

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Rediseño de un Sistema de Control de Emisiones al Aire
de una Siderúrgica mediante la Caracterización del
Tamaño de Partícula”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Eddie Francisco Alvarado Arias

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2010

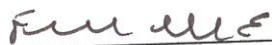
AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi Director de Tesis, el Ing. Mario Patiño; a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A MIS PADRE LUIS
ALVARADO Y MADRE
EDITH ARIAS, MIS
HERMANOS LUIS Y
GERARDO Y MI HIJA
POLKA. MI NOVIA
GABRIELA YAGUAL,
AMIGOS Y AMIGAS.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Mario Patiño A.
DIRECTOR DE TESIS

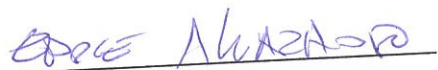


Ing. Alfredo Barriga R.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Eddie Francisco Alvarado Arias

RESUMEN

Un sistema de control de emisiones al aire se considera un proceso adjunto en la fabricación, manufactura o combustión de una actividad o producto. El proceso de tratamiento de los gases contaminantes se encuentra estipulado en la legislación ecuatoriana y debe ser regulado de modo que se cumplan los límites máximos permisibles para emisiones de los contaminantes al aire.

La industria estudiada en la presente tesis presenta inconvenientes con su sistema actual de emisiones. El sistema actual está compuesto una cámara inercial y filtros de manga. Si bien el sistema permite controlar el escape de material particulado, existen inconvenientes de operación. La cantidad de partículas grandes que se quedan en la mangas provocan una rápida saturación en el material lo que provoca un cambio constante de compartimento para realizar la limpieza por aire reverso.

Mediante un impactador de cascada se pudo determinar la distribución de tamaño de partícula de una muestra del material que es retenida en los filtros de manga. Esta distribución en conjunto con características químicas del material particulado permitió rediseñar el sistema actual, mejorando el consumo energético del ventilador extractor. Del resultado de la

experimentación se identificó que más de la mitad de la masa corresponde a tamaños de partícula superiores a $14\mu\text{m}$, El dispositivo que se introdujo fue un ciclón de alta eficiencia, que permite el control de partículas grande (mayores a $10\mu\text{m}$) disminuyendo la carga en los filtros de manga.

El diseño del ciclón tomó como puntos importantes:

- Tener alta eficiencia para partículas grandes (mayor a 60% en tamaños superiores a $14\mu\text{m}$).
- Poseer una caída de presión que permita un ahorro energía en el área de estudio.

El ciclón disminuye la velocidad con la que las partículas forman la torta de polvo en los filtros de mangas. El diseño del ciclón permitió que se disminuyan la cantidad de cambios de compartimento, de modo que existan menos procesos de limpieza en las mangas, alargando la vida útil de los filtros.

Mediante el rediseño del sistema de control de emisiones al aire, se disminuyó el consumo energético, ya que para un proceso, se genera menos caída de presión promedio y por ende menos energía utilizada.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE PLANOS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO 1

1. FABRICACIÓN DEL ACERO A PARTIR DE LA CHATARRA Y EMISIONES GASEOSAS PRODUCIDAS	3
1.1. Proceso de producción del acero	4
1.2. Control de emisiones gaseosas.....	7

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	10
2.1. Aerosoles.....	10
2.2. Equipos de control de material particulado.....	15

CAPÍTULO 3

3. DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS	24
3.1. Equipos utilizados.....	25
3.2. Preparación y pruebas en un Impactador de cascada.....	32

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL DE CONTROL DE EMISIONES GASEOSAS	38
4.1. Características del contaminante del sistema actual	38
4.2. Problemas asociados al sistema actual.....	48
4.3. Energía utilizada en el sistema actual	51

CAPÍTULO 5

5. DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES MEJORADO	60
5.1. Diseño de un sistema de control para la contaminación.....	61
5.1.1. Dimensiones	61
5.1.2. Eficiencia de colección.....	73
5.1.3. Pérdida de presión asociada.....	74
5.2. Selección de materiales.....	76
5.3. Disposición de polvos colectados	78

CAPÍTULO 6

6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS	80
6.1.	Beneficios de la implementación del sistema	81
6.2.	Energía utilizada en el sistema mejorado	84
6.3.	Costos del montaje del sistema y tiempo de fabricación	87

CAPÍTULO 7

7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
----	--------------------------------------	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

MAE	Ministerio de Ambiente del Ecuador
g	Aceleración gravitacional
LOG-NORMAL	Logarítmica Normal
MOUDI	Impactador de Cascada
HNO_3	Ácido Nítrico
NO_2	Dióxido de Nitrógeno
SO_2	Dióxido de Azufre
psi	Libras sobre pulgada cuadrada
US-EPA	Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos de América
Fe	Hierro
Zn	Zinc
Cd	Cadmio
Pb	Plomo
Mn	Manganeso
Cr	Cromo
Ni	Níquel
SiO_2	Dióxido de Silicio
Al_2O_3	Alumina
CaO	Óxido de Calcio
Na_2O	Óxido de Sodio
C	Carbono
S	Azufre
F	Flúor
Cl	Cloro
Tap-Tap	Tiempo que demora una colada, desde la carga de chatarra hasta el volteo del horno
min	minuto
H_2O	Agua
CO	Monóxido de carbono
VOC	Compuestos volátiles orgánicos
SOx	Óxidos de azufre
NOx	Óxidos de nitrógeno

ASTM A36 K061	Acero al carbono con límite de fluencia de 250 MP Polvos de acería
------------------	---

SIMBOLOGÍA

$(K_f)_c$	Resistencia que presenta el polvo que se encuentra impregnado en el filtro de mangas
μ	viscosidad absoluta del gas
C_e	Concentración del contaminante que sale del equipo de control
C_i	Concentración del contaminante que entra al equipo de control
D	Diámetro del cuerpo del ciclón
D_e	Escape de gases
D_e	Escape de material recolectado
d_j	Diámetro de Partícula de tamaño j
D_p	Diámetro de la partícula
dp_{50}	Diámetro de partícula mínimo con el que se alcanza una Eficiencia de 50%
H	Altura del ducto de entrada de gases
H_v	Cabezal de velocidad del ciclón
K	Constante empírica de ciclones
K_2	Coefficiente de resistencia del polvo
K_f	Resistencia de la capa de polvo adherida al filtro
L_b	Longitud del cuerpo del ciclón
m_{aj}	Fracción de masa acumulada con tamaño j
M_D	Masa recolectada de material particulado en las mangas por día
M_e	Flujo másico de contaminante que sale del equipo de control
m_{ej}	Masa de tamaño j recolectada en Impactador
m_{fj}	Peso Final de Impactador de tamaño j
M_i	Flujo másico de contaminante que entra al equipo de control
m_j	Fracción de masa de partículas de tamaño j
m_j	Fracción de masa con tamaño j
m_{oj}	Peso Inicial de Impactador de tamaño j
m_T	Masa total
N_c	Cantidad de coladas diarias
n_m	Numero de mangas por compartimento
N_ϵ	Numero de vueltas que realiza el fluido dentro del ciclón

P_c :	Longitud del generador de vórtice
Q	Caudal de succión de gases provenientes de la fundición de la chatarra en el horno de arco eléctrico
S	Capturador de vórtice
S_e	Caída de presión del filtro limpio
S_T	Caída de presión total del filtro de mangas
t	Tiempo en que opera el filtro
T	Temperatura de los gases
T_t	Tiempo tap - tap
V_g	Velocidad con que ingresan los gases al ciclón
V_{gt}	Velocidad de filtración o proporción gas-tela
V_s	velocidad de sedimentación
V_{tub}	Velocidad del gas dentro de la tubería
W	Ancho del ducto de entrada de gases
W_c	Densidad del polvo impregnado
W_{fluido}	Potencia que utiliza el fluido por la caída de presión
W_o	Densidad de área de la capa de polvo
ΔP	Caída de presión del ciclón
ΔP_L	Caída de presión asociada a la tubería
$\Delta P_L'$	Caída de presión por cada metro de tubería
ΔP_{mt}	Caída de presión del pastel de polvo
η	Eficiencia
η	Eficiencia total
η_j	Eficiencia para partículas de tamaño j
ρ_g	Densidad del gas
ρ_p	Densidad de la partícula

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de producción de acero en siderúrgica estudiada.....	5
Figura 1.2. Precipitador electroestático	8
Figura 1.3. Esquema de un ciclón	8
Figura 1.4. Filtro de mangas.....	9
Figura 2.1. Una distribución log-normal.....	14
Figura 2.2. Una cámara de sedimentación.....	17
Figura 2.3. Trayectoria del fluido dentro de un ciclón	18
Figura 2.4. Funcionamiento de un filtro de mangas	20
Figura 2.5. Funcionamiento de un precipitador electrostático	21
Figura 2.6. Funcionamiento de un lavador de aire	22
Figura 4.1. Equipo simulador.....	41
Figura 4.2. Etapas del impactador de cascada	41
Figura 4.3. Distribución de tamaño de partícula	44
Figura 4.4. Distribución de tamaño de partícula en escala logarítmica	45
Figura 4.5. Típica distribución de tamaño de partícula en el escape de un horno de arco eléctrico	46

Figura 4.6. Típica distribución de tamaño de partícula en el escape de un filtro de mangas.....	47
Figura 4.7. Material obtenido en mangas	50
Figura 4.8. Variación de potencia durante la operación de la manga.....	58
Figura 5.1. Parámetros característicos de un ciclón.....	65
Figura 5.2. Eficiencia y caída de presión vs. Diámetro del ciclón.....	72
Figura 6.1. Eficiencia del ciclón diseñado	81
Figura 6.2. Distribución de p artículo a la salida del ciclón.....	84
Figura 6.3. Variación de potencia durante la operación de la manga del rediseño con ciclón.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Resumen y función de equipos utilizados en el muestreo de partículas	27
Tabla 2	Tipos de filtro para muestreo de partículas suspendidas	30
Tabla 3	Características del filtro pallflex 2500 qat-up	31
Tabla 4	Detalle de composición química de la ceniza	39
Tabla 5	Resultados de muestreo	42
Tabla 6	Distribución de partícula.....	43
Tabla 7	Potencia de fluido en un tiempo tap-tap.....	58
Tabla 8	Desempeño de los tipos de ciclones.....	63
Tabla 9	Relaciones de un ciclón de alta eficiencia.....	65
Tabla 10	Composición de los gases de escape de un horno de arco eléctrico	67
Tabla 11	Característica del gas a la entrada del ciclón.....	67

Tabla 12 Selección del diámetro adecuado	71
Tabla 13 Dimensiones seleccionadas para el ciclón.....	73
Tabla 14 Eficiencia del diseño	73
Tabla 15 Entrada salida de partículas del ciclo según su tamaño	83
Tabla 16 Potencia de fluido en un tiempo tap-tap.....	86
Tabla 17 Costos involucrados en la fabricación y montaje del ciclón	88

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Dimensiones del Ciclón.....	E1
--------------------------------------	----

INTRODUCCIÓN

Producto de la fundición de chatarra se generan emisiones de material particulado. El cambio de estado del sólido a líquido provoca un desprendimiento de sustancias sólidas que en conjunto con el aire caliente se emiten de un horno de arco eléctrico. Este material particulado es contaminante, ya que lo estipula la normativa ambiental ecuatoriana del Ministerio del Ambiente – MAE.

El material particulado desprendido debe de ser tratado, de modo que la tasa de emisión que proviene de la planta donde se funde la chatarra no sobrepase los límites máximos que estipula la ley. Para realizar este filtrado o captación del contaminante se necesitan sistemas de control de emisiones, que trabajando en conjunto permiten disminuir la emisión de contaminantes. El proceso de control de los contaminantes para la industria siderúrgica va de mano con la producción de acero, ya que mientras más acero se produzca, más sustancia contaminante necesita controlar.

El control de emisiones al aire requiere de energía. Mediante succión se extraen los gases productos de la fundición y se los conduce por sistemas de control. En la fundición de acero, el contaminante más importante ya que es

el único que se encuentra regulado como emisión en la normativa ecuatoriana es el material particulado.

La presente tesis se enfoca en las características de este material particulado. Al analizar las características de este material, se puede realizar un rediseño al sistema de control de emisiones al aire que posee una empresa nacional.

CAPÍTULO 1

1. FABRICACIÓN DEL ACERO A PARTIR DE LA CHATARRA Y EMISIONES GASEOSAS PRODUCIDAS

La industria siderúrgica se vuelve cada vez más indispensable en el mundo, pues el acero es un material empleado con bastante frecuencia en construcciones de gran escala para lograr estabilidad y reducción de costos.

La acería motivo de la presente tesis se encuentra ubicada en un sector industrial; operando las 24 horas del día mediante turnos rotativos y con aproximadamente 500 trabajadores a su cargo.

En el último año la división de acería produjo 86000 toneladas de acero en lingotes, la materia prima para la división de laminación. Esta cifra significó un crecimiento, tanto económico como en infraestructura, que generó ventas de cerca de 120 millones de dólares; y siendo constante durante los últimos cinco años, la empresa logró que sus activos aumenten en un 61% .

1.1. Proceso de producción del acero

En el caso de la siderúrgica en estudio, el acero se produce a partir de chatarra. El proceso de producción está representado en la FIGURA 1.1. Primero se clasifica la materia prima (chatarra) en tres tipos de acuerdo a sus propiedades. La chatarra tipo A, tipo B y tipo C. Chatarra tipo A es la más especial, y corresponde a material pesado; la chatarra tipo B incluye material pesado y semipesado como vigas y tubos, entre otros; chatarra tipo C es la más común y pertenece a chapas, electrodomésticos, etc. Chatarra que contenga acero galvanizado no es aceptada. Luego

esta es prensada en paquetes de 80x50 cm, para pasar al horno principal.

