,375
Factor de configuración	G	551,22	698,65	585,71
Número de cabezas de velocidad	NH	6,4	9,24	6,4
Número de vórtices	N	5,5	6,0	5,5

Fuente: Diseño óptimo de los ciclones, Echeverri, Carlos.

Realizado por : Lobato G, Castillo F. 2015

Tabla N° 5-1 Características de los ciclones de alta capacidad

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de separador ciclónico	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	Dc	1,0	1,0
Altura de entrada	a	0,75	0,8
Ancho de entrada	b	0,375	0,35
Altura de salida	S	0,875	0,85
Diámetro de salida	Ds	0,75	0,75
Altura parte cilíndrica	h	1,5	1,7
Altura parte cónica	z	2,5	2,0
Altura total del ciclón	H	4,0	3,7
Diámetro de salida de partículas	B	0,375	0,4
Factor de configuración	G	29,79	30,48
Número de cabezas de velocidad	NH	8,0	7,96
Número de vórtices	N	3,7	3,4

Fuente: Diseño óptimo de los ciclones, Echeverri, Carlos. 2012

1.6 Perfiles de velocidad del separador ciclónico

Los campos de velocidad de los separadores ciclónicos han sido mediante hilo caliente, tubos de Pitot y en la actualidad el Láser Doppler. La **Fig. N°12-1** (a, b, c) indica el separador ciclónico de entrada tangencial, donde el patrón de movimiento muestra los perfiles radiales de los componentes de velocidad axial y tangencial en la cual el primero muestra la región exterior en dirección de flujo axial descendente y la zona inferior en dirección de flujo axial ascendente.

Como se acaba de señalar la velocidad dirigida hacia la parte inferior del separador ciclónico es el mecanismo para el transporte de la partícula fuera del separador ciclónico. La velocidad radial es mucho menor que la velocidad tangencial y más difícil de medir de manera precisa.

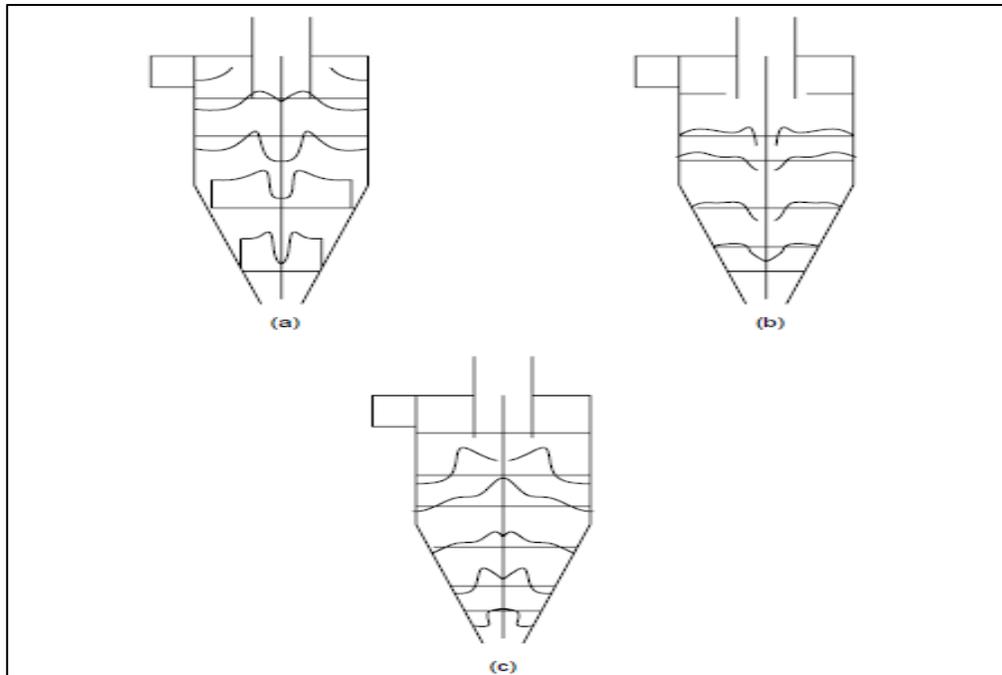


Figura N° 12-1 Perfiles de velocidad de un ciclón (a) tangencial (b) radial (c) axial
Fuente. (A.C. Hoffmann. 2002. Pp.12)

1.7 Separación de partículas en un ciclón. Modelos de eficiencia

Los modelos de eficiencia teóricos se apoyan en el análisis de fuerzas que actúan sobre una partícula en la parte interna del ciclón entre ellas poseemos:

- Campo gravitatorio despreciable con dependencia al centrífugo.
- Densidad del gas despreciable con relación a las partículas.
- La velocidad de una partícula es radial.

Con las hipótesis antes mencionadas, la ecuación de movimiento de una partícula que gira dentro del ciclón en una posición es la siguiente:

$$\frac{\pi d_p^3}{6} \frac{du_\gamma}{dt} = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_s \frac{v_t^2}{r} - 3\pi\mu d_p (u_\gamma - v_\gamma) \quad (1.1)$$

El término $\frac{\pi d_p^3}{6} \frac{du_\gamma}{dt}$ es la fuerza centrípeta sobre la partícula

El término $\frac{\pi d_p^3}{6} \rho_s \frac{v_t^2}{\gamma} - 3\pi\mu d_p (u_\gamma - v_\gamma)$ es la fuerza de arrastre

1.7.1. Modelo de lapple

Este modelo sirve para el cálculo de las cámaras de sedimentación. El modelo de Lapple toma una posición inicial de las partículas en medio del conducto de entrada ($b/2$). Al suponer una distribución uniforme en la entrada del conducto, el tiempo de permanencia del gas en el ciclón será captado con una eficiencia del 50%.

El tamaño de corte se puede calcular igualando el tiempo de permanencia del gas dentro del ciclón con el tiempo que la partícula llega a la pared.

Se calcula el tiempo de residencia de la siguiente manera:

$$t_g = \frac{D_c N_c}{v_{gi}} \quad (1.2)$$

Donde N_c es la cantidad de revoluciones que realiza la corriente gaseosa en el ciclón. Mientras que el tiempo que se demora en llegar la partícula a la pared del ciclón t_s :

$$t_s = \frac{b/2}{u_s} = \frac{b/2}{\frac{d_p^2 \rho_s v_{gi}^2}{9\mu D_c}} \quad (1.3)$$

Donde u_s es la velocidad de sedimentación de la partícula, el diámetro crítico de la partícula d_{p50} se obtiene al igualar las ecuaciones (1.2) y (1.3)

$$d_{p50} = \sqrt{\frac{9\mu_g b}{2\pi\rho_s v_{gi} N_c}} \quad (1.4)$$

Donde N_c es un valor empírico que varía con el diseño del ciclón (el valor oscila entre 1-10, siendo un el valor típico 5). Si no se dispone de valores experimentales de éste, se puede utilizar para su estimación la ec. (1.3) (Martinez G. 2000. Pp. 98)

$$N_c = \frac{h+(H-h)/2}{a} \quad (1.5)$$

La limitación del modelo de Lapple se basa en la velocidad tangencial en el ciclón e igual a la velocidad de entrada, varia, por ende la sedimentación de las partículas no es de forma uniforme.

1.8 Extracción de sólidos de los ciclones

Todo ciclón, necesita evacuar completamente las partículas que se sedimentan, por lo que se ha desarrollado una serie de dispositivos, uno de ellos es colocar una tolva donde se recoge los sólidos. La utilización de la tolva provoca la entrada de sólidos hacia el gas limpio y por ende la eficiencia del separador ciclónico disminuye. Se instala discos o conos deflectores para solucionar el problema de la tolva. Otra forma para solucionar el problema de la tolva es colocar una válvula pero se debe tener cuidado porque se puede provocar atascos por la acumulación del material.

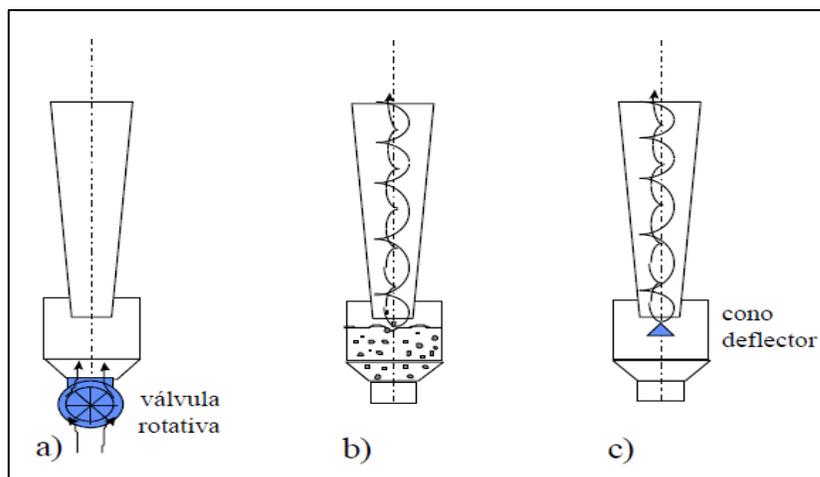


Figura N° 13-1 Dispositivos comunes de Extracción de Sólidos de un Ciclón
Fuente. (Martinez G. 2000. Pp. 98)

1.9 Diseño

Los caudales típicos de aire para unidades de un solo ciclón son de 0.5 a 12 m^2/s a condiciones de referencia. Los ciclones deben cumplir parámetros para asegurar una alta eficiencia en la remoción de material particulado de aire. (Londoño C. 2006. Pp.2)

$$D_c < 1m$$

$$\Delta p < 2488.16 Pa$$

$$\frac{V_i}{V_s} < 1.35$$

$$V_i = \frac{9m}{seg} - \frac{27.4m}{seg}$$

Dónde:

D_c = Diámetro del ciclón o colector

Δp = Caída de presión.