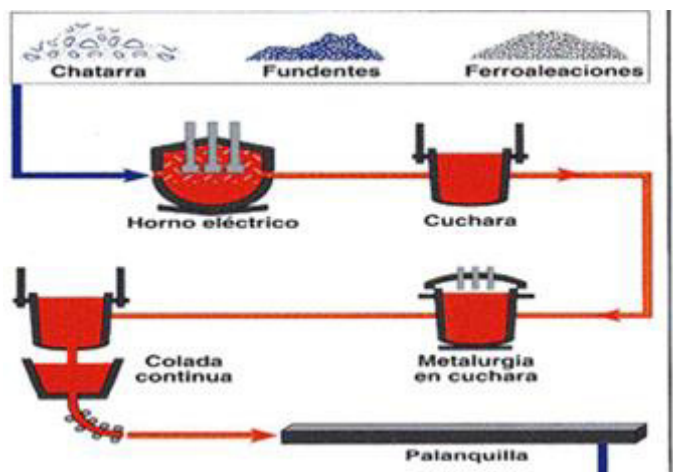


FIGURA 1.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACERO EN SIDERÚRGICA ESTUDIADA

El horno principal es de tipo arco eléctrico y se asimila a una soldadora gigante. Los 3 electrodos de carbono que lo componen suministran 12000 amperios, alcanzando una temperatura de 1500°C necesaria para fundir la chatarra homogéneamente.

Durante este proceso, existen otros materiales como pintura, polvos (remanentes a pesar existir procesos de tratamiento y lavados previos), y otros compuestos que se encuentran en la chatarra, que se desprenden en forma de material particulado

debido a la elevada temperatura con la que se trabaja. Este material particulado es muy peligroso para la vida humana y para el medio ambiente. Por esta razón, se necesita captar dichas emisiones para que no se dispersen en la atmósfera.

La capacidad del horno de arco eléctrico actual es de 25 toneladas. Luego de que la chatarra está fundida mediante la operación de los electrodos, se procede a agregarle las ferroaleaciones correspondientes (carbono, manganeso, silicio, fosforo y silicio) y se suministra más corriente para lograr la homogeneidad requerida. Después de esto, el horno es volteado ligeramente para dejar caer el acero líquido, que se encuentra en su parte inferior, en un recipiente cuchara. La colada continua del recipiente es depositada en moldes para formar lingotes de acero o palanquilla.

Existen otros procesos más comunes donde se utilizan dos hornos de similares características. Uno para fundir chatarra conocido como el Horno de Arco Eléctrico; y otro para agregar ferroaleaciones y transportar el acero líquido conocido como el Horno Cuchara.

1.2. Control de emisiones gaseosas

Para controlar las emisiones gaseosas generadas, se necesitan sistemas de control de la contaminación. Algunos de estos son:

- Cámaras de Sedimentación
- Cámaras Inerciales
- Precipitador Electrostático
- Ciclones
- Lavadores de Aire
- Filtros de Mangas

Cada sistema tiene sus ventajas y sus limitantes. Por ejemplo, la cámara de sedimentación y la cámara inercial son relativamente sencillas pero solo funcionan con partículas considerablemente grandes. Lavadores de aire trabajan bien con partículas grandes y medianas, pero para su uso se necesita implantar un sistema de tratamiento de lodos generados en el sistema de control. Los precipitadores electrostáticos (FIGURA 1.2) funcionan solo con partículas de baja resistividad. Un ciclón (FIGURA 1.3) funciona bien con partículas medianas y grandes y además apaga material encendido, pero no funciona con partículas pequeñas. Un filtro de

mangas (FIGURA 1.4) funciona sólo para partículas pequeñas sin embargo el gas que filtra debe tener poca humedad.

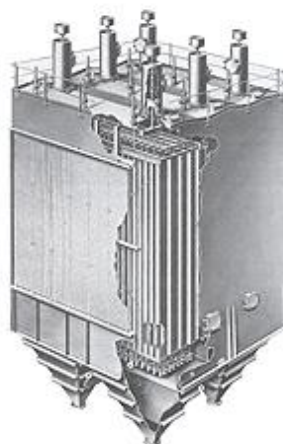


FIGURA 1.2. PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO

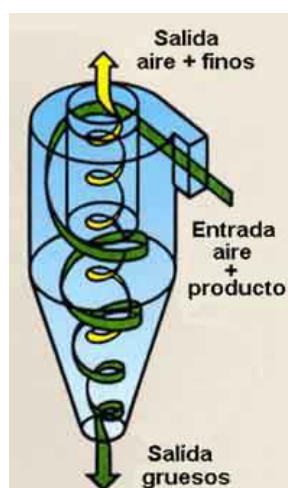


FIGURA 1.3. ESQUEMA DE UN CICLÓN



FIGURA 1.4. FILTRO DE MANGAS

Cada uno genera una caída de presión, algunos más otros menos. Para obtener una alta eficiencia de colección se necesita combinar estos sistemas de control; y así abarcar un rango de tamaño de partículas que incluyan las partículas pequeñas (menores a $10\mu\text{m}$) y grandes (mayores a $10\mu\text{m}$).

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Esta tesis desarrolla diferentes temas de análisis de equipos a implementar, así como emplea diferentes tipos de herramientas estadísticas para obtener los parámetros actuales del proceso.

2.1. Aerosoles

Un aerosol es una partícula sólida o líquida suspendida en un medio gaseoso. El estudio de los aerosoles se puede realizar solo

dentro de un rango de tamaño. El límite inferior es de $0,002\ \mu\text{m}$, lo mínimo que puede detectar un instrumento de condensación, hasta $100\mu\text{m}$, donde constituye una partícula que no se puede suspender en el aire por mucho tiempo.

Propiedades de partículas

Las partículas, por lo general, tienen de formas irregulares; sin embargo, para elegir un tamaño se debe asumir geometría uniforme. Cuando son cuerpos tridimensionales se asume geometría esférica corregida con un factor. Ahora, esta esfera puede ser interpretada como una equivalencia con una propiedad. Por ejemplo, el diámetro aerodinámico es el diámetro de una partícula esférica de densidad unitaria con velocidad de sedimentación igual a la de la partícula analizada. Existe también el diámetro de Stokes, que es el diámetro de la partícula con la misma densidad y velocidad de sedimentación que la partícula estudiada.

Velocidad de Sedimentación

La velocidad de sedimentación es obtenida cuando el peso de una partícula se iguala a su fuerza de arrastre, y obedece la ecuación 1.1.

$$V_s = \frac{D_p^2 \times \rho_p \times g}{18\mu} \quad (1.1)$$

Siendo:

V_s , la velocidad de sedimentación en m/s;

D_p , el diámetro de la partícula en m;

ρ_p , la densidad de la partícula en kg/m³;

μ , la viscosidad absoluta del gas en Pas x s;

g , Aceleración gravitacional: 9,8 m/s²

La ecuación 1.1 indica que partículas de mayor tamaño y densidad tendrán mayor velocidad de sedimentación que partículas pequeñas y de menor diámetro. Esto demuestra que las partículas grandes (mayores a 10µm) caen en un fluido con mayor facilidad que partículas pequeñas (menores a 10µm).

Diámetro de Stokes Equivalente

El diámetro de Stokes Equivalente proyecta de forma esférica a las partículas de forma irregular. Esto se obtiene igualando la velocidad de sedimentación de una partícula esférica que tiene las mismas propiedades que la partícula de forma irregular. En la presente tesis se utiliza el Diámetro de Stokes, lo cual permite generalizar los cálculos.

Concentración y tasa de emisión

La concentración es la cantidad de sustancia por unidad de volumen del gas en el que está suspendida y tiene las siguientes

unidades: $\mu g/m^3$ o mg/m^3

Para este estudio nuestro enfoque está sobre la concentración de masa. Esto es en seguimiento a los estándares para emisiones dictadas por el Ministerio de Medio Ambiente - MAE que vienen dados en mg/Nm^3 (Nm^3 es el volumen a condiciones normales que son de una presión de 1013 milibares con una temperatura de 0°C) (Ver APÉNDICE A).

Tasa de emisión es la cantidad de sustancia por unidad de tiempo que se está emitiendo desde una fuente. En una fábrica las

fuentes son las chimeneas que conducen los gases de combustión y contaminantes. El rastro de esta emisión se lo denomina *pluma*. Las tasas de emisión vienen dadas en unidades de masa por unidad de tiempo como $\mu\text{g}/\text{s}$ o mg/s

Distribución de tamaño

Cualquier aerosol tiene una curva de distribución de tamaño. Para cada rango de tamaño se obtiene la cantidad de masa de partícula que existe en el aerosol. Su distribución se asemeja a una curva de distribución LOG-NORMAL (FIGURA 2.1)

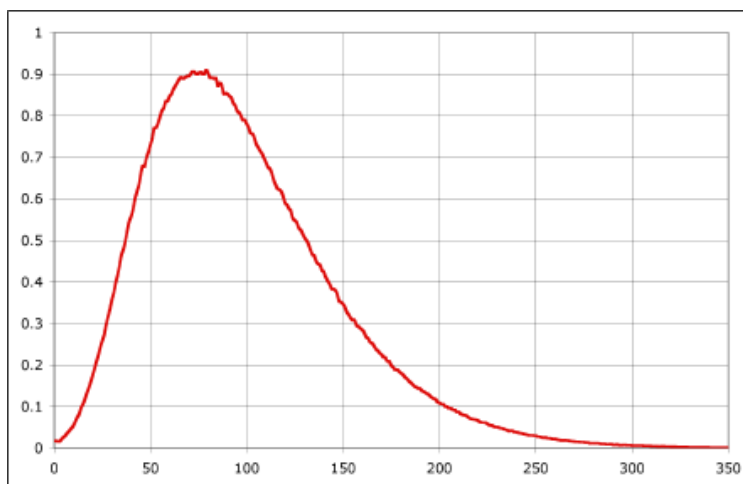


FIGURA 2.1. UNA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL

Esta distribución acumulada permite obtener una tendencia lineal de los datos distribución de tamaño si es graficada en un papel probabilístico.

2.2. Equipos de control de material particulado

El concepto general es obtener la mayor eficiencia para las partículas estudiadas. La eficiencia global del sistema o de cada equipo se obtiene por medio de la ecuación:

$$\eta = \frac{M_i - M_e}{M_i} = \frac{C_i - C_e}{C_i} = \sum_j \eta_j \times m_j \quad (2.2)$$

Siendo:

η , Eficiencia;

M_i , Flujo másico de contaminante que entra al equipo de control
(tasa de emisión sin en equipo de control) en g/s;

M_e , Flujo másico de contaminante que sale del equipo de control
(tasa de emisión con el equipo de control) en g/s;

C_i , Concentración del contaminante que entra al equipo de control
en g/m³;

C_e , Concentración del contaminante que sale del equipo de control en g/m^3 ;

η_e , Eficiencia para partículas de tamaño j ;

m_j , Fracción de masa de partículas de tamaño j

Es importante tener en cuenta que si la mayor fracción de masa corresponde a un pequeño rango del tamaño de partícula, es necesario que el sistema de control de sea eficiente especialmente para ese rango.

Cámara de sedimentación

La cámara de sedimentación es una expansión de aérea cuadrada que utiliza el principio de velocidad de sedimentación para atrapar las partículas que llegan al suelo en ese trayecto (FIGURA 2.2). Tal como dice, solo sirve para partículas de gran tamaño (mayor a $10\mu\text{m}$).

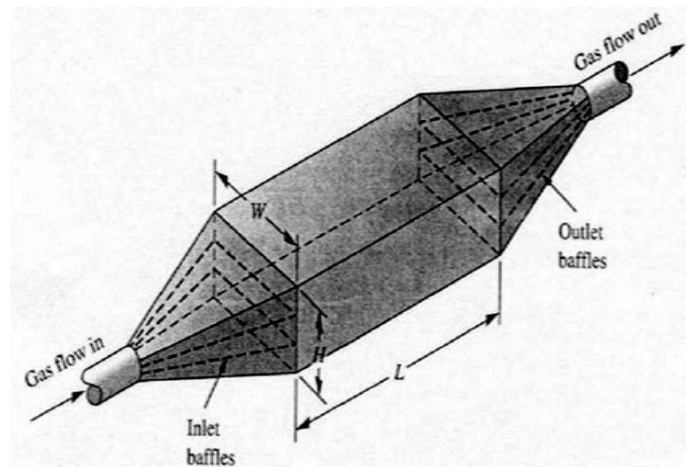


FIGURA 2.2. UNA CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN

Ciclón

El ciclón separa partículas impactándolas con su pared debido a la fuerza centrífuga a la que están expuestas. El fluido dentro de los ciclones genera un vórtice, que se asemeja a un tornado generado por diferentes corrientes de aire (FIGURA 2.3).

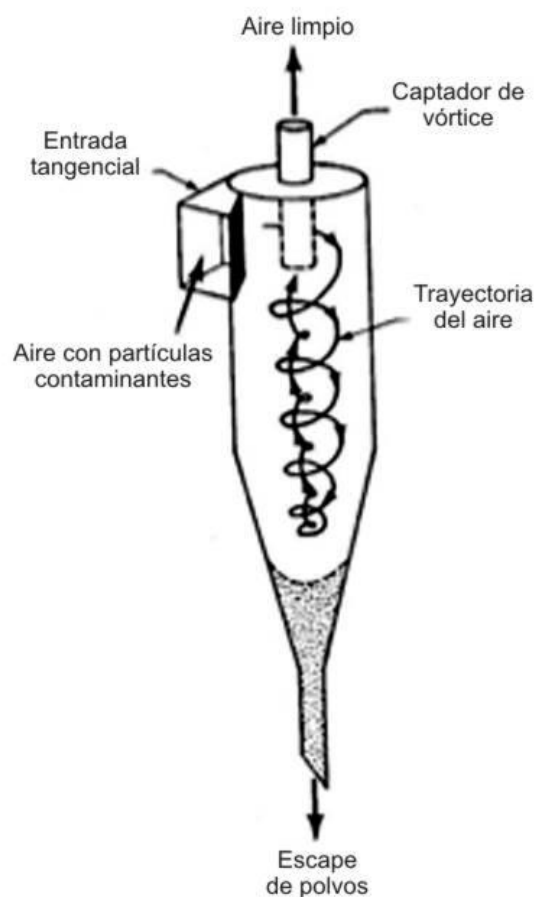


FIGURA 2.3. TRAYECTORIA DEL FLUIDO DENTRO DE UN CICLÓN

La geometría del ciclón es estandarizada, ya que sus dimensiones son relaciones de tamaño y generan un trayecto del fluido del gas en el cual se han realizado modelos. Para obtener comportamientos que se explican con ecuaciones de origen empírico.

Filtro de mangas

El control de partículas por medio de filtros de mangas es un método muy usado a nivel global, pues su eficiencia es muy elevada (99% de eficiencia de colección colectiva o mayor). Este equipo de control consiste en circular el fluido gaseoso contaminado por un material permeable, de modo que el aire atraviese el filtro de manga y el material particulado sea retenido (FIGURA 2.4).

Una limitante de los filtros de mangas son las características del fluido que está filtrando. Este fluido debe tener bajo contenido de humedad, y baja temperatura.

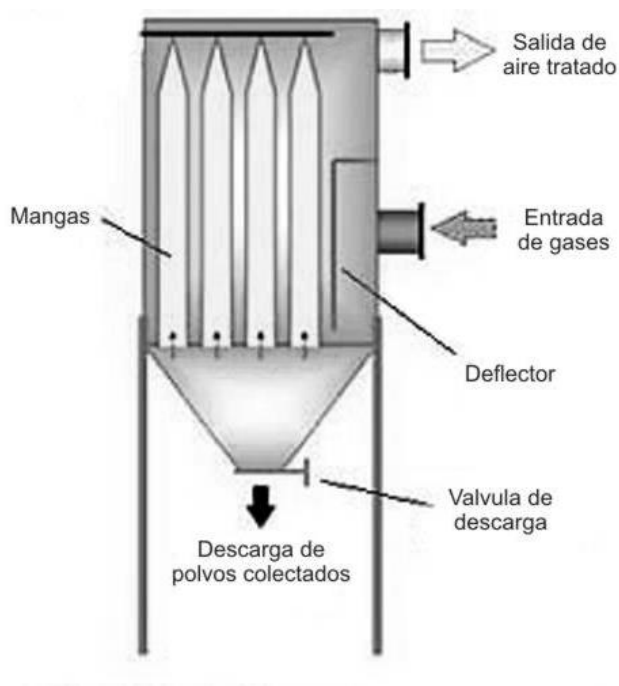


FIGURA 2.4. FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO DE MANGAS

La alta eficiencia alcanzada por los filtros de mangas requiere un constante mantenimiento. Las mangas necesitan limpiarse con frecuencia debido a que las partículas se impregnan en los poros del material filtrante e impiden el paso del aire.

Precipitador electrostático

El principio con el que funciona el precipitador es la atracción electromagnética existente entre dos materiales con cargas opuestas (FIGURA 2.5).

Las partículas contaminantes son ionizadas mediante electrodos para después ser migradas y adheridas a paredes con carga opuesta. Luego estas partículas adheridas a la pared son removidas. Para alcanzar este fenómeno las partículas a removerse necesitan tener baja resistividad eléctrica.

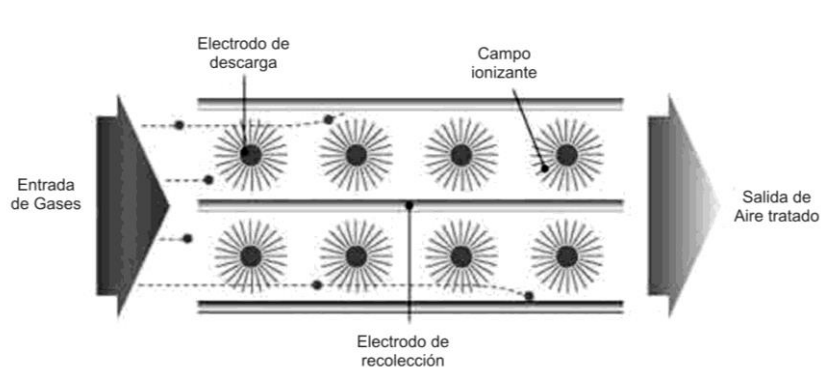


FIGURA 2.5. FUNCIONAMIENTO DE UN PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

La gran ventaja de los precipitadores electrostáticos es que pueden remover las partículas sin afectar el caudal de gas; logrando una recolección eficiente sin generar caídas de presión.

Lavador de aire

El lavador de aire usa como fenómeno la adherencia de partículas sólidas a un líquido solvente (generalmente agua). Aire ingresa a una cámara y sube atravesando rociadores de agua

que van colectando las partículas y precipitándolas en el fondo de la cámara (FIGURA 2.6).

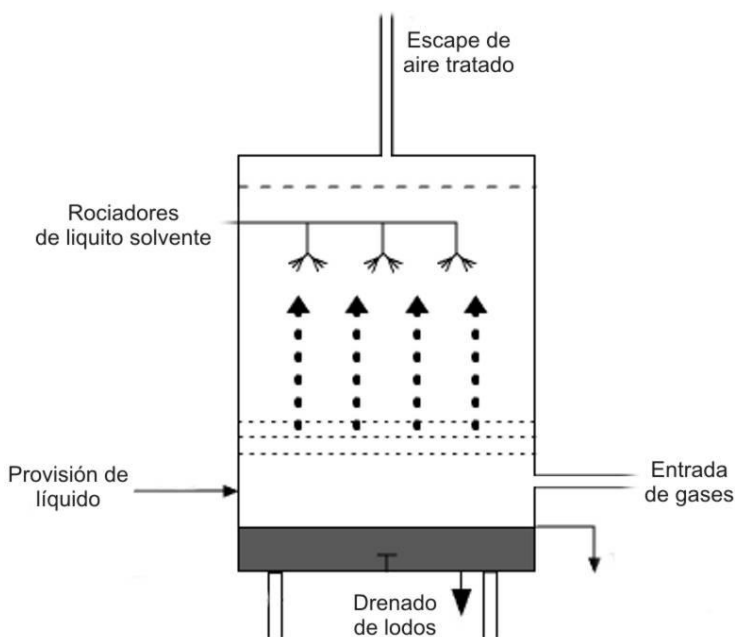


FIGURA 2.6. FUNCIONAMIENTO DE UN LAVADOR DE AIRE

Los lavadores de aire, además de remover partículas contaminantes en el fluido, funcionan como un intercambiador de calor entre el líquido solvente y el gas tratado y permite remover simultáneamente gases contaminantes solubles en el líquido.

Su gran limitante son los costos de operación y el tratamiento que se le debe aplicar a los lodos generados en el fondo de la cámara. Debido a la interacción entre distintas sustancias, existe

la posibilidad de que se creen sustancias nocivas como ácidos oxácidos.

CAPÍTULO 3

3. DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Es fundamental conocer las características del material y del fluido al cual se va a controlar mediante un sistema de control de emisiones. Una de las características más importante es el tamaño de partícula, ya que permite determinar las propiedades de las emisiones provenientes de un horno de arco eléctrico.

3.1. Equipos utilizados

Para la simular el movimiento de partículas en laboratorio, se debe contar con los siguientes equipos principales:

Equipo simulador Filtro de Manga. Es un equipo capaz de suspender las partículas mediante el movimiento del aire en la cámara homogeinizadora y expulsarlo a través de un filtro de manga ubicado en el escape. (Ver FIGURA 4.1)

Impactador de cascada - MOUDI. Es un instrumento que separa por etapas los diferentes tamaños de partículas que contiene un fluido gaseoso.

Bomba de vacío. Es la máquina que creará el vacío para forzar a una corriente de aire medida a pasar por un sistema de colección. Se requiere de bombas capaces de mantener flujos estables en un determinado rango.

Manómetros. Los manómetros miden la caída de presión que se ocasiona por la resistencia del equipo de muestreo al paso del flujo de gas. Esto permite corregir el volumen de gas muestreado a condiciones estándar.

Balanza. Es necesario un instrumento de pesaje que tenga sensibilidad de 0,1mg, pues el material colectado en cada una de las etapas estará en el orden de 1 mg aproximadamente.

Mufla. Es un instrumento capaz de remover el contenido de agua de la muestra, de modo que el MOUDI no sea afectado por la humedad.

Mangueras. Se necesitan de diferente diámetro, y son responsables de conducir el fluido desde el equipo simulador de filtro de manga al impactador de cascada.

De igual manera se debe tener en cuenta el equipo auxiliar que se detalla a continuación:

- Alcohol Industrial (70%)
- Detergentes
- Cinta termofundente
- Guantes quirúrgicos
- Respirador
- Gafas de seguridad

TABLA 1
RESUMEN Y FUNCIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS EN EL
MUESTREO DE PARTÍCULAS

Ítem	Equipos y Materiales	Función
1.	Equipo simulador Filtro de Manga	Suspensión homogénea de las partículas a muestrear.
2.	MOUDI	Separación en rangos de tamaños de partículas.
3.	Bomba de vacío	Proveer succión estable desde el equipo simulador Filtro de Manga y el MOUDI.
4.	Manómetro	Permite corregir errores de presión en el flujo de aire.
5.	Balanza	Determinación de masa de cada etapa del MOUDI.
6.	Mufla	Remueve contenido de agua de la muestra.
7.	Manguera	Transporta las partículas en suspensión desde el equipo simulador Filtro de Manga hasta el MOUDI.

Aspectos importantes en la adaptación del Impactador de Cascada a una fuente fija

El equipo simulador de Filtro de Manga actúa como una fuente fija, esto se debe a que las partículas en suspensión homogénea asemejan el comportamiento que tendrían en una fuente fija. Es necesaria la adaptación de una sonda para el transporte del aire con partículas desde la fuente fija hasta la entrada del impactador

de cascada. Se recomienda disminuir, en lo posible, las perturbaciones dadas por curvaturas o disminución de diámetros de sonda. Se debe alcanzar un fluido desarrollado, evitando en los estancamientos, caso contrario pueden ocurrir deposiciones de partículas.

Se emplea una manguera de caucho de 20 mm de diámetro interior. El extremo de la manguera que conecta con el Impactador de Cascada es sellado con cinta termofundente para aislar el flujo e impedir cualquier fuga en este.

Las características principales de los equipos utilizados en las mediciones son mostradas en la Tabla 1.

Selección de filtros

La selección del tipo de filtro que debe utilizarse depende del tipo de muestreo que se está llevando a cabo y de sus subsecuentes análisis químicos y físicos. No existe un filtro apropiado para todos los análisis; sin embargo, a continuación se enumeran algunas características que deberán considerarse al seleccionar un filtro:

- Eficiencia de muestreo de partículas: un filtro deberá remover más del 99% de las partículas suspendidas que se hacen pasar a través de él, sin importar el tamaño de la partícula o su flujo.

- Estabilidad mecánica: los filtros deberán permanecer planos y en una pieza de manera que puedan proveer un buen sello para eliminar fugas en el sistema de muestreo.
- Estabilidad química: los filtros no deben reaccionar químicamente con su depósito, a pesar de que se les someta a solventes de extracción fuertes. Tampoco deben absorber gases que no se quieran colectar.
- Estabilidad a la temperatura: los filtros deben mantener su estructura y porosidad a temperaturas típicas de muestreo y análisis.
- Resistencia al flujo y capacidad de carga: los filtros deberán permitir el paso de aire suficiente para satisfacer los requerimientos de flujo del instrumento y además obtener un depósito adecuado.
- Las partículas coleccionadas no deberán taponarlo al grado que el flujo decrezca en el muestreador, ya que esto provocaría un decremento en la eficiencia de colección.

En la TABLA2 se presentan los filtros más utilizados con sus respectivas recomendaciones y comentarios con respecto a su empleo.

TABLA 2
TIPOS DE FILTRO PARA MUESTREO
DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Tipo de Filtro	Descripción
De Fibras	
Celulosa	Puede absorber agua por lo que se recomienda un cuidadoso acondicionamiento antes de ser pesado.
Fibra de vidrio	Tienen una gran capacidad y se recomiendan cuando la determinación de la concentración se efectúa gravimétricamente, ya que presentan la formación de diversos compuestos sobre todo en ambientes de smog fotoquímico.
Fibra de cuarzo	Proveen valores de la masa más precisos que los filtros anteriores, pero son frágiles, contienen cantidades variables de Al y Si y adsorben vapores orgánicos, HNO_3 , NO_2 y SO_2 .
De Membrana	
Policarbonato	Fabricado con una base de carbón por lo que es inapropiado para el análisis de carbón. Usado principalmente para el análisis de asbestos y minerales. Diámetro promedio de poro de $0.8 \mu\text{m}$.
Teflón	Inerte a la adsorción de gases, pero también inapropiado para el análisis de carbón. Se disuelve en algunos solventes orgánicos. El único compatible con el método de análisis de

TABLA 2
TIPOS DE FILTRO PARA MUESTREO
DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Tipo de Filtro	Descripción
	difracción de rayos X.
Cloruro de Polivinilo	Se disuelve en algunos solventes orgánicos. El único compatible con el método de análisis de difracción de rayos X.

El filtro seleccionado fue de cuarzo de 37 mm, tipo 2500 QAT-UP, marca Pallflex. A continuación la TABLA3 indica las características de este filtro:

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO
PALLFLEX 2500 QAT-UP

Descripción	Filtro
Material del Filtro	Cuarzo Puro
Díámetro	25 – 90 mm
Espesor típico	432 µm
Peso del filtro	5,8 mg/cm ²
Razón de Flujo de Agua a 0.35 bar (5 psi)	220 mL/min/cm ²
Razón de Flujo de Aire a	73 L/min/cm ²

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO
PALLFLEX 2500 QAT-UP

Descripción	Filtro
0.7 bar (10 psi)	
Máximo Temperatura de Operación – Aire	1093 °C (2000 °F)
Retención de Aerosol*	99,9%

* Tomado de ASTM D 2986-71 0,3 µm (DOP)

3.2. Preparación y pruebas en un impactador de cascada

Preparación del impactador de cascada.

1. Limpiar todos los componentes con alcohol industrial (70% alcohol) de cualquier suciedad o polvo y revisar que no existan obstrucciones en las diferentes etapas del impactador. Secar a temperatura ambiente en un lugar aislado de impurezas como polvo. Se debe inspeccionar si las boquillas de las etapas se encuentran tapadas (se sostiene la etapa y se la coloca a trasluz para verificar si la luz pasa a través de los agujeros de las boquillas).
2. Revisar el estado de los o-rings de las diferentes etapas del equipo y reemplazar si es necesario.