V_i = Velocidad de entrada al ciclón

V_s = Velocidad de saltación

Velocidad de entrada al ciclón: De acuerdo con el monitoreo in- situ de la chimenea principal de la planta 2 de la Union Cementera Nacional

$$V_i = 13.82m/seg$$

1.9.1. Tipo de ciclón

Se ha escogido el separador ciclónico de alta eficiencia Stairmand. Este tipo de ciclón está diseñado para alcanzar una alta remoción de material particulado. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5 micras con una eficiencia de 90% y alcanzando una mayor eficiencia con partículas mayores. (Londoño C. 2006. Pp.3)

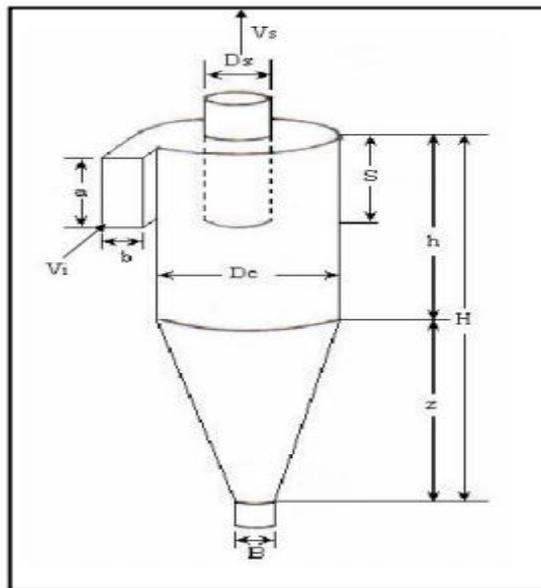


Figura N°14-1 Separador Ciclónico de alta eficiencia

Fuente: (Londoño C. 2006. Pp.1)

1.9.1.1 Cálculo del diámetro

El separador ciclónico se lo realizara con acero inoxidable que por referencias comerciales es de 244cm por 120 cm teniendo un espesor de 0.50mm el cual sirve para equipos de procesamiento.

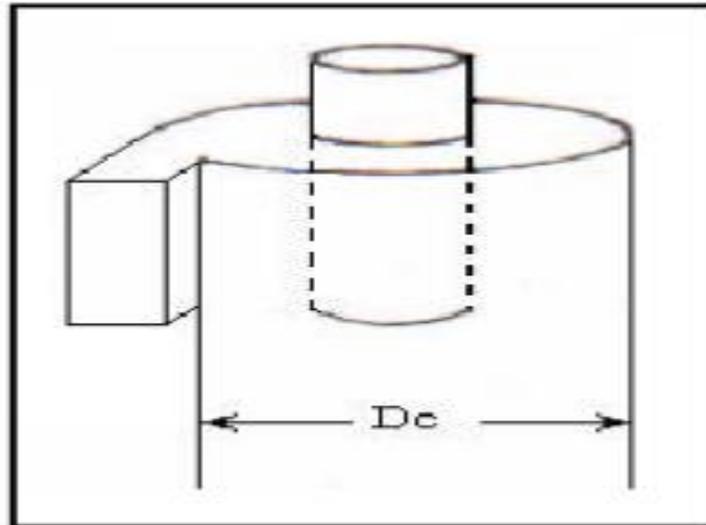


Figura N° 14-1 Separador ciclónico de alta eficiencia starman
Fuente: (A.C. Hoffmann, 2002. Pp 12)

$$Dc = \frac{P}{\pi} \quad \text{Ecu. [1.9.1.1-1]}$$

Donde:

P= Longitud de la plancha de acero

Dc= Diámetro del ciclón

1.9.1.2. Altura y ancho de entrada

Se procederá a utilizar la **Tabla 4**. Para dimensionar las fracciones constructivas del ciclón

1.9.1.2.1 Altura

$$\frac{a}{Dc} = 0.5 \quad \text{Ecu. [1.9.1.2.1-1]}$$

Donde:

a = Altura de Entrada (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.2.2 *Ancho*

$$\frac{b}{D_c} = 0.2 \text{ Ecu. [1.9.1.2.2-1]}$$

Donde:

b = Ancho de Entrada (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.3. *Altura y ancho de salida*

1.9.1.3.1 *Altura de salida*

$$\frac{S}{D_c} = 0.5 \text{ Ecu. [1.9.1.3.1-1]}$$

Donde:

S = Altura de salida (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.3.2 *Diámetro de salida*

$$\frac{D_s}{D_c} = 0.5 \text{ Ecu. [1.9.1.3.2-1]}$$

Donde:

D_s = Diámetro de salida (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.4. *Altura de la parte cilíndrica*

$$\frac{h}{D_c} = 1.5 \text{ Ecu. [1.9.1.4.1-1]}$$

Donde:

h = Altura de la parte cilíndrica (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.5. *Altura parte cónica*

$$\frac{z}{D_c} = 2.5 \text{ Ecu. [1.9.1.5.1-1]}$$

Donde:

z = Altura de la parte cónica (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.6. *Altura total del ciclón*

$$\frac{H}{D_c} = 4 \text{ Ecu. [1.9.1.6.1-1]}$$

Donde:

H = Altura total del ciclón (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.7. Diámetro de salida de mp

$$\frac{B}{D_c} = 0.375 \text{ Ecu. [1.9.1.7.1-1]}$$

Donde:

B = diámetro de salida del material particulado (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

1.9.1.8. Caudal de la corriente de aire

$$Q = A \times V_i \text{ Ecu. [1.9.1.8.1-1]}$$

$$A = a \times b \text{ Ecu. [1.9.1.8.1-2]}$$

Donde:

A = Área (m²)

b = Ancho de entrada (m/s)

a = Altura de entrada (m)

V_i = Velocidad inicial (m/s)

Q = Caudal de la corriente de aire (m³/s)

1.9.1.9. Velocidad equivalente

La velocidad equivalente es la que el material particulado entra al ciclón, se toma en cuenta las propiedades físicas del material particulado entre ellas la viscosidad y la densidad.

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\delta_p - \delta)}{3 \times \delta^2}} \text{ Ecu. [1.9.1.9.1-1]}$$

Donde:

$\delta_p =$ densidad de la partícula 2650 Kg/m^3

$\delta =$ densidad del gas portador 1.127 Kg/m^3

$\mu =$ Viscosidad del gas $1.9 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$

1.9.1.10. Velocidad de saltación

la velocidad de entrada en los ciclones es una medida de importancia; a velocidades muy bajas permiten que las partículas se sedimenten además de neutralizar el efecto de la fuerza centrífuga creando una baja eficiencia en la recolección de partículas; a velocidades muy altas las partículas pueden re suspender previamente colectadas, disminuyendo también la eficiencia.

Por ende se debe ocupar velocidades de entrada suficientemente alta para rendir el efecto de la aceleración centrífuga pero sin superar la velocidad para evitar que las partículas se re suspendan una vez sedimentadas.

La velocidad de saltación en un ciclón toma en cuenta parámetros como el diámetro de entrada, la velocidad inicial, las dimensiones del colector de entrada y la velocidad equivalente; cuando la velocidad de entrada es alta habrá la velocidad de saltación por lo cual la velocidad de saltación es un medida que se calcula para ver la relación con la velocidad de entrada y de esta manera evitar que las partículas se re suspendan.

$$V_S = \frac{4.913 \times W \times K_b^{0.4} \times D_c^{0.067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}} \text{ Ecu. [1.9.1.10.1-1]}$$

$$K_b = \frac{b}{D_c} \text{ Ecu. [1.9.1.10.1-2]}$$

Donde:

V_S = Velocidad de Saltación *m/s*

W = Velocidad equivalente *m/s*

K_b = Relación del ancho de entrada con respecto al diámetro del ciclón

V_i = Velocidad de entrada del gas al ciclón *m/s*

1.9.1.11. Volumen del ciclón evaluado sobre la salida

Para este parámetro se utilizara el volumen de la parte cilíndrica del ciclón restando el volumen de salida.

$$V_{SC} = \frac{\pi}{4} \left(S - \frac{a}{2} \right) * (D_c^2 - D_s^2) \text{ Ecu. [1.9.1.11.1-1]}$$

Donde:

S = altura del ducto de salida (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

D_s = diámetro de salida (m)

1.9.1.12. Longitud natural del ciclón

Es la longitud donde inicia el vórtice hasta la altura superior del ciclón

$$L = 2.3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a \times b}} \quad \text{Ecu. [1.9.1.12.1-1]}$$

Donde:

D_s =diámetro de salida (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

a = altura de entrada (m)

b = ancho de entrada (m)

1.9.1.13. Factor de dimensiones lineales

$$KL = D_c - (D_c - B) \times \frac{S+L-h}{z} \quad \text{Ecu. [1.9.1.13.1-1]}$$

Donde:

S = altura del ducto de salida (m)

D_c = diámetro del ciclón (m)

B = diámetro de salida de partículas (m)

L = longitud natural del ciclón (m)

z = altura de la parte cónica del ciclón (m)

H = Altura total del ciclón (m)

1.9.1.14. *Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural*

$$VR = \frac{\pi}{4} \times Dc^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times Dc^2 \times (L + S - h) \times \left[1 + \frac{KL}{Dc} + \left(\frac{KL}{Dc} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times (Dc)^2 \times L \quad \text{Ecu. [1.9.1.14.1-1]}$$

Donde:

S= altura del ducto de salida (m)

Dc= diámetro del ciclón (m)

L= longitud natural del ciclón (m)

H = Altura total del ciclón (m)

h = Altura de la parte cilíndrica (m)

KL = factor de dimensiones lineales

1.9.1.15. *Factor dimensional de las proporciones volumétricas*

$$Kc = \frac{Vsc + \frac{VR}{2}}{Dc^3} \quad \text{Ecu. [1.9.1.15.1-1]}$$

Donde:

Vsc= Volumen del ciclón evaluado sobre la salida (m^3)

VR=Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural (m^3)

Dc= diámetro del ciclón (m)

1.9.1.16. Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón

$$Ka = \frac{a}{Dc} \text{ Ecu. [1.9.1.16.1-1]}$$

Donde:

a = Altura de entrada ((m))

Dc = Diámetro de ciclón (m)

1.9.1.17. Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón

$$Kb = \frac{b}{Dc} \text{ Ecu. [1.9.1.17.1-1]}$$

Donde:

b = Ancho de entrada (m)

Dc = Diámetro de ciclón (m)

1.9.1.18. Exponente del vórtice

Es la correlación entre el radio de giro de manera de vórtice y la velocidad tangencial esta va a variar de 0.5 a 0.7 dependiendo de la temperatura y el tamaño del separador ciclónico.

$$n = 1 - (1 - 0.67 * Dc^{0.14}) * \left(\frac{T}{283}\right)^{0.3} \text{ Ecu. [1.9.1.18.1-1]}$$

1.9.1.19. Tiempo de relajación para partículas de 40 μm

Es el periodo necesario para que el material particulado alcance la velocidad de caída.

$$Ti = \frac{\delta p * (Dpi)^2}{18 * \mu} \text{ Ecu. [1.9.1.19.1-1]}$$

Donde:

δp = Densidad de la partícula (Kg/m^3)

Dpi = Diámetro de la partícula (m)

μ = Viscosidad ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)

1.9.1.20. Eficiencia fraccional por intervalo de trabajo

$$\eta_i = 1 - e \left[-2 \left(\frac{G * Ti * Q * (n+1)}{Dc^3} \right)^{\frac{0.5}{0.635+1}} \right] \text{ Ecu. [1.9.1.20.1-1]}$$

Donde:

G = Factor de configuración

Ti = Tiempo de relajación para partículas de 40 μm (s)

Q = Caudal m^3/s

n = Exponente del Vórtice

1.9.1.21. Eficiencia total del ciclón

La eficiencia del separador ciclónico será la sumatoria de las eficiencias fraccionales de las partículas por el tiempo de relajación de los distintos tamaños de partículas

$$\eta_T = \sum \eta_i * m_i \text{Ecu. [1.9.1.21.1-1]}$$

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

Todo proceso de diseño y construcción se requiere procedimientos que son formulados de una manera lógica para la adquisición de información y cumplimiento de objetivos. Este estudio tiene carácter descriptivo-experimental de tal forma que permita responder a las interrogantes que se presentan.

En cuanto a la parte experimental del diseño y construcción del separador ciclónico consta de dos etapas: la primera consta de la determinación de las variables involucradas en el proceso, la segunda consta en la obtención de datos verídicos para obtener las conclusiones adecuadas en función a las variables involucradas en el proceso.

2.1 Muestreo

Según el TULSMA LIBRO VI ANEXO IV NORMA DE LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE.

En la tabla 2. Método de medición de concentraciones de contaminantes comunes en el aire

Método Gravimétrico, mediante la captación de partículas en envases abiertos

Referencia: Method 502. Methods of Air Sampling and Analysis, 3rd Edition, Intersociety Commite, Lewis Publishers, Inc, 1988.

Descripción: Se utilizara un envase, de 15 centímetros de diámetro o mayor y con una altura dos o tres veces el diámetro. La altura del envase, sobre el nivel del suelo, será de al menos 1,2 metros.

El muestreo del material particulado se realizó mediante el método de muestreo aleatorio simple. El tiempo en que fueron recolectadas las muestras fue en un periodo de 8 días las 24 horas del día y con una temperatura ambiente aproximadamente de 22 °C. Esta temperatura es referencial debido a normas de seguridad hacia los empleados de la industria.

Se colocaron 12 puntos de muestreo para la recolección del material particulado a los alrededores de la planta de procesamiento las cuales se describen en el anexo(1).

2.2 Metodología

2.2.1 Métodos y Técnicas

2.2.1.1 Métodos

En los procesos de diseño se debe establecer procedimientos que sean lógicos para establecer información y así cumplir los objetivos establecidos. Este trabajo de investigación se basa en lo experimental que nos permitirá responder a las interrogantes que se presentan en el separador ciclónico como una aplicación hacia el campo industrial tomando en cuenta los medios adecuados.

A) INDUCTIVO

Partiendo del diagnóstico que permite reducir la carga de material particulado liberados a la atmósfera y la caracterización del tamaño de los mismos. Para posteriormente determinar las variables de proceso, a fin de sedimentar de manera efectiva las partículas de la corriente de gas que ingresa, luego de lo cual, se calculó los valores correspondientes de diseño del separador ciclónico para construir y verificar el funcionamiento y su eficiencia.

B) DEDUCTIVO

Durante el estudio parte del análisis y principios del Material Particulado, Sedimentación de Partículas y Operaciones Unitarias, partiendo así del diseño y construcción del separador ciclónico mediante la selección adecuada de los materiales y su respectivo dimensionamiento, lo cual, es de gran ayuda para obtener los cálculos necesarios y la determinación de las variables del proceso.

C) EXPERIMENTAL

El desarrollo de un experimento tiene como requisito imprescindible utilizar un diseño apropiado para resolver el planteamiento del problema que se investiga. El diseño de investigación se entiende como el desarrollo de un plan o estrategia que especifica las acciones y medios de control que se efectuarán para alcanzar los objetivos del experimento, responder a las preguntas de investigación y someter a contrastación las hipótesis.

Los métodos utilizados dentro de esta investigación son físico-químicos e instrumentales:

- Los métodos físico-químicos miden las propiedades diferentes a masa y volumen del material particulado.
- Los métodos instrumentales: los que determinan la eficiencia del separador ciclónico a través del ingreso de la corriente de gases.

2.3 Método de medición de tamaño de partículas

2.3.1 Tamizado

Tabla 6-2. Técnica para el análisis del tamaño de partículas que estén en el rango de 125mm a 20um.

FUNDAMENTOS	OBJETIVOS Y ALCANZE	MATERIALES Y REACTIVOS	PROCEDIMIENTOS
<p>Es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. Consta de una malla metálica constituida por barras tejidas y que dejan un espacio entre sí por donde se hace pasar el material particulado. Las partículas de menor tamaño o finas pasan a través de las aberturas del tamiz mientras que las de mayor tamaño no pasan dependiendo del orificio de la malla.</p>	<p>Determinar el tamaño de las partículas en los procesos industriales</p>	<ul style="list-style-type: none">• Vasos de precipitación• Balanza• Tamiz de Vaivén	<ul style="list-style-type: none">• Pesar la cantidad de muestra recolectada• Colocar la muestra seca en la columna de tamices, la columna de tamices está formada por cierta cantidad de tamices ensamblados en orden decreciente de tamaños de abertura con el fondo y la tapa.• Sacudir la columna de tamices, colocar las partículas retenidas en las bandejas• Pesar el material particulado en las bandejas.• Pesar el porcentaje de partículas retenidas en cada bandeja de tamices.

Realizado por: Lobato G, Castillo.2015

Tabla N° 7-2 Resultados del tamizado de la muestra 1 (Angar de matrias primas)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
260	212	0	0
	150	53.87	20.72
	106	92.37	35.53
	53	73.57	28.29
	38	38.17	14.68
	< 38	0,69	0.27
PERDIDAS		1.33	0.51
TOTAL		258.67	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 8-2 Resultados del tamizado de la muestra 2 (Angar de matrias primas)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
128	212	19.37	15.13
	150	0.76	0.59
	106	12.37	9.66
	53	49.47	38.65
	38	27.07	21.15
	< 38	18.42	14.39
PERDIDAS		0.54	0.42
TOTAL		127.46	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 9-2 Resultados del tamizado de la muestra 3 (Angar de matrias primas)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
93	212	12.17	13.09
	150	28.57	30.72
	106	34.47	37.06
	53	9.77	10.51
	38	0.22	0.24
	< 38	0	0
PERDIDAS		7.8	8.39
TOTAL		85.2	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 10-2 Resultados del tamizado de la muestra 4 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
1	212	0.21	21
	150	0.19	19
	106	0.20	20
	53	0.16	16
	38	0.19	19
	< 38	0	0
PERDIDAS		0.05	5
TOTAL		0.95	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 11-2 Resultados del tamizado de la muestra 5 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
353	212	37.74	10.69
	150	15.24	4.32
	106	31.98	9.06
	53	115.07	32.60
	38	59.17	16.76
	< 38	79.82	22.61
PERDIDAS		13.98	3.96
TOTAL		339.02	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 12-2 Resultados del tamizado de la muestra 6 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
124	212	32.47	26.19
	150	25.27	20.38
	106	27.57	22.23
	53	33.67	27.15
	38	0.74	0.60
	< 38	0.5	0.40
PERDIDAS		3.78	3.05
TOTAL		120.22	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 13-2 Resultados del tamizado de la muestra 7 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
108	212	0.72	0.67
	150	9.81	9.08
	106	19.47	18.03
	53	46.67	43.21
	38	16.47	15.25
	< 38	7.97	7.38
PERDIDAS		6.89	6.38
TOTAL		101.11	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 14-2 Resultados del tamizado de la muestra 8 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
93	212	0.37	0.40
	150	13.37	14.38
	106	23.47	25.23
	53	27.77	29.86
	38	14.12	15.18
	< 38	12.08	12.99
PERDIDAS		1.82	1.95
TOTAL		91.18	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 15-2 Resultados del tamizado de la muestra 9 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
849	212	0.58	0.068
	150	135.87	16
	106	391.77	46.14
	53	209.77	24.71
	38	80.77	9.51
	< 38	26.27	3.09
PERDIDAS		3.97	0.48
TOTAL		845.03	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 16-2 Resultados del tamizado de la muestra 10 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (μm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
4	212	0.25	6.25
	150	0.45	11.25
	106	0.89	22.25
	53	0.43	10.75
	38	0.79	19.75
	< 38	0.68	17
PERDIDAS		0.51	12.75
TOTAL		3.49	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 17-2 Resultados del tamizado de la muestra 11 (Banda transportadora)

Peso de la muestra (g)	MALLA (μm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
25	212	2.03	8.12
	150	3.87	15.48
	106	3.43	13.72
	53	2.25	9
	38	5.23	20.92
	< 38	6.02	24.08
PERDIDAS		2.17	8.68
TOTAL		22.83	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Tabla N° 18-2 Resultados del tamizado de la muestra 12 (Angar de empacado)

Peso de la muestra (g)	MALLA (μm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
2703	212	332.13	12.29
	150	269.07	9.95
	106	398.44	14.74
	53	523.75	19.38
	38	634.66	23.48
	< 38	486.31	17.99
PERDIDAS		58.64	2.17
TOTAL		2644,36	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

2.4 Diagnostico

Tabla N° 19-2 Total de muestra recolectada.

Peso de la muestra (g)	MALLA (µm)	PESO RETENIDO (g)	% Peso retenido
4,741	212	438,04	9,24
	150	556,34	11,73
	106	1036,43	21,86
	53	1092,35	23,04
	38	877,6	18,51
	< 38	638,76	13,47
PERDIDAS		101,48	2,14
TOTAL		4639,52	100

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Dentro del análisis después de haber realizado el tamizado del material particulado recolectado en varios puntos de muestreo de la Industria Union Cementera Nacional se puede observar que el 65,87% del total de las partículas recolectadas corresponden a un diametro superior a los 53 µm por lo cual estas partículas son sedimentables por efecto de la gravedad.