3. Al encender el equipo en vacío, el manómetro debe marcar una presión de 574 mm de agua. Si esto no ocurre, se debe regular dicha presión por medio de la válvula que se encuentra en la bomba de vacío. En caso de existir variaciones en las lecturas del manómetro es indicativo de la presencia de fugas en el sistema.
4. Antes de proceder a tomar la muestra es necesario encender el MOUDI en vacío (sin el filtro y los substratos) con la sonda acoplada a la entrada de 15 a 30 minutos. De esta forma se asegura evitar la presencia de agua, que puede causar interferencia en el momento del muestreo.
5. Una vez efectuado el calentamiento del equipo, se desarma todo el equipo en sus diferentes componentes.
6. Después se procede a ensamblar las diferentes etapas que conforman el equipo. En primer lugar se coloca el filtro de cuarzo, que se ubicará en la parte final del equipo. Posteriormente se deberá colocar la etapa que tenga el diámetro de boquillas más pequeño.
7. Se continúa colocando las etapas y substratos de colección, respetando el orden de menor a mayor diámetro de boquillas. Finalmente se debe colocar la etapa de admisión de la muestra.

8. En la colocación de los filtros y substratos es necesario asegurarse que estos no se doblen ni dañen y que queden perfectamente planos.
9. Una vez que se ha ensamblado el impactador se debe proceder a conectar el equipo a la bomba de vacío y al manómetro por medio de las mangueras. Hay que tomar en cuenta que estas deben quedar ajustadas para evitar fugas.
10. Adaptar la manguera que transporta el fluido desde la fuente al MOUDI, asegurándolo con cinta termo-fundente en su lugar de conexión.
11. Durante el muestreo se debe revisar la presión en el manómetro periódicamente (574 mm H₂O). Esta debe permanecer inalterable pues garantiza que el flujo del gas (30 l/min) sea isocinético a lo largo del periodo de muestreo.
12. Posteriormente se debe apagar la bomba de vacío, desconectar y desarmar el equipo. Se colocan los substratos de aluminio y filtro en el portafiltros para llevar la muestra a un laboratorio, donde se procederá a su análisis y pesaje final.
13. Limpiar las superficies exteriores del MOUDI para evitar la contaminación durante la descarga del equipo.
14. Se debe mantener el impactador en posición vertical para evitar la pérdida de partículas de los diferentes substratos de colección.

Nota: La persona que manipule los substratos y filtro debe utilizar en todo momento guantes quirúrgicos nuevos.

Protocolo para el uso de la balanza analítica

Para el pesaje de los filtros y del material colectado se utilizarán los lineamientos establecidos en el METODO 5 de la USEPA. La balanza estará ubicada en un ambiente de laboratorio (LABORATORIO DE METROLOGÍA, FIMCP de la ESPOL).

Los filtros y substratos a ser pesados antes y después del muestreo deben tener las mismas condiciones de temperatura y humedad de la balanza. Estos se pueden secar en una MUFLA a 105°C durante 2 horas como indica el METODO 5 de la USEPA.

Las muestras a ser pesadas nunca deben ser manipuladas sin el uso de guantes. La muestra debe ser colocada suavemente sobre el plato de pesaje y se procede a cerrar la cámara de pesaje. Una vez que la cámara de pesaje se encuentra cerrada, es necesario esperar a que la lectura del peso se estabilice, usualmente esto demora 10 segundos. La precisión de la lectura de pesaje aumenta al realizar procedimientos sucesivos de pesaje.

Manejo de muestras

A continuación se detallan los pasos a seguir para un apropiado manejo de los filtros antes y después del muestreo:

- Los substratos y filtro deben ser colocados en un lugar que posea condiciones estables de temperatura y humedad relativa (laboratorio).
- Posteriormente deben ser pesados para definir la masa inicial de los mismos
- Después de haber realizado el pesaje inicial, el filtro deberá ser colocado en su respectivo contenedor. El filtro es depositado sobre la base de su contenedor. Una vez que se encuentre correctamente alineado se debe colocar el anillo que lo asegura a su contenedor. Posteriormente se coloca la tapa del contenedor, con lo cual se evita que el polvo presente en el medio se asiente sobre el filtro antes de iniciar el muestreo. Este paso debe ser repetido para los substratos de aluminio.
- Para la colección de la muestra se debe utilizar un filtro de microfibra ultra pura de cuarzo, en este caso se utilizó un filtro de cuarzo de 37 mm de diámetro marca Pallflex, tipo 2500 QAT – UP, también se puede usar substratos de fibra de vidrio. Para el resto de

las etapas se utilizará sustratos de papel de aluminio de 47 mm de diámetro.

- Debido a que la muestra es un aerosol seco, es recomendable aplicar una delgada capa de grasa o silicón sobre los sustratos de las etapas del impactador; con esto se logra disminuir el rebote de las partículas.
- Los contenedores de los sustratos deben ser numerados para identificar la etapa a la cual corresponden y así evitar cualquier confusión entre los mismos. Posteriormente, los sustratos y filtro deben ser colocados en un portafiltro para transportarlos hasta el lugar a muestrear, evitando cualquier tipo de contaminación.
- Cuando el período de muestreo ha concluido, el equipo debe ser trasladado hacia el laboratorio donde se realizó el pesaje inicial. Una vez en este lugar se debe proceder a desarmarlo y extraer los sustratos y filtro, los cuales serán abiertos en un medio ambiente protegido.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL DE CONTROL DE EMISIONES GASEOSAS

El análisis del sistema actual consiste en determinar las características físicas y químicas de la sustancia que se está emitiendo y el sistema que permite el control y retención de esta sustancia.

4.1. Características del contaminante del sistema actual

Durante la fundición del acero por medio de hornos de arco eléctrico, se generan emisiones secundarias en la etapa de

carga, debido al levantamiento de polvo y otras sustancias que se encuentran en el lugar de almacenamiento de chatarra. Durante el proceso de fundición, la corriente eléctrica produce altas temperaturas y fusiona la chatarra produciendo acero líquido. Esta emite material particulado en forma de ceniza; estudios realizados determinan los componentes químicos en porcentaje de masa presentes en la ceniza (TABLA 4). Con las características de porcentaje de masa se puede encontrar la densidad teórica de composición del contaminante.

TABLA 4
DETALLE DE COMPOSICIÓN
QUÍMICA DE LA CENIZA

Componente	Porcentaje [%]
Fe	35,1
Zn	15,4
Cd	0,028
Pb	1,5
Mn	3
Cr	0,38
Ni	0,07
SiO ₂	5,3
Al ₂ O ₃	0,37
CaO	4,8

TABLA 4
DETALLE DE COMPOSICIÓN
QUÍMICA DE LA CENIZA

Componente	Porcentaje [%]
Na ₂ O	0,83
C	0,44
S	0,36
F	0,9
CL	1
Otros óxidos	-

Tomado del Air Pollution Engineering Manual, second edition

Resultados de muestreo de tamaño de partículas

Haciendo una simulación, de modo que las partículas queden en suspensión, se procede al muestreo del material. Para esto se utilizó el equipo simulador de flujo en mangas que se muestra en la Figura 4.1.



FIGURA 4.1. EQUIPO SIMULADOR

De esta forma se obtiene la cantidad de masa en cada etapa del impactador de cascada, mostrado en la Figura 4.2.



FIGURA 4.2. ETAPAS DEL IMPACTADOR DE CASCADA

Se pesan las etapas del impactador antes y después de la medición acorde al procedimiento establecido en las secciones 3.2.2 y 3.2.3 y se obtienen los datos indicados en la Tabla 5.

TABLA 5
RESULTADOS DE MUESTREO

Etapa	Rango (μm)	Diámetro d_j (μm)	Peso Inicial $m_{oj}(\text{g})$	Peso Final $m_{fj}(\text{g})$
0.	>18	24	32,3052	32,5665
1.	18-10	14	32,3294	32,5392
2.	5,6-10	7,8	32,4209	32,4921
3.	3,2-5,6	4,4	32,4187	32,4599
4.	1,8-3,2	2,5	32,422	32,4382
5.	1-1,8	1,4	32,4225	32,4353
6.	0,56-1	0,78	32,3089	32,3155
7.	0,32-0,56	0,44	32,3412	32,3440
8.	0,18-0,32	0,25	32,3001	32,3023
Filtro	0-0,18	0,09	19,7641	19,7645

Con los resultados de la TABLA 5 se puede obtener la masa por etapa m_{ej} y la fracción de masa m_j que es representativa para todo el material particulado en estudio. La fracción de masa m_{aj} representa la fracción de masa en los tamaños menores del diámetro D_j indicado

$$m_{ej} = m_{fj} - m_{oj} \quad (4.1)$$

$$m_j = \frac{m_{ej}}{m_T} \quad (4.2)$$

$$m_{aj} = \sum_{n=0}^j m_n \quad (4.3)$$

En la TABLA6 a continuación se detalla los resultados de la distribución de partícula muestreada.

TABLA 6
DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULA

Diámetro D_j (μm)	Masa m_{ej}(g)	Fracción Masa m_j	Fracción Masa Acumulada m_{aj}
24	0,2613	0,4184	1,0000
14	0,2098	0,3359	0,5816
7,8	0,0712	0,1140	0,2456
4,4	0,0412	0,0660	0,1316
2,5	0,0162	0,0259	0,0657
1,4	0,0128	0,0205	0,0397
0,78	0,0066	0,0106	0,0192
0,44	0,0028	0,0045	0,0086
0,25	0,0022	0,0035	0,0042
0,09	0,0004	0,0006	0,0006
m_T:	0,6245		

Así se puede determinar gran cantidad de las partículas de tamaño significativo¹ que llegan a los filtros de mangas en el sistema actual.

La FIGURA 4.3 representa la distribución de partículas del muestreo. Se aprecia que en partículas grandes (mayores a 10µm) se tienen fracciones de masa superiores a 0,2. Partículas con diámetro de 24µm tienen fracciones de masa de 0,41, lo que indica una elevada cantidad de partículas grandes.

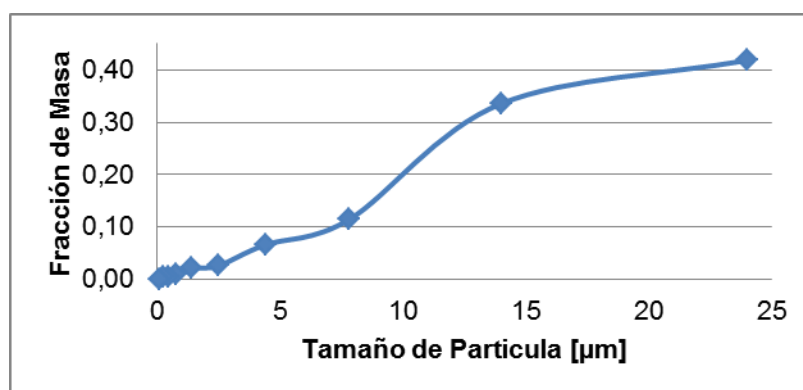
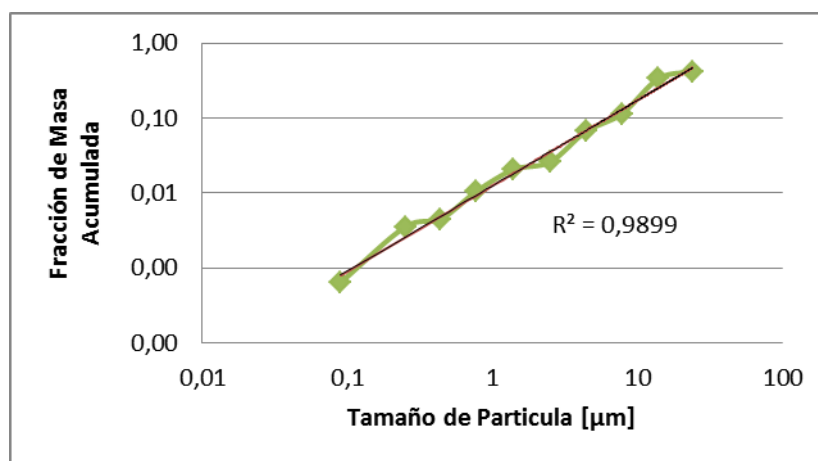


FIGURA 4.3. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

La Figura 4.4 revela una tendencia exponencial entre la Fracción de Masa Acumulada m_{aj} y el tamaño de partícula D_j . Esto se visualiza al

¹ Tamaños de partículas mayores a 10µm se considera significativo y pueden ser controladas mediante ciclones.

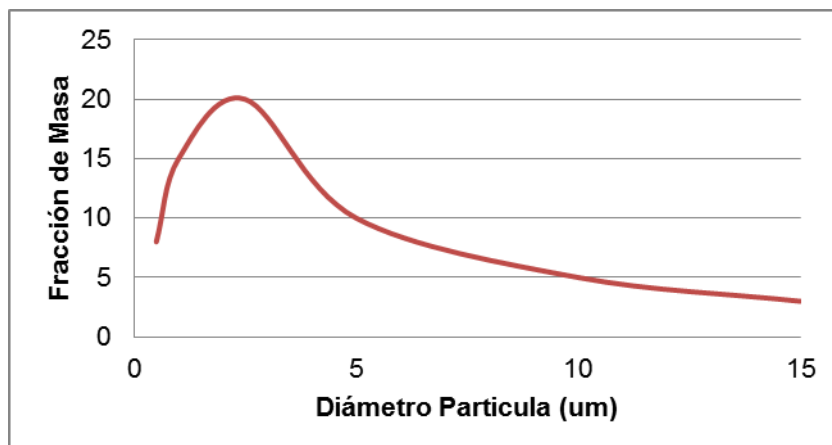
graficar en escala logarítmica y agregando una línea de tendencia representativa para los datos.



R^2 = Coeficiente de Correlación de la línea de tendencia

FIGURA 4.4. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN ESCALA LOGARÍTMICA

Esta distribución de partículas con predominante fracción de masa, correspondiente a tamaño grande, no es la esperada. De acuerdo con distribuciones de tamaño normalizadas por la US-EPA, la típica distribución de partícula de un horno de arco eléctrico tiene la forma indicada en la FIGURA 4.5.



Tomado de la AP-42, Tabla 12.5-2 del Capítulo 12 Sección 5 Iron And Steel Production

FIGURA 4.5. TÍPICA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL ESCAPE DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Las distribuciones de partículas presentadas en la AP-42 han sido generadas mediante el estudio de varias fuentes de emisión del mismo contaminante. La EPA califica estas distribuciones de partículas según la correlación existente entre los datos obtenidos de las distintas fuentes. Mientras mayor sea la correlación entre los datos de una fuente con respecto a otra, la calificación asciende de “E” hasta “A”, donde “A” se debe a la mayor correlación y “E” a la menor.