El otro restante 34,13% corresponde a partículas menores e iguales a los 38 µm de diametro por lo cual estas partículas no pueden ser sedimentadas por efecto de la gravedad , este porcentaje va hacer utilizado dentro de la eficiencia del separador ciclónico ya que necesitan una fuerza externa para poder ser recolectadas.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS, ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 Cálculos

3.1.1 cálculo del diámetro

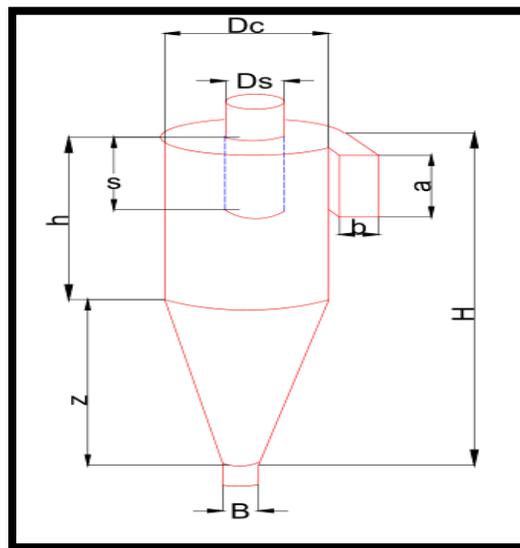


Figura N° 15-3 Plano del separador ciclónico
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F 2015

Según la Ecu. [1.9.1.1-1]

$$Dc = \frac{P}{\pi}$$

$$Dc = \frac{244 \text{ cm}}{3.1416}$$

$$Dc = 77.67 \text{ cm}$$

3.1.1.2. Altura y ancho de entrada

3.1.1.2.1 Altura

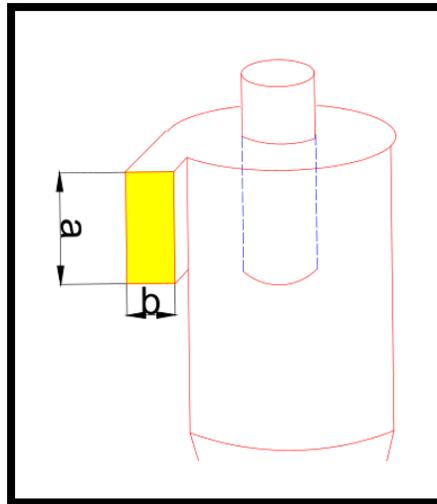


Figura N° 16-3 Altura de Entrada
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Ecu. [1.9.1.2.1-1]

$$\frac{a}{Dc} = 0.5$$

$$a = 0.5 \times Dc$$

$$a = 0.5 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$a = 38.84 \text{ cm}$$

3.1.1.2.2 Ancho

Según la Ecu. [1.9.1.2.1-1]

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

$$b = 0.2 \times Dc$$

$$b = 0.2 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$b = 15.53 \text{ cm}$$

3.1.1.3 Altura y ancho de salida

3.1.1.3.1 Altura de salida

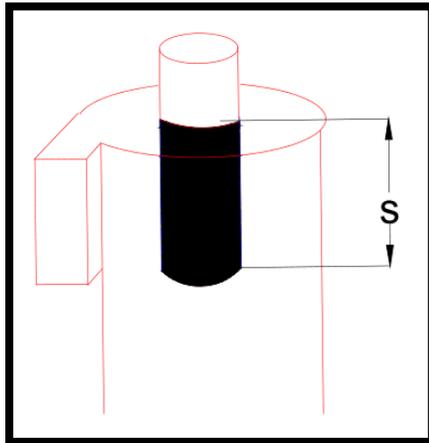


Figura N° 17-3 *Altura de Salida*
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Según la Ecu. [1.9.1.3.1-1]

$$\frac{S}{Dc} = 0.5$$

$$S = 0.5 \times Dc$$

$$S = 0.5 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$S = 38.84 \text{ cm}$$

3.1.1.3.2. Diámetro de salida

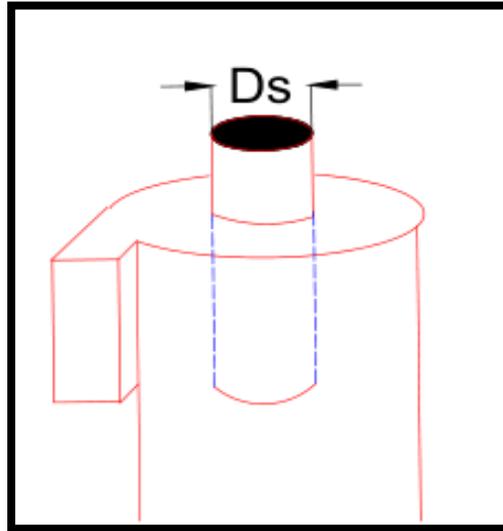


Figura N° 18-3 Diámetro de Salida
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Según la Ecu. [1.9.1.3.2-1]

$$\frac{D_s}{D_c} = 0.5$$

$$D_s = 0.5 \times D_c$$

$$D_s = 0.5 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$D_s = 38.84 \text{ cm}$$

3.1.1.4.1 Altura de la parte cilíndrica

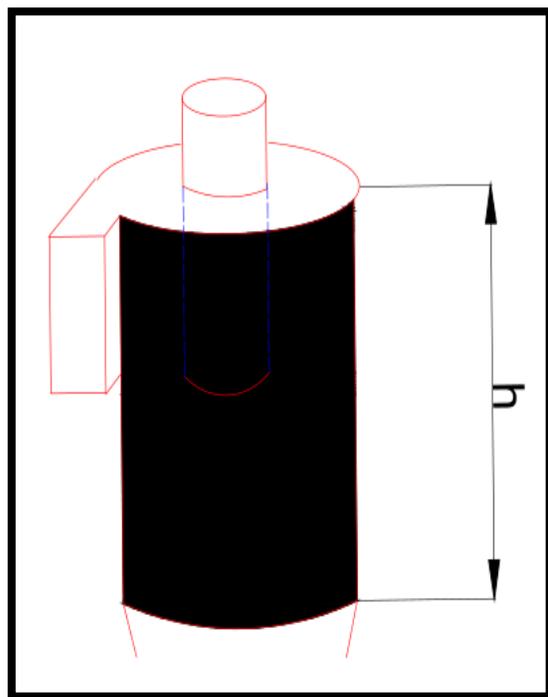


Figura N° 19-3 Altura de la parte Cilíndrica
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Según la Ecu. [1.9.1.4 -1]

$$\frac{h}{Dc} = 1.5$$

$$h = 1.5 \times Dc$$

$$h = 1.5 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$h = 116.51 \text{ cm}$$

3.1.1.5. Altura parte cónica

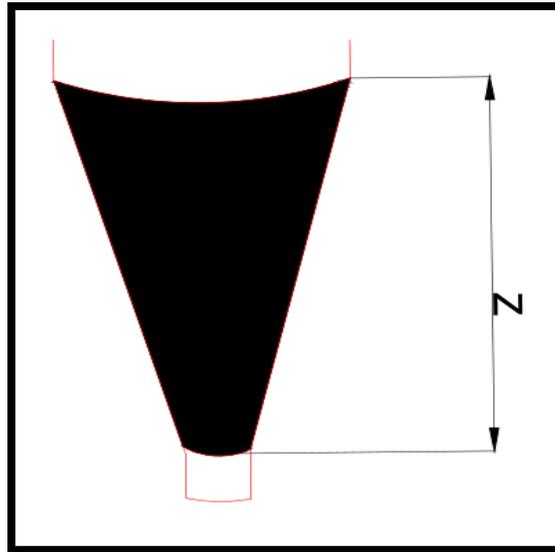


Figura N° 20-3 Altura parte cónica
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Según la Ecu. [1.9.1.5 -1]

$$\frac{z}{Dc} = 2.5$$

$$z = 1.5 \times Dc$$

$$z = 2.5 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$z = 194.18 \text{ cm}$$

3.1.1.6. *Altura total del ciclón*

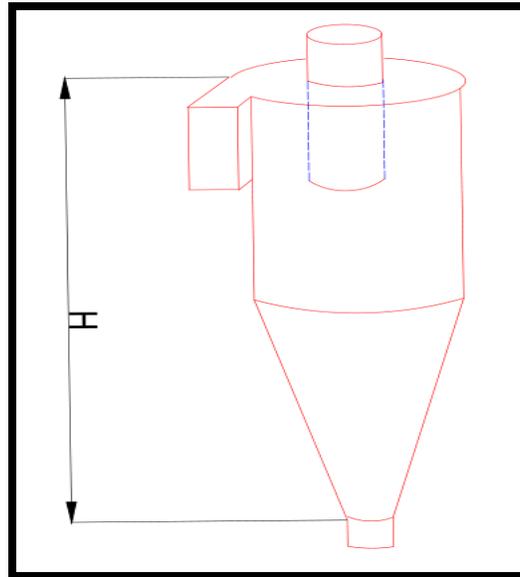


Figura N° 21-3 *Altura total*
Realizado por: Lobato, G; Castillo, F.2015

Según la Ecu. [1.9.1.6 -1]

$$\frac{H}{Dc} = 4$$

$$H = 4 \times Dc$$

$$H = 4 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$H = 310.7 \text{ cm}$$

3.1.1.7.1 Diámetro de salida de mp

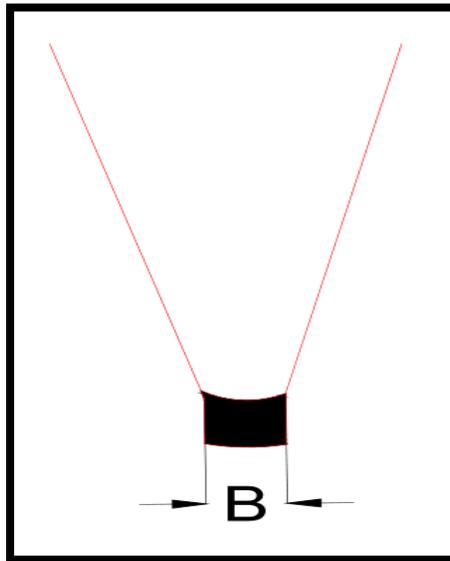


Figura N° 22-3 Diámetro de salida
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Según la Ecu. [1.9.1.7.1-1]

$$\frac{B}{Dc} = 0.375$$

$$B = 0.375 \times Dc$$

$$B = 0.375 \times 77.67 \text{ cm}$$

$$B = 29.13 \text{ cm}$$

3.1.1.8. Caudal de la corriente de aire

Según la Ecu. [1.9.1.8.1-1] y la Ecu. [1.9.1.8.1-2]

$$\text{Diámetro } Dc = 77.67\text{cm} \times \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 0.7767$$

$$\text{Velocidad } Vi = 15\text{m/seg}$$

$$Q = A \times Vi$$

$$A = a \times b$$

$$A = 38.84\text{cm} \times 15.53\text{cm}$$

$$A = 603.185\text{cm}^2 \times \frac{1\text{m}^2}{10000\text{cm}^2} = 0.06\text{m}^2$$

$$Q = 0.06\text{m}^2 \times \frac{13.82\text{m}}{\text{seg}}$$

$$\mathbf{Q = 0.83\text{m}^3/\text{seg}}$$

3.1.1.9. Velocidad equivalente

Según la Ecu. [1.9.1.9.1-1]