La distribución de partícula que presenta la AP-42 para Hornos de Arco eléctrico presenta calificación D, lo que indica que hay

variaciones en las tendencias de los datos obtenidos de distintas fuentes. (Ver APÉNDICE B).

Se puede evidenciar que la mayor fracción de masa en una distribución típica corresponde a diámetros menores a $10\mu\text{m}$.

De igual forma, existe una típica distribución de tamaño de partícula para emisiones que salen de un filtro de mangas, y se detalla en la FIGURA 4.6.

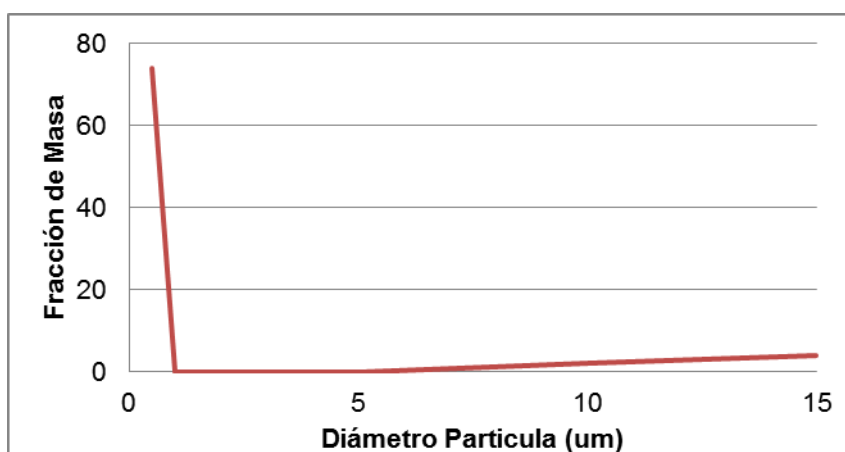


FIGURA 4.6. TÍPICA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL ESCAPE DE UN FILTRO DE MANGAS

Esta distribución del tamaño de partículas en el escape del filtro de mangas es también característica de las partículas en el escape del sistema de control de emisiones gaseosas.

4.2. Problemas asociados al sistema actual

Una vez identificadas las características del contaminante, se analiza el sistema de control de emisiones que se está empleando.

Sistema actual de control de emisiones

El sistema actual comprende dos etapas de colección de material particulado. La primera es una cámara inercial y la segunda son filtros de mangas (ver APÉNDICE C).

El primer sistema recolecta las partículas más grandes provenientes del horno de arco eléctrico. Estas partículas son generalmente de gran tamaño y con diámetro de 0,2mm (materiales ajenos a chatarra como plásticos y piedras). La cámara inercial se responsabiliza de recolectar ceniza gruesa de manera que el intercambiador de calor no reciba un flujo del aire con alta concentración de partículas grandes. Estas partículas grandes podrían causar rozamiento con los tubos del intercambiador, incrementando las incrustaciones que impiden el intercambio de calor entre el flujo refrigerante y el gas.

Luego del intercambio de calor, se transporta hasta los filtros de manga que se encargan de extraer las demás partículas, de modo que la emisión de los gases sea baja. Todo el flujo es controlado

por un ventilador axial. El ventilador extrae el gas desde el horno de arco eléctrico, a través de los sistemas de control, hasta la chimenea para su posterior escape a la atmosfera.

Fallas en el sistema actual

Si bien es un sistema simple, presenta fallas fuertes en cuestión de rendimiento. Debido al incremento de carga que se ha generado, el sistema tiende a saturarse. Esto provoca constantes paradas para cambiar las partes del sistema que han sido averiadas. Este es el caso de las mangas, que si bien son eficientes filtrando las partículas en el gas, tienden a saturarse al filtrar una carga superior a la diseñada.

Los problemas generados durante la producción del acero van desde la saturación de las mangas hasta problemas de funcionamiento en el ventilador por sobrecarga (presión mayor a la de diseño). Las mangas al saturarse, no dejan pasar con facilidad el aire filtrado, y el ventilador succionador necesita más fuerza para vencer la presión. Aunque es un sistema automático de aire reverso, el material de la manga (fieltro - polyester) es afectado.

Del material colectado en planta, se evidencia un alto contenido de ceniza, liviana y de color oscuro (FIGURA 4.7).



FIGURA 4.7. MATERIAL OBTENIDO EN MANGAS

Carga que recibe el filtro de mangas en el sistema actual

Se puede obtener la concentración del contaminante que llega a los filtros de manga en el sistema actual de control de emisiones gaseosa C_i en g/m^3 a partir de datos de planta:

- El caudal de succión de gases provenientes de la fundición de la chatarra en el horno de arco eléctrico Q , que corresponde a $2300 \text{ m}^3/\text{hr}$ a una temperatura T de 80°C .
- El tiempo $\text{tap} - \text{tap}^2, T_t$, que corresponde a 46 min

² Tiempo que demora una colada, desde la carga de chatarra hasta el volteo del horno

- La masa recolectada de material particulado en las mangas por día M_D , que corresponde a 3 ton
- La cantidad de coladas diarias N_C , que corresponde a 12.

Con los datos mencionados se obtiene un valor teórico de la concentración de partículas que se están filtrando en las mangas, mediante la siguiente ecuación:

$$C_i = \frac{54420000 M_D}{Q T_t N_C} \quad (4.4)$$

$$C_i = \frac{54420000 \times 3}{2300 \times 46 \times 12} = 128,59 \text{ g/m}^3$$

Debido a que la cantidad de material particulado que están soportando los filtros de mangas es elevada, se justifica la inclusión de un sistema de control previo a los filtros de manga. Entonces es necesario un sistema adicional que disminuya la alta concentración de partículas responsables de la rápida saturación de los filtros de manga.

4.3. Energía utilizada en el sistema actual

Uno de los recursos que más consumen los sistemas de extracción y control de emisiones gaseosas es la energía

eléctrica. La energía es convertida de eléctrica a energía del fluido mediante un motor-ventilador. La potencia consumida por el ventilador viene en función de la presión que ejerce el ventilador y la magnitud del caudal que se está manejando.

El análisis energético considera las variables que son afectadas debido a la concentración de partículas del gas tratado. Para un sistema de mangas, el cambio de presión es función del tiempo, pues se forma una capa de polvo llamada “torta” o “pastel”. Esta se mantiene adherida a las paredes de las mangas impidiendo el paso del flujo a través de esta. Conforme incrementa el espesor de la capa de polvo, incrementa la caída de presión en el sistema. Esta capa se elimina con los mantenimientos de la manga.

Para el presente caso el mantenimiento consiste en soplado de aire a presión desde el interior de la manga. Así se provoca el desprendimiento de la capa de polvo de modo que pueda circular el aire a través de la manga sin obstáculos.

Los cálculos para la determinación de la caída de presión provocada por la capa de polvo son de tipo empírico, y necesitan de comparación entre tipos de materiales (gases de combustión, composición del material particulado, etc.).

Para un sistema de mangas, la caída de presión depende de la capa de polvo³. La ecuación 4.5, a continuación, detalla un modelo⁴ que representa la caída de presión en las mangas.

$$S_T = S_e + (K_f)_c W_c + K_f W_o \quad (4.5)$$

Siendo:

S_T , la caída de presión total del filtro de mangas

S_e , la caída de presión del filtro limpio (sin partículas)

$(K_f)_c$, la resistencia que presenta el polvo que se encuentra

impregnado en el filtro de mangas y no puede ser removido por soplado

W_c , la densidad del polvo impregnado.

³ Comúnmente referenciada como pastel o torta de polvo

⁴ Dennis y Klemm

K_f , la resistencia de la capa de polvo adherida al filtro (pastel de polvo).

W_o , la densidad de área de la capa de polvo.

De esta ecuación se puede observar tres fases de caída de presión, que corresponden a la caída dada por el filtro limpio (S_e), el polvo impregnado en el filtro $((K_2)_c W_c)$ y la capa de polvo adherida durante la operación ($K_2 W_o$). Dos de estas tres fases pueden ser consideradas constantes en el tiempo; la caída de presión dada por el filtro limpio y la capa de polvo impregnada al filtro⁵.

⁵ Se considera constante ya que su variación en tiempos cortos (1 hora) es muy inferior a la dada por el filtro limpio (alrededor de 50mmH₂O del filtro limpio contra 3mmH₂O de polvo impregnado). La continua operación del filtro de mangas provoca que la caída de presión del polvo impregnado llegue a ser significativa (hasta 20 mm H₂O) lo cual es el indicio que el filtro se encuentra saturado.

Teniendo en cuenta los valores que varían en el tiempo, la resistencia que provoca la capa de polvo depende de la concentración que llega al filtro. Disminuyendo esta concentración disminuye el crecimiento acelerado de la capa de polvo en el filtro.

Lo que respecta a $K_2 W_0$ puede reescribirse mediante cálculos empírico en sistema inglés:

$$K_f W_0 = K_2 V_{gt}^2 C_i t = K_2 V_{gt}^2 \frac{C_i}{n_m} t = \Delta P_{mt} \quad (4.5)$$

Siendo:

ΔP_{mt} , la caída de presión del pastel de polvo $[pulg. H_2 O]$.

K_2 , el coeficiente de resistencia del polvo $\left[\frac{pulg. H_2 O / (\frac{pie}{min})}{lb \frac{pie^2}{pie^2}} \right]$.

V_{gt} , la velocidad de filtración o proporción gas-tela $\left[\frac{pie}{min} \right]$.

t , el tiempo en que opera el filtro $[min]$.

n_m , numero de mangas por compartimento.

De datos obtenidos en campo, se obtiene la operación de cada uno de los compartimientos de mangas desde 1 a 2 minutos, dependiendo de las condiciones físicas de la chatarra derretida. Mientras un compartimiento de mangas está operando, el otro está siendo limpiado mediante sistema de aire reverso. Cada compartimiento posee 21 mangas, obteniendo un total de 42 para la actual planta de tratamiento de emisiones.

Utilizando el caso crítico (operación de 16 minuto por compartimiento) y una velocidad de filtración de $7 \frac{\text{pie}}{\text{min}}$ obtenido del

APÉNDICE D, se realizan los cálculos para determinar la caída de presión en un compartimiento. Estos cálculos abarcan desde que se encuentran las mangas limpias hasta 1 minuto después

(rango de K_2 es de 1,2 - 30 $\frac{\text{pulg.H}_2\text{O} / (\frac{\text{pie}}{\text{min}})}{\text{pie}^2}$, tomando para el presente

caso un valor de 7).

$$\Delta P_{mt} = 7 * 7^2 * \frac{0,008028}{21} * 16 = 2.097 \text{pulg.H}_2\text{O} = 522,585 \text{Pa}$$

Este valor de presión representa el mayor arrastre que genera el pastel de polvo antes de cambiar de compartimiento. Solo enfocándose en el pastel de polvo, se puede apreciar un

incremento lineal de la presión con respecto al tiempo según el modelo utilizado. Manteniendo el flujo constante, se puede encontrar la variación de potencia del fluido para un tiempo tap-tap. Con el área bajo la curva se obtiene la energía utilizada en este tiempo tap-tap. La potencia del fluido se obtiene mediante la ecuación 4.6.

$$W_{fluido} = \Delta P \times Q = 5222,585 Pa * 2300 m^3/hr = 333,87 W \quad (4.6)$$

Considerado la potencia máxima del fluido necesaria para vencer la caída de presión y el tiempo de operación de cada compartimento se puede tabular el comportamiento de la potencia durante el tiempo tap-tap. (TABLA7 y FIGURA 4.8).

TABLA 7
POTENCIA DE FLUIDO EN UN
TIEMPO TAP-TAP

Tiempo [min]	Potencia [W]
0	0
16*	333,87
	0
32*	333,87
	0
46	392,14

Nota

* Momento en que cada compartimento alcanza su máxima potencia y entra en operación otro compartimento

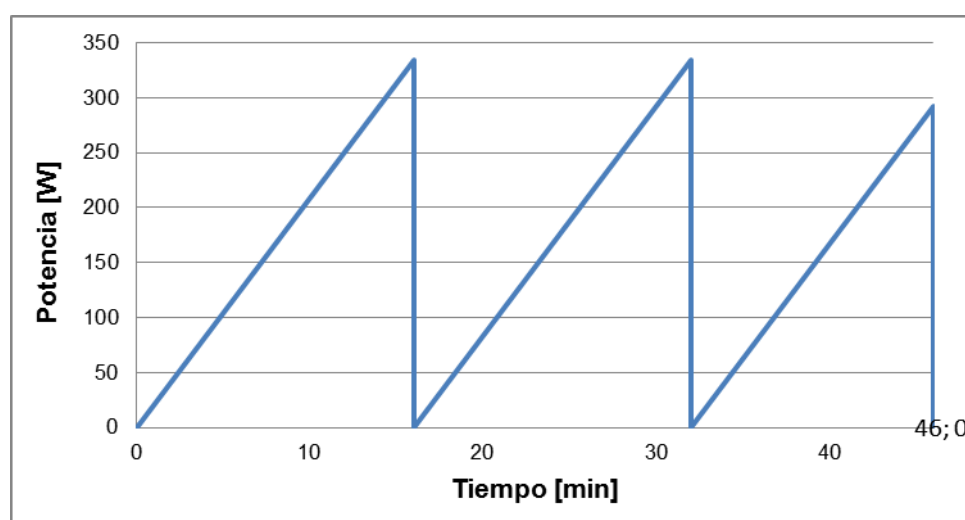


FIGURA 4.8. VARIACIÓN DE POTENCIA DURANTE LA
OPERACIÓN DE LA MANGA

El área debajo de la curva representa el consumo de energía del fluido que atraviesa el pastel de polvo. Del comportamiento de la

presión con respecto al tiempo se puede encontrar un valor medio durante la operación de las mangas (160,58W con 2300 m³/hr y 251,35Pa). Para un tiempo tap-tap de 46 minutos, el valor energético obtenido mediante el área debajo de la curva sería de $443,214 \cdot 10^3 \text{J}$.

CAPÍTULO 5

5. DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES MEJORADO

El diseño a implementar mantiene activos los dos sistemas de colección previamente mencionados. El sistema de colección será en seco, de modo que disminuya la carga de las mangas; consiguiendo disminuir el desgaste (alargando tiempo de vida) la frecuencia de los mantenimientos. Puesto que las mangas son seleccionadas para

proveer un tratamiento final a las emisiones generadas en el proceso metalúrgico, este último dispositivo colecta las partículas de menor tamaño. En caso de existir un excedente de partículas grandes, las fibras que filtran las emisiones gaseosas se saturarán en consecuencia.