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

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times (9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \times (1.9 \times 10^{-5}\text{kg/ms}) \times (2650\text{kg/m}^3 - 1.127\text{kg/m}^3)}{3 \times (1.127\text{kg/m}^3)^2}}$$

$$\mathbf{W=0.80\text{ m/s}}$$

3.1.1.10. Velocidad de saltación

Según la Ecu. [1.9.1.10.1-1]

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

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0.155}{0.776}$$

$$Kb = 0.2$$

$$V_s = \frac{4.913 \times (0.80m/s) \times 0.2^{0.4} \times (0.7767m)^{0.067} \times \sqrt[3]{(13.82m/s)^2}}{\sqrt[3]{1 - 0.2}}$$

$$V_s = 12.59 m/s$$

3.1.1.10.1.1 Relación de velocidad

$$\frac{Vi}{Vs} = \frac{13.82m/s}{12.59m/s}$$

$$\frac{Vi}{Vs} = 1.09$$

$$1.09 < 1.35$$

Al verificar que la relación de velocidad de saltación y la velocidad de entrada se puede asegurar que habrá una re suspensión de partículas en el ciclón.

3.1.1.11. Volumen del ciclón evaluado sobre la salida

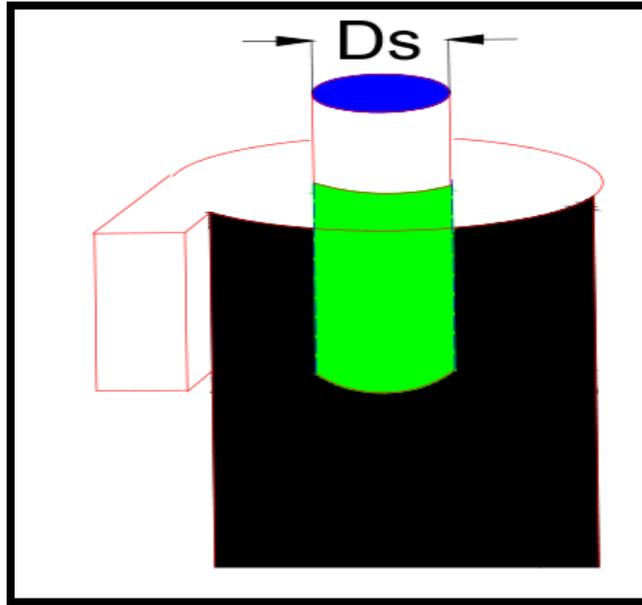


Figura N° 23-3 Volumen del Ciclón sobre la salida
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F

Según la Ecu. [1.9.1.11-1]

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

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \left(0.388m - \frac{0.38m}{2} \right) * ((0.776m)^2 - (0.384m)^2)$$

$$V_{sc} = 0.071m^3$$

3.1.1.12. Longitud natural del ciclón

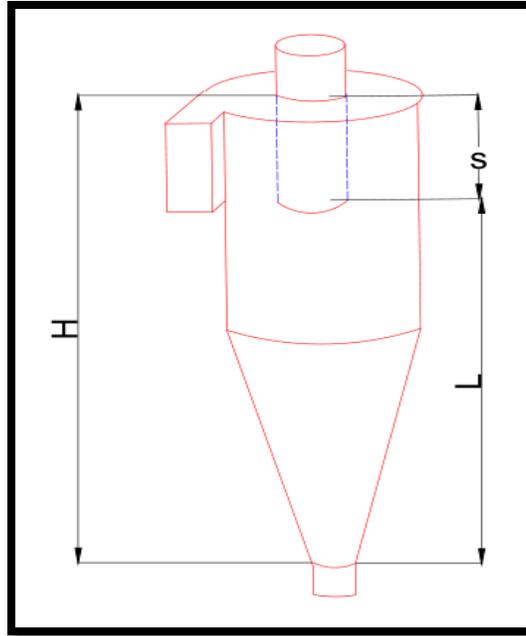


Figura N° 24-3 Longitud natural del ciclón
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F

Según la Ecu. [1.9.1.12-1]

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

$$L = 2.3 \times 0.388m \times \sqrt[3]{\frac{(0.7767m)^2}{0.38m \times 0.1553m}}$$

$$L = 1.94m$$

Para asegurar que se produzca el vórtice es necesario comparar que la longitud natural del ciclón sea menor a la altura total calculada menos la altura del ducto de salida.

$$L < H-S$$

$$1.94 < (3.107-0.3884)$$

$$1.94 < 2.727$$

Al cumplir con la condición se puede decir que puede desarrollarse dicho vórtice sin ninguna dificultad

3.1.1.13. Factor de dimensiones lineales

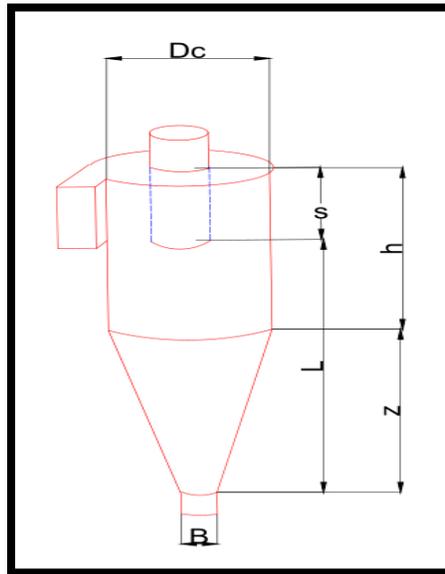


Figura N° 25-3 Dimensiones lineales
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F

Según la Ecu. [1.9.1.13-1]

$$KL = Dc - (Dc - B) \times \frac{S + L - h}{z}$$

$$KL = 0.777 - (0.777 - 0.2913) \times \frac{0.388 + 1.94 - 1.16}{1.94}$$

$$KL = 0.5m$$

3.1.1.14. Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural

Según la Ecu. [1.9.1.14.1-1]

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

$$VR = \frac{\pi}{4} \times 0.77^2 \times (1.16 - 0.38) + \frac{\pi}{12} \times 0.77^2 \times (1.94 + 0.8 - 1.16) \times \left[1 + \frac{0.5}{0.77} + \left(\frac{0.5}{0.77} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times (0.77)^2 \times 1.94$$

$$VR = 0.37 m^3$$

3.1.1.15.1 Factor dimensional de las proporciones volumétricas

Según la Ecu. [1.9.1.15.1-1]

$$Kc = \frac{Vsc + \frac{VR}{2}}{Dc^3}$$

$$Kc = \frac{0.071 + \frac{0.37}{2}}{0.777^3}$$

$$Kc = 0.55 m^3$$

3.1.1.16. Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón

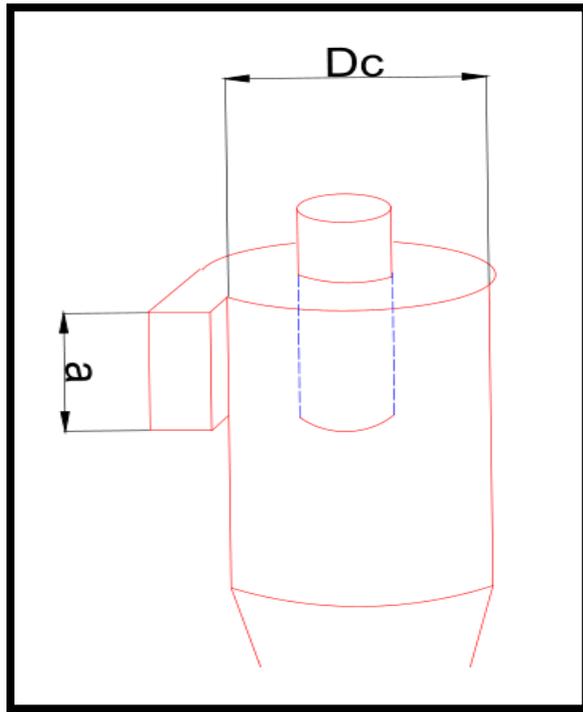


Figura N° 26-3 Relación entre la Altura y Diámetro
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F

Según la Ecu. [1.9.1.16. -1]

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

$$Ka = \frac{0.388m}{0.777m}$$

$$Ka = 0.5$$

3.1.1.17. Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón

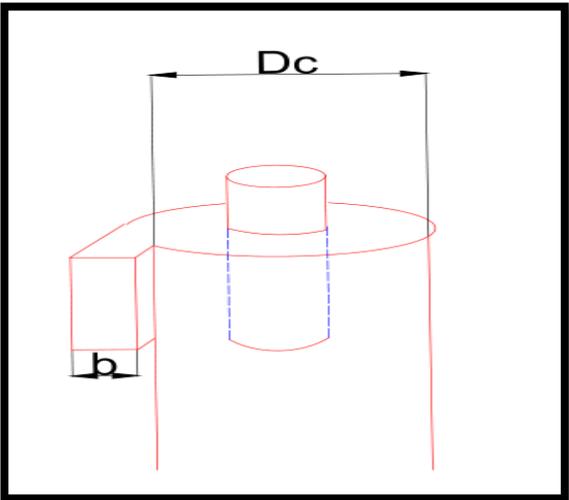


Figura N° 27-3 Relación entre base y Diámetro
Realizado por: Lobato,G; Castillo,F

Según la Ecu. [1.9.1.17.1-1]

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

$$Kb = \frac{0.1553m}{0.777m}$$

$$Kb = 0.2$$

3.1.1.18. Exponente del vórtice

Según la Ecu. [1.9.1.18.1-1]

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

$$n = 1 - (1 - 0.67 * (0.777m)^{0.14}) * \left(\frac{297}{283}\right)^{0.3}$$

$$n = 0.65$$

3.1.1.19. Tiempo de relajación para partículas de 40 μm

Según la Ecu. [1.9.1.19-1]

$$Ti = \frac{\delta p * (Dpi)^2}{18 * \mu}$$

$$Ti = \frac{2650 \text{ Kg}/\text{m}^3 * (40 \times 10^{-6} \text{ m})^2}{18 * (1.9 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{m.s})}$$

$$Ti = 0.012 \text{ s}$$

3.1.1.20. Eficiencia fraccional por intervalo de trabajo

Según la Ecu. [1.9.1.20 -1]