El sistema en seco seleccionado es un ciclón, debido a su bajo costo de mantenimiento y alta eficiencia para partículas de tamaño grande (mayor a $10\mu\text{m}$). El ciclón se instalará entre el intercambiador de calor existente y los filtros de manga (ver APÉNDICE E)

5.1. Diseño de un sistema de control para la contaminación

5.1.1. Dimensiones

Tuberías

La caída de presión que sucede en la tubería es crucial para un buen diseño. Se deben evitar grandes pérdidas de presión en las tuberías por dos razones:

- Mientras más pequeño sea el diámetro de la tubería, habrá más caída de presión y más fricción entre el gas y la tubería.
- La caída de presión existente en filtros de mangas y la futura implementación del ciclón será muy alta en

comparación a la pérdida de presión asociada con la conducción del gas y sus accesorios.

En el presente caso, el caudal del aire que transporta la tubería se considera bajo. No se espera que exista una alta pérdida de presión debido a un caudal limitado.

La selección de la tubería en función de la caída de presión del fluido que transporta. Este cálculo se detalla más en la Sección 5.1.3.

El diámetro seleccionado corresponde a 406 mm (genera una caída de presión de 36 mm de H₂O). Este diámetro se selecciona en base a la disponibilidad de materiales en el mercado. Tuberías con este diámetro son comunes en el mercado ecuatoriano.

La tubería conducirá el gas desde el intercambiador de calor actual hasta el ciclón en seco. Por motivos de costo, la tubería actual que conduce los gases desde el nuevo ciclón hasta el filtro de mangas se mantendrá, ya que su diámetro es adecuado para el caso

Ciclón

Para el diseño del ciclón se realizan cálculos empíricos debido al alto grado de complejidad del modelo de aire que circula por el interior. Se utiliza la metodología de dimensiones de ciclones de alta eficiencia y para el cálculo se emplean ecuaciones de Lapple y ajustes algebraicos de Theodore y De Paola.

Existen 3 tipos de ciclones, de los cuales se muestran las características en la TABLA8 a continuación,

TABLA 8
DESEMPEÑO DE LOS TIPOS DE CICLONES

Unidad	Rango de Control			Espacio	Costo
Ciclón	0,1-1 μ	1-10 μ	10-50 μ	Requerido	\$/año/m ³
Estándar	Bajo	Bajo	Bueno	Mucho	7
Alta Eficiencia	Bajo	Medio	Bueno	Moderado	11
Alto Caudal	Bajo	Bajo	Medio	Mucho	10

Tomado del Air Pollution Engineering Manual, second edition

Debido a que se necesita coleccionar partículas de diámetro pequeño (menor a 10 μ m), se selecciona un ciclón de alta eficiencia,

Los parámetros característicos de un ciclón son los siguientes que forman la geometría del ciclón detallada en la FIGURA 5.1:

D: Diámetro del cuerpo del ciclón [m]

H: Altura del ducto de entrada de gases [m]

W: Ancho del ducto de entrada de gases [m]

D_e: Escape de gases [m]

S: Capturador de vórtice [m]

D_e: Escape de material recolectado [m]

L_b: Longitud del cuerpo del ciclón [m]

P_c: Longitud del generador de vórtice [m]

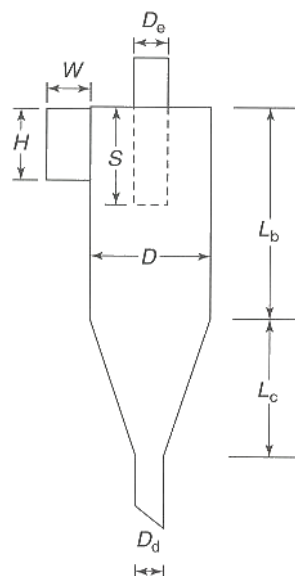


FIGURA 5.1. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN CICLÓN

Los ciclones de alta eficiencia se caracterizan por tener una mayor longitud de cuerpo de ciclón L_b y menor diámetro D . Seleccionando un ciclón de alta eficiencia tenemos las relaciones mostradas en la TABLA 9.

TABLA 9
RELACIONES DE UN CICLÓN DE ALTA EFICIENCIA

D/D	H/D	W/D	D_e/D	S/D	L_b/D	P_c/D	D_{pb}/D
1	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	2,5	0,375

Tomado del Air Pollution Engineering Manual, second edition

El método aplicado es prueba y error; y el valor iterado es el diámetro D del ciclón.

Las pautas para la selección del diámetro están dadas por los resultados obtenidos de eficiencia η y caída de presión ΔP .

Mientras menor sea el diámetro del ciclón, más fuerte será el impacto de las partículas con sus paredes y tendrá más eficiencia de colección. Al mismo tiempo la caída de presión generada se incrementa debido al constante cambio de dirección del fluido dentro del ciclón.

Por otro lado, mientras mayor sea el diámetro del ciclón, menor será el impacto de las partículas con las paredes; lo que provoca menor eficiencia de colección. Sin embargo, con el tiempo la caída de presión generada disminuye pues el cambio de dirección debido a las paredes del ciclón es menos pronunciado.

Las características de los gases que extraídos del horno son detalladas en la TABLA 10 a continuación.

TABLA 10
COMPOSICIÓN DE LOS GASES
DE ESCAPE DE UN HORNO DE
ARCO ELÉCTRICO

Compuesto	%
CO	71
VOC	4
SOx	7
NOx	18

Tomado del Air Pollution Engineering Manual, second edition

Se puede ver que el gas predominante es Monóxido de Carbono –CO. Este gas tiene propiedades a la temperatura y presión ambiente que se detallan en la TABLA11.

TABLA 11
CARACTERÍSTICA DEL GAS A LA ENTRADA
DEL CICLÓN

Parámetro	Variable	Valor
Temperatura	T	80 °C
Caudal de Gases	Q	2300 m ³ /hr
Viscosidad	μ	2,09x10-5 Pa.s
Densidad del Gas	ρ_g	1 kg/m ³
Densidad de Partícula	ρ_p	4660,57 kg/m ³

Datos de Planta

Con estas características se asume un diámetro del ciclón. Iterando el diámetro del ciclón se obtiene su geometría, dada por las relaciones en la TABLA 9.

De acuerdo a las pautas para la selección del diámetro del ciclón, se deben obtener la eficiencia del ciclón y la caída de presión asociada al mismo tiempo.

La eficiencia de colección del ciclón se obtiene mediante la combinación de las siguientes ecuaciones

$$V_g = \frac{Q}{7200\pi HW} \quad (5.1)$$

$$N_\varepsilon = \frac{1}{H} \left(L_b + \frac{L_c}{2} \right) \quad (5.2)$$

$$d_{p50} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N_\varepsilon \rho_p V_\varepsilon}} \quad (5.3)$$

$$\eta_j = \frac{1}{\left(\frac{d_{p50}}{d_j} \right)^2} \quad (5.4)$$

(6.1), (6.2) y (6.3) en (6.4):

$$\eta_j = \frac{1}{\left(\frac{\frac{9\mu W}{\sqrt{2\pi \frac{L}{H} \left(L_b + \frac{L_c}{2} \right) \rho_p \frac{Q}{7200\pi HW}}}}{d_j} \right)^2} \quad (5.5)$$

Siendo:

V_g : Velocidad de entrada de los gases $\left[\frac{m}{s} \right]$

N_ϵ : Número de vueltas que da el fluido dentro del ciclón

d_{p50} : Tamaño de partícula mínimo que alcanza el 50% de eficiencia de recolección colectiva $[m]$

d_j : Tamaño de partícula $[m]$

η_j : Eficiencia para tamaño de partícula

La eficiencia del ciclón se obtiene mediante la ecuación (1.2).

La caída de presión asociada al ciclón se obtiene mediante la combinación de las siguientes ecuaciones

$$H_V = K \frac{HW}{D_\varepsilon^2} \quad (5.7)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_\varepsilon V_\varepsilon^2 H_V \quad (5.8)$$

(5.7) en (5.8)

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_\varepsilon V_\varepsilon^2 K \frac{HW}{D_\varepsilon^2} \quad (5.9)$$

Siendo:

H_V : Cabezal de velocidad del ciclón

K :⁶ Constante empírica de ciclones

ΔP : Caída de presión generada en el ciclón [Pa]

La limitante para encontrar un tamaño de ciclón apropiado se encuentra en esta caída de presión, que no debe ser muy baja. Se espera que en un ciclón la caída de presión no sea inferior a los 50 Pa.

⁶ Constante empírica tiene el valor de 16 para ciclones en forma tangencial y 7,5 para ciclones con aleta de entrada

Se prueba con varios diámetros, buscando un balance entre la eficiencia y la caída de presión. En la TABLA 12 se observa el comportamiento de la eficiencia y de la caída de presión en función del diámetro del ciclón. (El detalle de cada uno de los tamaños de ciclón se puede observar en el APÉNDICE F).

TABLA 12
SELECCIÓN DEL DIÁMETRO
ADECUADO

D [m]	η [%]	ΔP [Pa]
4.0	4.99	0.51
3.0	10.73	1.61
2.0	26.62	8.16
1.5	42.65	25.80
1.4	46.68	34.00
1.3	50.96	45.73
1.2	55.47	62.99
1.1	60.16	89.21
1.0	64.96	130.62
0.9	69.8	199.08
0.8	74.6	318.89
0.7	79.27	544.01
0.6	83.70	1007.85

El diámetro que presenta las mejores propiedades corresponde a 1,1m, debido a su eficiencia moderada (mayor a 60%) y poca caída de presión (menor de 100Pa).

La FIGURA 5.2 muestra los datos de la Tabla 13 de modo que se aprecie el comportamiento de la eficiencia y de la caída de presión en función del diámetro del ciclón.

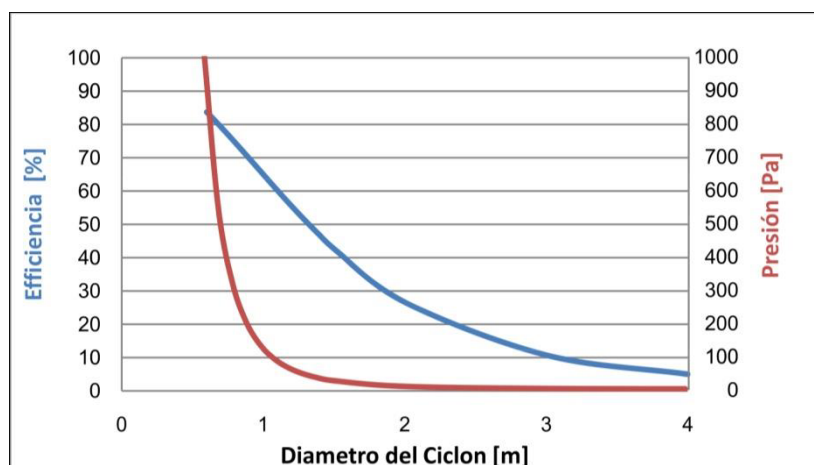


FIGURA 5.2. EFICIENCIA Y CAÍDA DE PRESIÓN VS. DIÁMETRO DEL CICLÓN

Finalmente, tomando en cuenta la Tabla 10, se presenta la TABLA 13 que indica las dimensiones del ciclón con los resultados óptimos.

TABLA 13
DIMENSIONES SELECCIONADAS PARA EL CICLÓN

D	H	W	De	S	Lb	Pc	Dpb
1,1	0,75	0,3	0,75	0,75	2,25	3,75	0,56

Nota

Unidades en Metros

Ver Plano 1

5.1.2. Eficiencia de colección

Con las dimensiones de la estructura ciclónica obtenida, se calcula la eficiencia de colección usando la ecuación 1.2. Esta eficiencia de colección se detalla en la siguiente TABLA 14.

TABLA 14
EFICIENCIA DEL DISEÑO

$d_j (\mu m)$	η_j	m_j / m_t	$\eta_j * m_j$
24	0.826	0,4184	0,34549
14	0.617	0,3359	0,20734
7,8	0.334	0,1140	0,03803
4,4	0.137	0,0660	0,00906
2,5	0.049	0,0259	0,00127
1,4	0.016	0,0205	0,00033
0,78	0.005	0,0106	0,00005
0,44	0.002	0,0045	0,00001
0,25	0.001	0,0035	0,00000
0,09	0.000	0,0006	0,00000
η			0,60157

La eficiencia total η es 0,60157, o en términos de porcentaje 60,157%. Para partículas que entran al ciclón con un tamaño de 14 μ m se tiene una eficiencia de colección de 0,6157, que es admisible debido a que para este tamaño las partículas ya están en el rango de ser consideradas como grandes (mayor a 10 μ m). Por lo tanto, se acepta el diseño del ciclón con las presentes dimensiones.

5.1.3. Pérdida de presión asociada

Tuberías

Aunque se estima que las pérdidas de presión asociadas al pequeño tramo de tubería de conducción de gases entre el intercambiador de calor y el ciclón son bajas, se ha procedido a realizar el cálculo de esta.

Utilizando gráficos normalizados de pérdida de presión de aire en tuberías⁷, se obtiene la velocidad del fluido dentro

⁷ Crawford 1976

de una tubería con diámetro D_{tub} igual a 0406mm
(asumido)

$$v_{tub} = \frac{Q}{900\pi D_{tub}^2} = \frac{2300}{900\pi 0,406^2} = 4,925 \frac{m}{s}. \quad (5.10)$$

Siendo:

v_{tub} : Velocidad del gas dentro de la tubería en $\frac{m}{s}$

Utilizando el valor de D_{tub} y Q transformado a $0,6388 \frac{m^3}{s}$, se

determina la caída de presión por cada metro de tubería

$\Delta P_L'$ de $0,65 \frac{N}{m^2}$ (ver APÉNDICE G).

El recorrido de la tubería tiene una longitud L de 5,5 m. De esta forma se calcula la caída de presión asociada a la tubería.

$$P_L = P_L' \times L = 0,65 \times 5,5 = 3,575 Pa \quad (5.11)$$

Siendo ΔP_L la caída de presión asociada a la tubería en Pa.

Ciclón

La caída de presión del ciclón es uno de los factores principales para el diseño del sistema de control de

emisiones gaseosa. Este valor es una de las limitantes para dimensionar la estructura, pues su valor es significativo para el sistema.

La Tabla 13, presenta el valor de la caída de presión correspondiente al ciclón con diámetro 1,1m considerado óptimo. La caída de presión generada es 89,21Pa.

5.2. Selección de materiales

En un sistema de ciclón en seco se selecciona el material en función al contaminante que está encerrando.

El gas que es conducido por el interior del sistema contiene elevadas cantidades de polvos, cuya composición química se detalla en la Tabla 3. Muchos de estos polvos y gases provenientes de la fusión de la chatarra son altamente corrosivos. Debido al grosor de las partículas, se raspan las paredes de las tuberías que los conducen a los sistemas de control de contaminación. Se entiende por esto que se requiere emplear acero con alta dureza y resistente a la corrosión por oxígeno.

La presión en el interior de las tuberías no es de gran relevancia pues no son elevadas presiones de vacío. Sin embargo, hay que tomar en cuenta la temperatura de los gases que circulan por el

interior, ya que se podrían afectar las características del material de las tuberías de conducción.

Ciclón

El acero utilizado en el sistema de control de contaminación elegido (cyclón en seco), es acero ASTM A36. Este tipo de acero es común en el mercado y tiene propiedades balanceadas como el límite de fluencia de 250MPa.

Para la protección del acero contra el desgaste se empleara un material resistente a temperaturas de hasta 100°C y capaz de soportar el roce de las partículas con las paredes del ciclón. El material más apropiado para este fin es el caucho natural.

La propiedad que se busca es la resistencia al desgarramiento. A 100°C, el caucho natural tiene una resistencia al desgarramiento de 75Kg/cm. Esto evita las incrustaciones de partículas provenientes del horno eléctrico en las paredes metálicas del ciclón y por tanto previene su pérdida de eficiencia.

En el mercado local se encuentra con facilidad acero ASTM A36, que viene en planchas de 0,914x3,050 metros (914x3050 mm). El material se puede rolar para formar el cuerpo del ciclón y sus componentes, esto es posible gracias a la maleabilidad de este tipo de acero.

5.3. Disposición de polvos colectados

Las partículas recolectadas, también llamadas a nivel ambiental como Polvos de Acería, son consideradas residuos peligrosos y, por tanto, su denominación de acuerdo a la US-EPA es K061.

El material colectado en su mayoría contiene partículas de hierro (Fe) y Zinc (Zn). Al entrar en contacto con la lluvia tienden a filtrarse en el suelo provocando altos contenidos de hierro y terminan mezclándose con el agua subterránea. Esta mezcla produce efectos adversos en la vegetación cercana al lugar de planta.

Es importante mantener este material recolectado lo más aislado del medio ambiente, en un lugar con techo para protegerlo de lluvias y en base de hormigón, concreto o geo-membrana para impedir infiltraciones en el suelo. Otra medida para evitar el contacto con el ambiente es almacenar estos residuos en recipientes térmicos.

Debido a su composición química, su disposición puede traer beneficios si es correctamente administrada. Entre las alternativas para disposición del K061 se encuentra:

- a)Elaboración de Clinker en la industria cementera: Se podría usar como materia prima el K061 debido al alto contenido de hierro.
- b)Recuperación del Zinc y metales pesados: Una de las formas de recuperar el Zinc es mediante piro-metalurgia. En el proceso se remueven los metales más livianos, dejando los metales pesados libres para ser recuperados.

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS

Una vez culminada la etapa de diseño, se analizan las ventajas de haber mejorado el sistema actual de emisiones gaseosas. En el presente capítulo se analiza el efecto de la inclusión del ciclón en el sistema de control para reducir la carga de los filtros de manga y mejorar el desempeño del mismo.

6.1. Beneficios de la implementación del sistema

Al implementar un ciclón antes del filtro de mangas, se reduce la carga en cada uno de los componentes que se encuentran después del ciclón.

La eficiencia del ciclón para cada tamaño viene dado en función de su geometría y la velocidad del fluido que encierra. Para el caso del presente ciclón, a partir del 14 μ m se puede obtener una eficiencia de colección superior a 60%. Este aspecto se puede apreciar en la Figura 6.1.

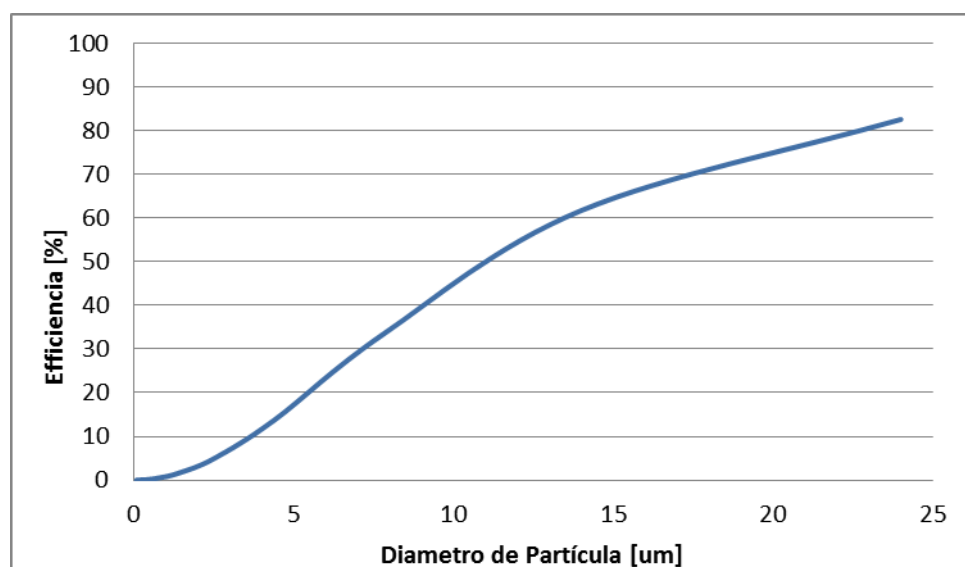


FIGURA 6.1. EFICIENCIA DEL CICLÓN DISEÑADO

La distribución de partículas del fluido a controlar tiene una distribución que obedece a la mostrada en la Figura 6.1. De modo que si existen partículas grandes en el fluido, el ciclón operará con mínimo 55.28% de eficiencia para partículas de tamaño mayor a 14µm. Considerando la distribución de partícula del fluido, la eficiencia del ciclón diseñado corresponde al 60,16%; es decir, este porcentaje de masa se está reteniendo en el ciclón, mientras que el restante 39,84% tiene alta probabilidad de no ser colectado.

Utilizando la ecuación (2.2)

$$\eta = \frac{C_i - C_e}{C_i} \rightarrow C_e = C_i(1 - \eta_j)$$

$$C_e = 128,59(1 - 0,6016) = 51,23 \frac{g}{m^3}$$

Se proyecta que llegará a los filtros de mangas 60,16% menos de partículas de lo que llegaría sin el ciclón instalado en entre el intercambiador de calor y el filtro de mangas. De esta forma, la concentración del Material Particulado que llega a los filtros de manga obtenida en la Sección 4.2.2 (128,59 g/m³), sería reducida en 60,16% por el ciclón. Así, la nueva concentración de Material Particulado que llegaría a los filtros de mangas sería 51,23 g/m³.

Lo que sale del ciclón son las partículas que no pudieron ser controladas debido a que su tamaño es inferior a 10um.

La ecuación (2.2) puede también interpretarse para cada tamaño de partícula.

$$\eta_j = \frac{m_j - m_j'}{m_j} \rightarrow m_j' = m_j(1 - \eta_j) \quad (6.1)$$

Comparando la distribución de tamaño que existe en la entrada del ciclón (obtenida en la Tabla 7 de la Sección 4.2.1) y aplicando la ecuación (6.1) se obtiene la siguiente Tabla 15.

TABLA 15
ENTRADA SALIDA DE PARTÍCULAS DEL CICLO SEGÚN SU TAMAÑO

D_j	m_j	η_j	m_j'
24	0,4184	0,34549	0,07292
14	0,3359	0,20734	0,12861
7,8	0,1140	0,03803	0,07599
4,4	0,0660	0,00906	0,05691
2,5	0,0259	0,00127	0,02467
1,4	0,0205	0,00033	0,02017
0,78	0,0106	0,00005	0,01052
0,44	0,0045	0,00001	0,00448
0,25	0,0035	0,00000	0,00352
0,09	0,0006	0,00000	0,00064

La Figura 6.2 exhibe la diferencia de distribución de tamaño de partícula a la entrada y a la salida del ciclón, siendo la salida la distribución de partícula que estaría llegando a los filtros de mangas.

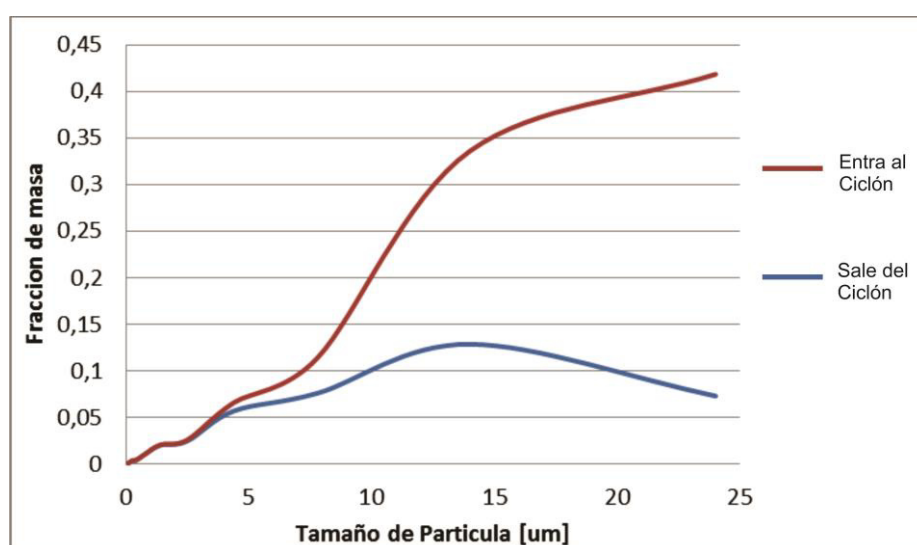


FIGURA 6.2. DISTRIBUCIÓN DE PARTICULA A LA SALIDA DEL CICLÓN

6.2. Energía utilizada en el sistema mejorado

Utilizando la misma metodología de la Sección 4.3, se obtiene la caída de presión para el nuevo diseño de la planta de tratamiento de gases con la inclusión del ciclón. Se utilizan las mismas condiciones de velocidad gas-tela y tiempo de operación de cada compartimento.

$$\Delta P_{mt} = 7 * 7^2 * \frac{0,003198}{21} * 16 = 0,8358 \text{ pulg. } H_2O = 208,182 Pa$$

Esta es la caída de presión que generaría el pastel de polvo considerando un ciclón previo a los filtro de mangas. Comparando con el valor sin la inclusión del ciclón (522,585Pa), se puede aumentar el tiempo de operación de cada compartimento de modo que opere una sola vez por tiempo tap-tap. De esta forma se disminuye la frecuencia de limpiado.

De la ecuación 4.6 se obtiene un nuevo valor para un tiempo de operación de 23 minutos (la mitad del tiempo tap-tap)

$$\begin{aligned} \Delta P_{mt} &= 7 * 7^2 * \frac{0,002084}{21} * 23 &= 1,20138 \text{ pulg. } H_2O \\ &= 299,24 Pa \end{aligned}$$

Ahora, para el análisis de energía consumida hay que considerar la caída de presión generada por el ciclón (89,21Pa). El comportamiento de la potencia se detalla en la Tabla 16.y se grafica en la Figura 6.3.

TABLA 16
POTENCIA DE FLUIDO EN UN
TIEMPO TAP-TAP

Tiempo [min]	Potencia [W]
0	59.99
23*	191.18
	59.99
46	191.18

Nota

* Momento en que cada compartimento alcanza su máxima potencia y entra en operación otro compartimento

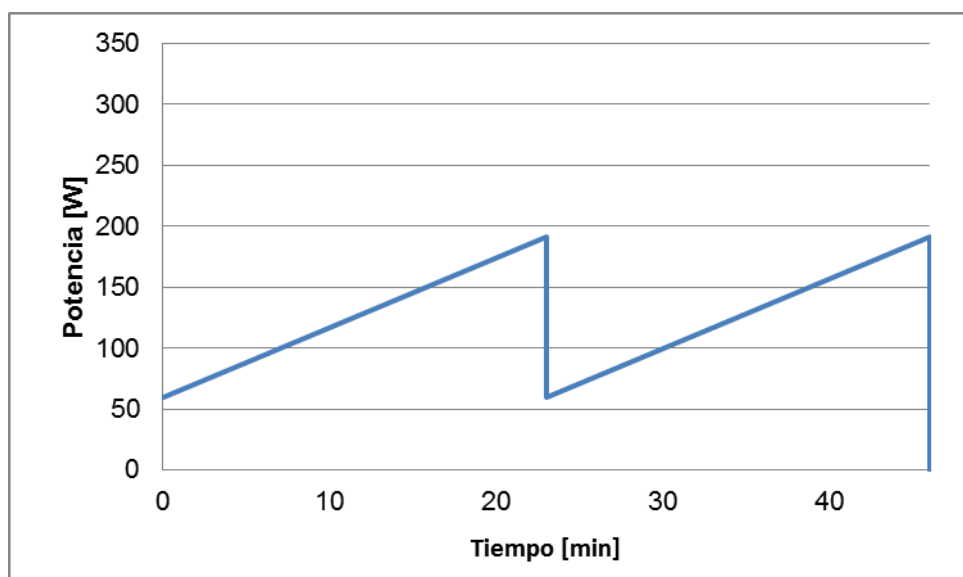


FIGURA 6.3. VARIACIÓN DE POTENCIA DURANTE LA
OPERACIÓN DE LA MANGA DEL REDISEÑO CON CICLÓN

De igual forma que en la Sección 4.3, se puede encontrar un valor medio durante la operación de las mangas (125.58W con 2300 m³/hr y 194.22Pa). Para un tiempo tap-tap de 46 minutos, el

valor energético obtenido mediante el área debajo de la curva sería de $346,614 \cdot 10^3 \text{J}$ (comparado con el valor anterior $443,214 \cdot 10^3 \text{J}$, la diferencia es $96,599 \cdot 10^3 \text{J}$ representando un ahorro energético de 21,79%). Este sistema además de que consume menos energía, no utiliza 3 compartimientos durante un ciclo tap-tap (1 compartimiento repite su operación). El rediseño con el ciclón sólo debe limpiarse una vez cada tiempo tap-tap.