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

$$\eta_i = 1 - e \left[-2 \left(\frac{551.22 * 0.012 * 0.83 * (0.65 + 1)}{(0.777)^3} \right)^{\frac{0.5}{0.65+1}} \right]$$

$$\eta_i = 0.99$$

3.1.1.21. Eficiencia del ciclón

Según la Ecu. [1.9.1.21-1]g

$$\eta_T = \sum \eta_i * m_i$$

Tabla N° 6-3 Eficiencia total del Separador Ciclonico

<i>Dp (μm)</i>	<i>Ti</i>	<i>ηi</i>	<i>mi</i>	<i>ηi * mi</i>
212	0,35	1	9,24	9,24
150	0,17	0,9999	11,73	11,61
106	0,087	0,998	21,86	21,81
53	0,021	0,997	23,04	22,97
38	0,011	0,991	18,51	18,34
<38	0,0004	0,69	13,47	8,97
Total de eficiencia				92,94

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F

Tabla N° 7-3 Cálculos finales del Separador Ciclonico

Dimensión	Nomenclatura	Unidades	Stairmand	
			Sin Escal	Escala
Diámetro del ciclón	Dc	cm	77,67	27,1845
Altura de entrada	a	cm	38,84	13,594
Ancho de entrada	b	cm	15,53	5,4355
Altura de Salida	S	cm	38,84	13,594
Diámetro de salida	Ds	cm	38,84	13,594
Altura de la parte cilíndrica	h	cm	116,51	40,7785
Altura parte cónica	z	cm	194,18	67,963
Altura total del ciclón	H	cm	310,7	108,745
Diámetro de salida de MP	B	cm	29,13	10,1955
Caudal de la corriente de aire	Q	m^3/s	0,9	0,315
Velocidad Equivalente	W	m/s	0,8	0,28
Velocidad de saltación	Vs	m/s	11,46	4,011
Relación de velocidad	Vi/Vs		1,04	0,364
Volumen del ciclón evaluado sobre la salida	Vsc	m^3	0,071	0,02485
Longitud Natural del ciclón	L	m	1,94	0,679
Factor de dimensiones lineales	KL	m	0,5	0,175
Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural	VR	m^3	0,37	0,1295
Factor dimensional de las proporciones volumétricas	Kc	m^3	0,55	0,1925
Relación entre la Altura de Entrada y el Diámetro del Ciclón	Ka		0,5	0,175
Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón	Kb		0,2	0,07
Exponente del vórtice	n			0
Tiempo de relajación para partículas de $40 \mu m$	Ti	s	0,012	0,0042
Eficiencia fraccional por intervalo de trabajo	η^i		90%	98%
eficiencia del ciclón	η^T		90%	98%

Realizado por: Lobato,G; Castillo,F.2015

Luego de proceder a las respectivas pruebas de laboratorio ya habiendo concluido con la construcción del separador ciclónico dicho análisis nos da como resultado una eficiencia que bordea el 98%, dependiendo del tamaño del material particulado que se quiere sedimentar además de tomar en cuenta ciertos factores que influyen directamente en el proceso de separación como la caída de presión y la velocidad equivalente.

3.4. Procedimiento de construcción

Una vez ya realizado los cálculos y dimensiones respectivas del separador ciclónico, para lo cual se va a cuantificar los gastos y la posterior construcción del mismo, estos dos puntos son importantes al momento de obtener nuestros resultados de eficiencia para saber si es factible este tipo de separador ciclónico en la remoción de partículas menores a 40 *um*.

3.4.1. Proceso de construcción del separador ciclónico

3.4.1.1 Diseño de planos

Se elaboraran los planos del separador ciclónico en la plataforma AUTOCAD, con los datos previamente obtenidos, lo cual nos otorgara un correcto funcionamiento, estos planos detallan cada una de sus partes.

3.4.1.2 Selección de la materia prima

3.4.1.2.1 Acero

El separador ciclónico está construido con una plancha de acero inoxidable tipo mate 304 con un espesor de 1.5 mm, la plancha es elaborada por un proceso termo mecánico.

Este acero cumple un amplio grupo de aleaciones de austenítico de cromo-níquel. También son conocidos como 18/8 debido a su composición química que incluye aproximadamente 18% de cromo y 8% de níquel en peso estos aceros son fáciles de formar, soldar, fabricar y tienen resistencia a la corrosión todas estas propiedades hacen que sean utilizadas ampliamente en las industrias de procesos de alimentos y petroquímica.

La plancha de acero inoxidable es doblada seguido de un temple y revenido. Todo este proceso permite que se realice una buena soldadura y una firmeza a la abrasión.

Tabla N° 8-3 Características de la plancha de acero inoxidable

Tipo de estructura	Tipo de Composición	Descripción de acuerdo a JIS*	Descripción de acuerdo a AISI**	Descripción de acuerdo a DIN***	COMPOSICION QUIMICA %					
					C	Si max	Mn	P max	S max	Ni
Austenite	18Cr-8Ni	SUS 304	304	4301	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,50
	18Cr-8Ni-extra-low-C	SUS 304 L	304L	4306	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-12Ni	SUS 305	305	3955	0,12 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,50 ~ 13,00
	23Cr-12Ni	SUS 309 S	309 S	4845	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	25Cr-20Ni	SUS 310 S	310 S		0,08 max	1,50	2,00 - max	0,04	0,030	19,00 ~ 22,00
	18Cr-12Ni-2.5Mo	SUS 316	316	4401	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
COMPOSICION QUIMICA %			PROPIEDADES MECANICAS							
Cr	Mo	Otros Elementos	Pruebas Mecánicas							
			Resistencia Mecánica min Kg/mm2	psi	Punto de fluencia ¹ min kg/mm2	psi	Elongación % min JIS N° 13 (Muestra)	Pruebas de Dureza		PRUEBA DE FLEXIBILIDAD 180° radio (t, mm)
								Escala Rockwell B max	Escala de dureza Vickers max	
16,00 ~ 18,00		N: 0,25 max	65	93,000	25	35,800	40	100	253	Activar Ir a Config
17,00 ~ 19,00		N: 0,25 max	60	85,500	25	35,800	40	95	218	
16,00 ~ 18,00			53	75,800	21	30,000	40	90	200	
17,00 ~ 19,00			53	75,800	21	30,000	40	90	200	
18,00 ~ 20,00			53	75,800	21	30,000	40	90	200	
18,00 ~ 20,00			49	69,500	18	25,500	40	90	200	

Fuente: DIPAC, productos de acero

3.4.1.2.2 Corte de piezas

Se traza en la plancha de acero las medidas previamente obtenidas en los planos del separador ciclónico y se procede al corte de las piezas utilizando una moladora con disco de corte para acero teniendo en cuenta que se debe dejar 1 cm para poner unir las piezas al momento de realizar la soldadura de las mismas.

3.4.1.2.3 Soldadura

El equipo de soldadura utilizado en la construcción del equipo está comprendido principalmente de los siguientes elementos:

- Una fuente de corriente continua o alterna
- Pinza de portaelectrodo y pinza de masa
- Cables de conexión
- Electrodo revestidos

En general los electrodos revestidos están constituidos por un alma metálica que contiene el metal de aporte y un revestimiento que rodea al anterior.

El uso del electrodo revestido 304 para acero inoxidable puede mejorar ciertas características del cordón resultante mediante el empleo de ciertos elementos en la composición del revestimiento y de la varilla que se incorpora en el baño durante el proceso de soldadura.

Reduce la velocidad de enfriamiento ya que al producir un enfriamiento mas pausado del cordón se evitan choques térmicos que provoquen la aparición de estructuras más frágiles ello se consigue que las escorias quedan flotando en el baño de fusión y forman una capa protectora del cordón, que además sirve de aislamiento térmico que reduce su velocidad de enfriamiento.(Ingemecanica. 2015. <http://ingemecanica.com/>)

La composición química del revestimiento influye de manera decisiva en aspectos de la soldadura, tales como, la estabilidad del arco, la profundidad de penetración, la penetración, la transferencia de material, la pureza del baño, etc.

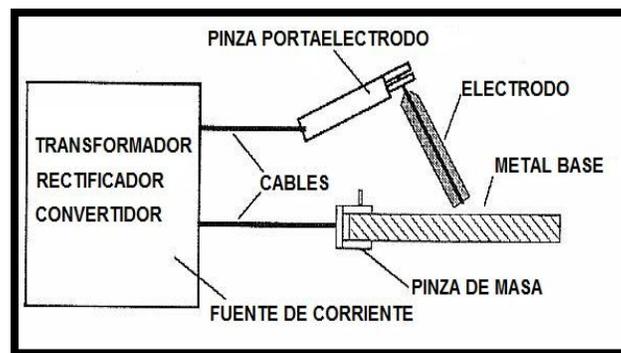


Figura N° 28-3 Sistema de soldadura
Fuente: Manual de soldador eléctrico con arco

3.4.1.2.4 Procedimiento para soldar

Se realiza la preparación del metal si este consiste en dos piezas que han de ser unidas por soldadura, se las prepara limando un borde en forma de bisel en los lados que se unirán. Esto permite suficiente “penetración” al arco de soldado para derretir ambos lados y fundirlos juntos para que el material de soldadura rellene la unión y suelde las piezas de verdad, en lugar de solo “pegarlas”. Al menos se debe quitar cualquier pintura, grasa, óxido u otros contaminantes para que trabaje sobre una superficie bien limpia y realizar una soldadura de calidad.

Las máquinas de soldar requieren una considerable cantidad de energía eléctrica para funcionar, a menudo una instalación especial de 105 amperios o más y a 220 voltios.

Se debe usar un arco corto, para producir un buen producto en este caso nuestro separador ciclónico, la forma y el tamaño del separador ciclónico va a depender del movimiento del electrodo con que se suelde.

Se produce un arco eléctrico “entre” la punta del electrodo y la pieza a trabajar. Si el electrodo simplemente se “pega” permitiendo a la corriente pasar directamente a la pieza con la pinza de masa, no se producirá suficiente calor como para derretir el electrodo y no se fundirán los metales.

Se mueve el arco para crear un punto o gota de soldadura. La “gota” o punto de soldadura es la forma de metal que se produce cuando el electrodo y el metal de base se funden juntos. Así se rellena el espacio entre las piezas que se están uniendo y quedan soldadas.

Luego se pule y cepilla la soldadura entre una pasada y otra. Cada vez que se complete una “pasada”, o vuelta de un extremo a otro de la soldadura, es necesario que se quite la escoria o pedazos de electrodo derretido que queden en la superficie del punto de soldadura, de modo que solo quede el metal más sólido antes de proceder con la siguiente pasada.

La Posición en las que se puede soldar son las siguientes:

Para soldaduras planas: El electrodo debe mantenerse en un ángulo de 15° con el extremo superior diagonal en el sentido del avance. Se debe conservar un arco tan corto como sea posible.

Para soldaduras verticales: El electrodo se mantendrá perpendicular a la placa, usando una ligera oscilación en el cordón de raíz.

Para soldadura sobre cabeza: El depósito se debe hacer con cordones rectos y un arco corto. Se debe evitar la oscilación.

CONCLUSIONES

- Determinamos el tamaño de la partícula por medio primero de un muestreo aleatorio en la Unión Cementera Nacional para posterior realizar en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH, por medio de la técnica de tamizado dando como resultado que el 65,87% corresponden un diámetro mayor a los 53 μm y el 34,13% menor o igual a 38 μm por lo cual son las partículas de interés en nuestra investigación.
- Después de haber realizado los cálculos de diseño del separador ciclónico basándonos en experiencias profesionales, bibliografía y de acuerdo a las necesidades del material particulado a sedimentar determinamos las medidas que tendrá nuestro equipo.
- Realizamos la construcción del separador ciclónico de acuerdo a especificaciones técnicas recomendadas para equipos industriales que priorizan la correcta construcción y funcionamiento, hecho con acero inoxidable el cual le dará un tiempo de vida largo y minimizar los costos de mantenimiento.
- Después de haber realizado la construcción del separador ciclónico determinamos que la eficiencia del equipo logra un 98% de remoción de material particulado mayor a los 53 μm y el 82% de material particulado menor o igual a 38 μm por lo cual tiene una eficiencia total de 90% por lo cual se asemeja a la eficiencia teórica ya que el restante porcentaje se puede deber a factores internos dentro del ciclón como la caída de presión, velocidad de entrada y resuspensión de partículas.
- Sin lugar a duda los separadores ciclónicos pueden ser de gran utilidad en el área de procesos industriales, es un “filtro” de gases procedentes de la combustión y otros procesos, que van dirigidos al medio ambiente. Dando solución al problema de contaminación atmosférica generada en los procesos industriales. Es viable para construir ya que la materia prima se pueden conseguir dentro del país, alcanzando así la disminución de importación y creando nuevas plazas de trabajo.
- Al ser un sistema móvil, puede ser transportado al sitio de trabajo, reduciendo de esta manera costos por transporte de estructuras metálicas. Para lograr un diseño óptimo del separador ciclónico se debe considerar los requerimientos de los procesos de producción, además de los posibles cambios en los gastos con el tiempo y tomar en cuenta la producción de sólidos que se generan.

RECOMENDACIONES

- Aplicar el separador ciclónico donde se haga conciencia sobre el gran problema de contaminación en la industria y que afecta a zonas aledañas.
- Realizar anualmente inspecciones sobre la cantidad de partículas presentes en el ambiente para que se pueda articular nuevos equipos que minimizen el impacto ambiental.
- Tener en cuenta las sanciones por parte del ministerio del ambiente y artículos relativos al incumplimiento de reglas definitivas para reducir las emisiones de partículas de tamaño menores a *40um*.
- Es de mucha importancia realizar un estudio detallado sobre el comportamiento de las partículas al ingresar al separador ciclónico para verificar la eficiencia de este ya que se puede mejorar la eficiencia del equipo.
- Se recomienda el separador ciclónico en industrias donde existan procesos de combustión y genere material particulado habiendo previamente realizado un análisis del tamaño y la cantidad de partículas que emitan

BIBLIOGRAFIA

A.C. Hoffmann, Louis E. Stein. *Gas Cyclones and Swirl Tubes, principles, design and operation* [en línea]. Berlín, Alemania: Springer Science & Business Media, 2002. [Consulta: 12 de mayo 2015]. Disponible en:

https://books.google.com.ec/books?id=Pf_uCAAAQBAJ&pg=PP1&dq=A.C.+Hoffmann,+Louis+E.+Stein.+Gas+Cyclones+and+Swirl+Tubes,+principles,+design+and+operation&hl=es&sa=X&ved=0CBoQ6AEwAGoVChMI0ditmvGjyAIVyqQeCh21GAGk#v=onepage&q=A.C.%20Hoffmann%20Louis%20Stein.%20Gas%20Cyclones%20and%20Swirl%20Tubes%20principles%20design%20and%20operation&f=false

Álvarez, María. *Diseño de un Sistema de Control para Material Particulado Generado en el Molino de Martillos de la Empresa TerraForte* (tesis de pregrado). Ingeniería Ambiental. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2014. pp 27-31

Delgado, María Nieves González. *CONTAMINACION AMBIENTAL una visión desde la química.* Madrid, España: Ediciones Paraninfo S.A, 2003. [Consulta: 12 de mayo 2015]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books?id=nUoOx-8knyUC&pg=PA688&dq=Delgado,+Mar%C3%ADa+Nieves+Gonz%C3%A1lez.+CONTAMINACION+AMBIENTAL+una+visi%C3%B3n+desde+la+qu%C3%ADmica.&hl=es&sa=X&ved=0CBoQ6AEwAGoVChMIlpTn4PejyAIVC6YeCh3XNgvV#v=onepage&q=Delgado%20Mar%C3%ADa%20Nieves%20Gonz%C3%A1lez.%20CONTAMINACION%20AMBIENTAL%20una%20visi%C3%B3n%20desde%20la%20qu%C3%ADmica.&f=false>

Ecologistas en acción *¿Qué son las PM 2,5 y cómo afectan a nuestra salud?* [en línea] Madrid: Septiembre 2008, Ecologistas en Acción. [Consulta: 10 de mayo 2015]. Disponible en: <http://www.ecologistasenaccion.org/article17842.html>

Falagán, M, et al. *Manual Básico de Prevención de Riesgos Laborales.* Asturias, España: Sociedad Asturiana de Medicina y Seguridad en el Trabajo y Fundación Médicos Asturias, 2000. [Consulta: 18 de mayo 2015]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd49/otros12.pdf>

González Fernández Ignacio Anselmo, et al. *Contaminación Atmosférica*. Madrid, España: Editorial UNED, 2012, [Consulta: 12 de mayo 2015]. Disponible en:https://books.google.com.ec/books?id=7xYvtMyRP7EC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false

Ibáñez, Carlos Ayora. *Material Particulado. Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales*. España: Editorial Sociedad Anónima de fotocomposición, 2004.[Consulta: 14 de mayo 2015]. Disponible en:https://books.google.com.ec/books/about/Los_sistemas_terrestres_y_sus_implicacio.html?id=sRGOhMZfYE8C

Interactivo, El Medico. 2003. *Diario Electrónico de la Sanidad*. [En línea]. Disponible en: <http://www.elmedicointeractivo.com/ap1/emiold/biblio/rbcn18.htm>

Londoño, Carlos Alberto Echeverri. “Diseño óptimo de ciclones”. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*[en línea], 2006, Medellín, Colombia.2006, vol 5, pp 1-3 [Consulta: 12 de junio 2015].ISSN 0120-5609. Disponible en:http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242006000200011

Lozada, Héctor Manuel García. “Tipología y Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión” *Ingeniería e Investigación*[en línea], 2009, Bogotá, Colombia, vol 29, pp 38-45[Consulta: 21 de mayo 2015]. Disponible en:http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092009000300028

Manahan, Stanley E. *Smog Fotoquímico, Introducción a la Química Ambiental*. México DF, México: Revertè Ediciones, 2007. [Consulta: 18 de mayo 2015]. Disponible en:<https://books.google.com.ec/books?id=5NR8DIk1n68C&printsec=frontcover&dq=Manahan,+Stanley+E.+2007.+Smog+fotocu%C3%ACmico.+Introducci%C3%B2n+a+la+Qu%C3%ACmica+Ambiental&hl=es&sa=X&ved=0CBoQ6AEwAGoVChMIkuGQ6YCKyAIVC3g-Ch1ckgeS#v=onepage&q=Manahan%2C%20Stanley%20E.%202007.%20Smog%20fotocu%C3%ACmico.%20Introducci%C3%B2n%20a%20la%20Qu%C3%ACmica%20Ambiental&f=fals>

Martin, Paula Beatriz. 2004. “*Contaminación Del Aire Por Material Particulado En La Ciudad De Buenos Aires*”(tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. pp 55-75

Martínez, Antonia Gil.2000. *Modelo Experimental de Flujo Frío del Ciclón primario de una planta de lecho fluido a presión (tesis doctoral)*. Universidad deZaragoza, Zaragoza, España.pp 67-89

Morales, Raúl G. E.*Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*. Santiago, Chile: Editorial Universitaria, 2006. [Consulta: 18 de mayo 2015].

Disponible

en:https://books.google.com.ec/books?id=HdeX6SWHBW8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Nevers, Noel. *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. México DF, México: Mc Graw-HILL Interamericana EDITDDES S.A, 1997.[Consulta: 18 de mayo 2015]. Disponible

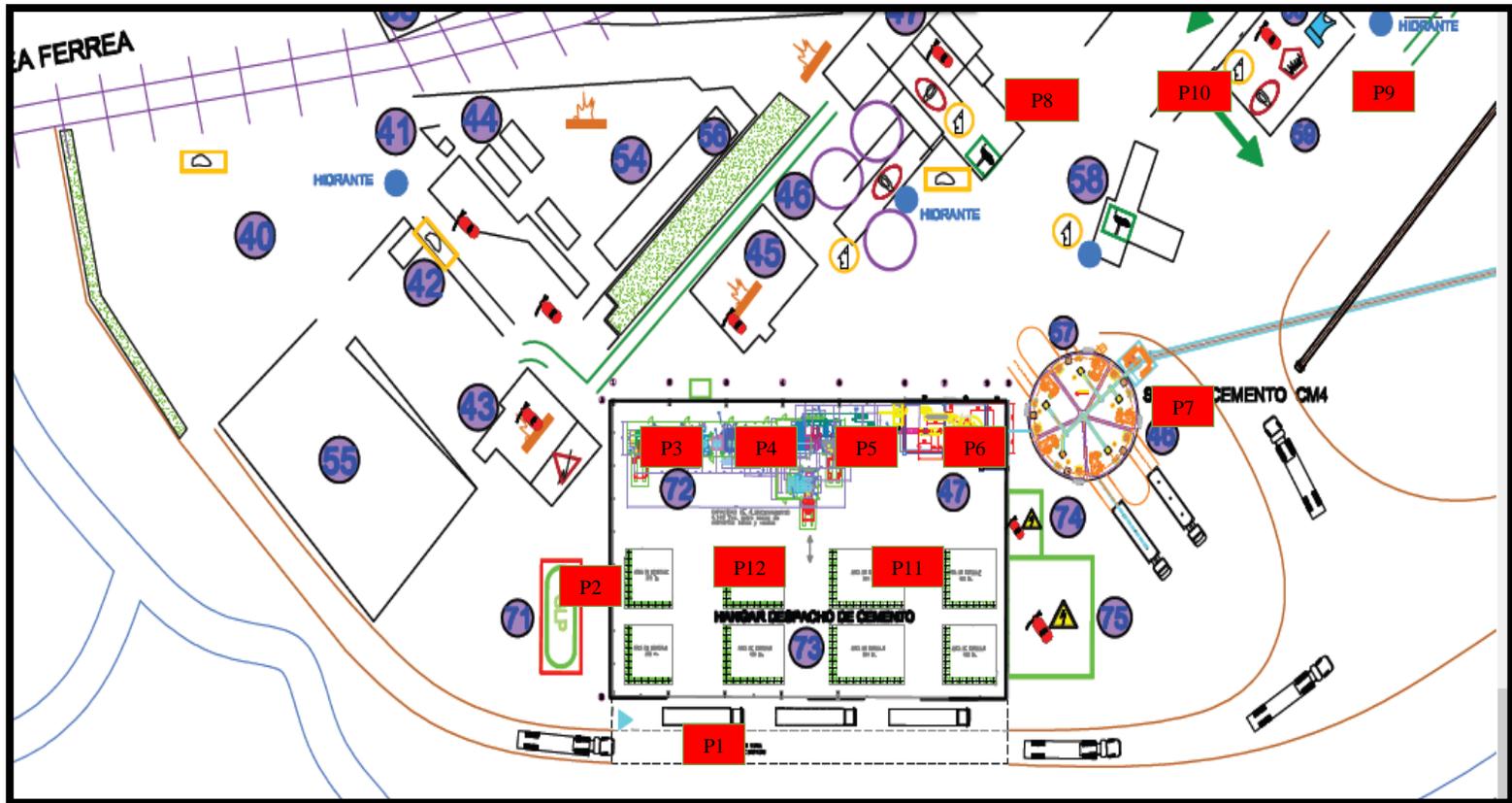
en:http://biblioteca.unach.edu.ec/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=2004#.Vg6cufI_Okp

Peña, Carlos E., et al. *Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental*. Arizona, Estados Unidos de América: s.n, 2001.[Consulta: 12 de mayo 2015]. Disponible

en:<http://superfund.pharmacy.arizona.edu/sites/default/files/toxamb.pdf>

ANEXOS

ANEXO A Puntos de muestreo en la industria Union Cementera Nacional



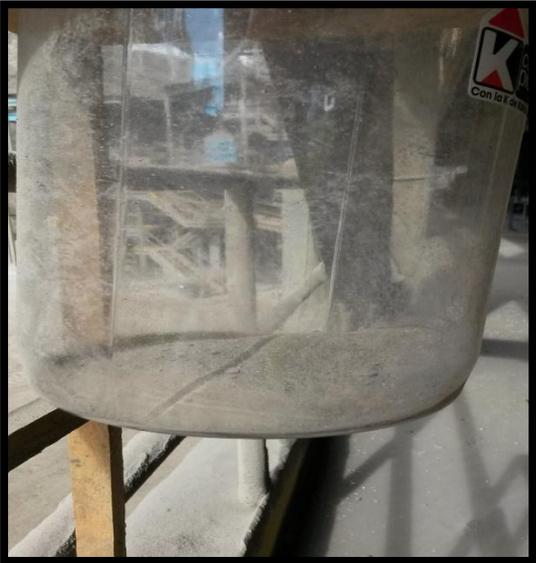
ANEXO B Construcción de los muestreadores de material particulado



ANEXO C. Colocación de los muestreadores en la Union Cementera Nacional



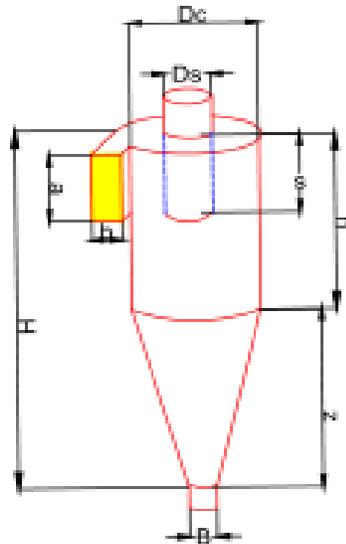
ANEXO D Recolección de los muestreadores de material particulado



ANEXO E. Caracterización del tamaño de la partícula



ANEXO F. Planos en AUTOCAD del separador ciclónico



SEPARADOR CICLÓNICO

REALIZADO

FERNANDO CASTILLO CASTILLO
GEOVANNA LOBATO FREIRE

REVISADO POR

Dr. FAUSTO YAULEMA
MSc. JUAN GONZÁLEZ

ESCALA :

1:100

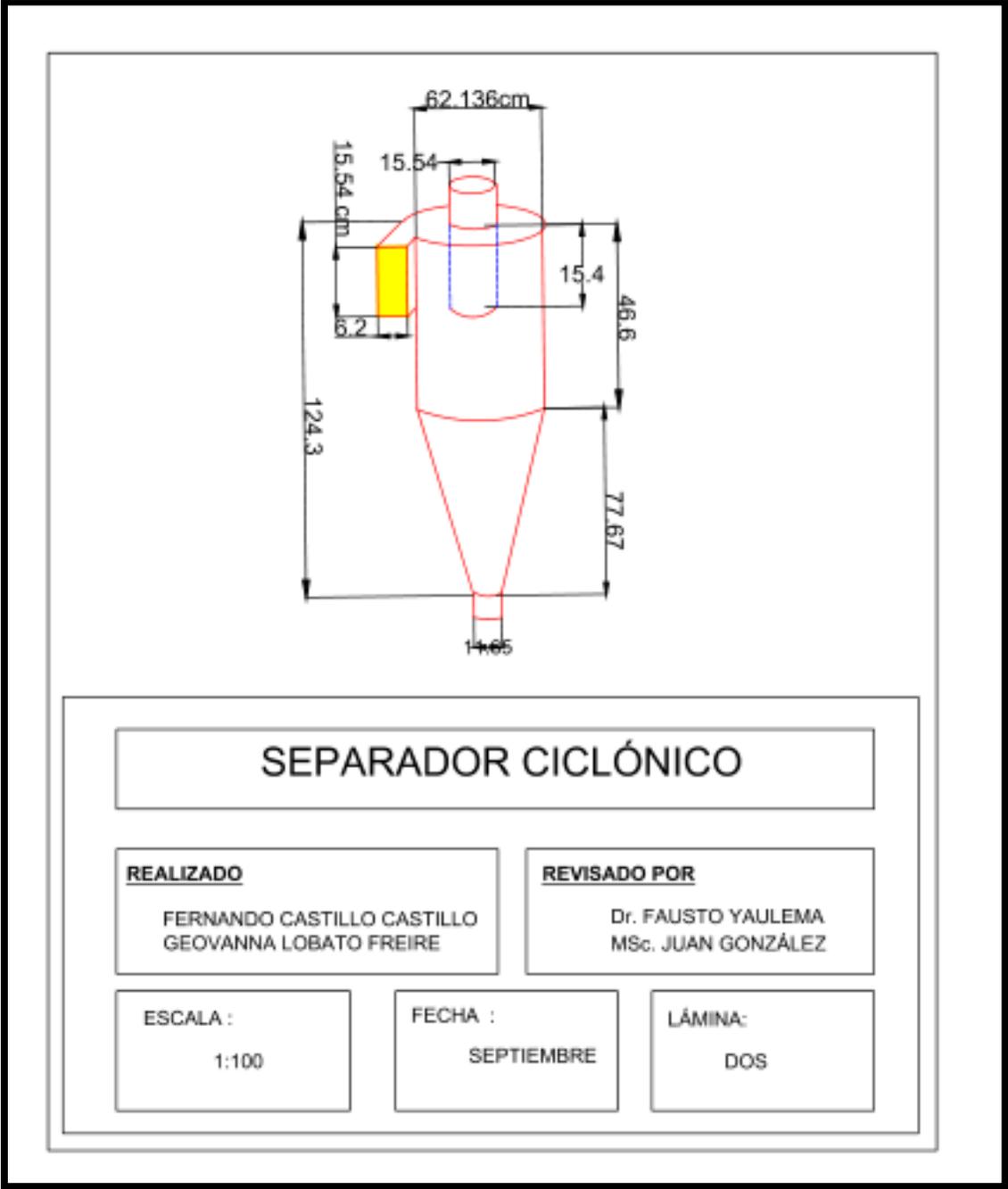
FECHA :

SEPTIEMBRE

LÁMINA:

UNO

ANEXO G. Planos en AUTOCAD del separador ciclónico dimensionamiento



ANEXO H. Equipos utilizados en la construcción del separador ciclónico



Amoladora con disco de corte



Lijadora de acero



Dobladora de acero

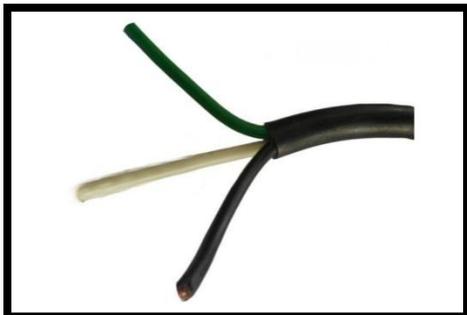
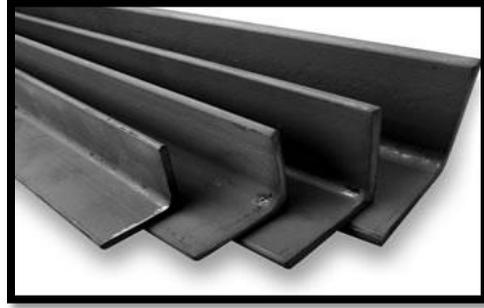


Soldadora eléctrica de arco



Taladro de perforación

ANEXO I. Materiales utilizados en la construcción del separador ciclónico



ANEXO J. Construcción del separador cilíndrico