6.3. Costos del montaje del sistema y tiempo de fabricación

Los ciclones tienen estructuras muy simples, de bajo costo y rápida fabricación y montaje. De los trabajos realizados para fabricar un ciclón, la mayor parte del presupuesto se destina al uso de equipos para la maquinación (cortadora, roladora y amoladora) y soldadura de las láminas de acero. Gracias a información del mercado local, constructoras especializadas en montaje de estructuras cilíndricas, se obtiene la información detallada en la Tabla 17

TABLA 17
COSTOS INVOLUCRADOS EN LA
FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL
CICLÓN

Equipos	
Máquina de Soldar	48,28
Amoladora	4,02
Cotadora	53,65
Roladora	268,24
Mano de Obra	
Armador	95,76
Soldador	90,40
Ayudante	62,23
Insumos	
Acero ASTM A 36	98
Montaje	80
Subtotal	800,58
Gastos Administrativos	
20%	160,12
TOTAL	960,70

El valor TOTAL mostrado representa el costo real de fabricación y montaje de un ciclón con las características del recomendado en esta tesis.

El tiempo de fabricación, debido a su simple construcción, ha sido calculado en 40 horas laborables que corresponden a 5 días laborables. De igual manera, la actividad que requiere de mayor inversión, en lo que respecta a tiempo, es en la maquinación de

las láminas de acero. Sin embargo, para mejorar el tiempo y reducir costos, esta estructura puede ser construida en un taller ajeno a la planta y transportada para su montaje.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Cada sistema de control de emisiones gaseosas debe ser diseñado de acuerdo a los contaminantes que debe retener. Para el caso de emisiones de un horno de arco eléctrico que funde chatarra, el contaminante más significativo es el material particulado. Este es el contaminante que la normativa ambiental ecuatoriana obliga a todas las industrias siderúrgicas a monitorear.

- El material particulado, como se demostró en el Capítulo 4, tiene diferentes tamaños que indican si es grande (tamaño mayor a 10 μm) intermedias (tamaños entre 2,5 y 10 μm) y pequeñas (tamaño menor a 2,5 μm). Este último tamaño corresponde a partículas no sedimentables, es decir, que debido a su tamaño pueden permanecer suspendida en el aire ambiente.
- Mediante la determinación de la distribución del tamaño de partícula de las emisiones del horno, se pudo concluir y determinar que las partículas con tamaños mayores a 10 μm corresponden a más del 50% del total de partículas muestreadas. Las partículas al tener mayor diámetro, tienen mayor volumen y por ende mayor masa.
- Es imprescindible utilizar un sistema de control de emisiones para controlar un rango de partículas con tamaño mayor a 10 μm , para lo cual se elige como sistema de control un ciclón de alta eficiencia. La saturación de las mangas es constante, y es demostrado con el aumento en la frecuencia de mantenimientos y cambio de mangas. Se promediaba que cada compartimento del sistema de filtro de mangas de aire reverso era utilizado 3 veces en un tiempo tap-tap.
- El ciclón de la presente tesis es diseñado como respaldo para el sistema de filtros de mangas. El ciclón es un sistema que en comparación con otros sistemas de control de emisiones, es de bajo costo mantenimiento y fabricación. El ciclón diseñado tiene de

diámetro principal 1.1 metros y una altura total (altura del cuerpo del ciclón y del cono) de 4.4 metros. Sin embargo, lo más importante de este diseño es su eficiencia de 60,16% y su caída de presión de 89.21Pa. La eficiencia de colección es superior al 60% para partículas mayores a 14 μ m, lo cual indica que logra controlar las partículas grandes (mayores a 10 μ m).

- El área de estudio considera que la caída de presión que se produce por la capa de polvo generada durante la operación en un tiempo tap-tap varia proporcional con el tiempo. La Sección 4.3 demuestra el uso de 3 compartimentos (Figura 4.9) por cada tiempo tap-tap para que la caída de presión no exceda el límite del ventilador-motor actual (máximo valor alcanzado 522Pa). Mediante un análisis energético, se determinó que durante cada tiempo tap-tap se utiliza $443,214 \times 10^3$ J de energía para el sistema actual. Al insertar un ciclón antes de los filtros de mangas, se disminuye en 60,16% la cantidad de material particulado que llega a los filtros de mangas.
- A este sistema mejorado, se le realizó un análisis energético que determinó que empleara $346,214 \times 10^3$ J. Este valor representa 21,79% menos energía. Además, utiliza 2 compartimentos limpios, opuesto a los 3 del sistema actual.
- Es recomendable, para el diseño de un sistema de control de emisiones gaseosas, utilizar sistemas para cada tamaño de partícula.

Es decir, un ciclón o cámara de sedimentación pueden controlar tamaños de partículas grandes (mayores a 10 μm) mientras que los filtros de manga o precipitadores electrostáticos pueden controlar los tamaños más pequeños (menores a 10 μm). De esta forma, se abarca todos los rangos de tamaños y se obtiene un sistema eficiente en la recolección de partículas.

APÉNDICES

APÉNDICE A

LEGISLACION AMBIENTAL ECUATORIANA PARA EMISIONES AL AIRE DESDE HORNO DE ARCO ELECTRICO

4.3.2 Elaboración de vidrio

Tabla 7. Límites máximos permisibles de emisiones al aire para elaboración de vidrio

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES ^[1]
Partículas Totales	--	250	200	mg/Nm ³
Óxidos de Nitrógeno	--	1 200	1 000	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	--	1 800	1 500	mg/Nm ³

Notas:

^[1] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales de de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno. Esta norma no se aplica cuando se utilice inyección de oxígeno en los quemadores.

4.3.3 Elaboración de pulpa de papel

Tabla 8. Límites máximos permisibles de emisiones al aire para elaboración de pulpa de papel

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES
Partículas Totales	Pasta por proceso kraft o por bisulfito	250	150	mg/Nm ³ ^[1]
Dióxido de Azufre	--	10	5	kg/ton pasta ^[2]

Notas:

^[1] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales de de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C.

^[2] kg/ton pasta: kilogramos por tonelada de pasta.

4.3.4 Fundición de metales

Tabla 9. Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fundición de metales

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES ^[1]
Partículas Totales	Cubilotes:			
	de 1 a 5 t/h	600	250	mg/Nm ³
	mayor a 5 t/h	300	150	mg/Nm ³
	Arco eléctrico:			
	menor 5 t	350	250	mg/Nm ³
	mayor 5 t	150	120	mg/Nm ³

Notas:

^[1] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales de de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno.

4.3.5 Elaboración de azúcar: equipos de combustión que utilizan bagazo como combustible

Tabla 10. Límites máximos permisibles de emisiones al aire desde combustión de bagazo en equipos de instalaciones de elaboración de azúcar

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES
Partículas Totales	--	300	150	mg/m ³ ^[1]

Notas:

^[1] mg/m³: miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 12% de O₂, en base seca.

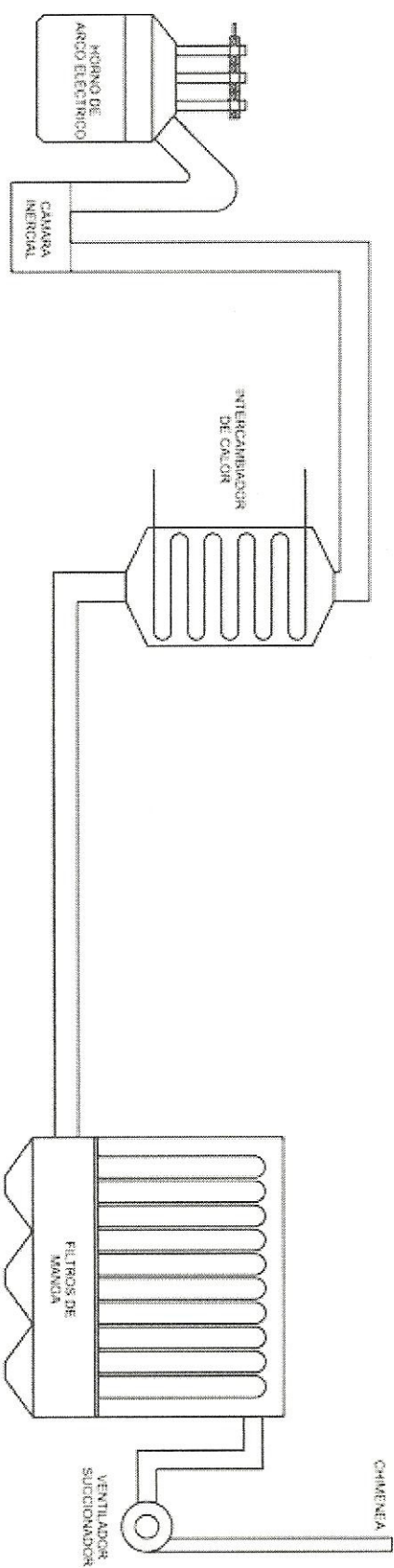
APÉNDICE B

DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE PARTICULA PARA PROCESO DE FUNDICION POR MEDIO DE ARCO ELECTRICO

Source	EMISSION FACTOR RATING	Particle Size (μm) ^a	Cumulative Mass % $\leq$ Stated Size	Cumulative Mass Emission Factor	
				kg/Mg	lb/ton
Electric arc furnace melting and refining carbon steel Uncontrolled ^m	D	0.5	8	1.52	3.04
		1.0	23	4.37	8.74
		2.5	43	8.17	16.34
		5.0	53	10.07	20.14
		10	58	11.02	22.04
		15	61	11.59	23.18
		— ^d	100	19.0	38.0
Electric arc furnace Melting, refining, charging, tapping, slagging Controlled by direct shell evacuation plus charing hood vented to common baghouse for carbon steel ⁿ	E	0.5	74 ^b	0.0159	0.0318
		1.0	74	0.0159	0.0318
		2.5	74	0.0159	0.0318
		5.0	74	0.0159	0.0318
		10	76	0.0163	0.0327
		15	80	0.0172	0.0344
		— ^d	100	0.0215	0.043
Open hearth furnace Melting and refining Uncontrolled	E	0.5	1 ^b	0.11	0.21
		1.0	21	2.22	4.43
		2.5	60	6.33	12.66
		5.0	79	8.33	16.67
		10	83	8.76	17.51
		15	85 ^c	8.97	17.94
		— ^d	100	10.55	21.1

APENDICE C

SISTEMA ACTUAL DE CONTROL DE EMISIONES



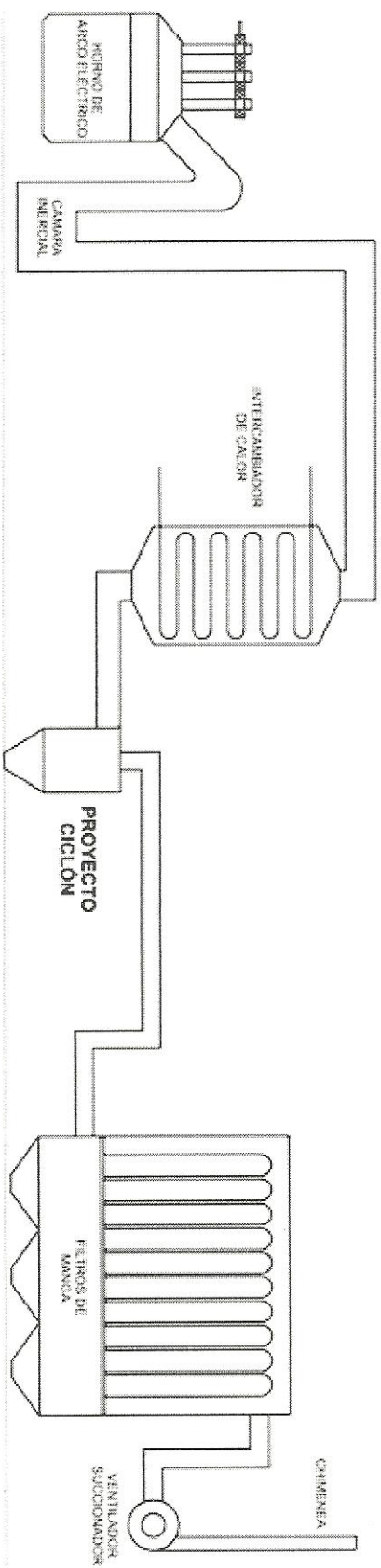
APÉNDICE D

TEJIDO APLICADO

POLVO	SACUDIMIENTO/TEJIDO TRAMADO AIRE REVERSO/TEJIDO TRAMADO	PULSE-JET / TEJIDO FIELTRO AIRE REVERSO/TEJIDO FIELTRO
Alúmina	2.5	8.0
Asbestos	3.0	10
Bauxita	2.5	8.0
Carbón negro	1.5	5.0
Cal	2.5	8.0
Cocoa, chocolate	2.8	12
Cemento	2.0	8.0
Cosméticos	1.5	10
Esmalte	2.5	9.0
Granos	3.5	14
Feldespatos	2.2	9.0
Fertilizantes	3.0	8.0
Fluor	3.0	12
Ceniza volátil	2.5	5.0
Grafito	2.0	5.0
Oxido de hierro	2.5	7.0
Sulfato de hierro	2.0	6.0
Mica	2.7	9.0
Pigmentos de pintura	2.5	7.0
Papel	3.5	10
Plásticos	2.5	7.0
Arena	2.5	10
Silica	2.5	7.0
Detergentes	2.0	5.0
Azúcar	2.0	13
Talco	2.5	5.0
Tabaco	3.5	
Oxido de zinc	2.0	

APENDICE E

ESQUEMA DE IMPLANTACION DEL CICLON



APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	3
----------------------	---

Dimensiones del Ciclon

H	W		De	S	Lb	Lc	Db
1,5	0,6		1,5	1,5	4,5	7,5	1,125

Caída de Presion

V

entrada 0,71 m/s

ΔH 5,667512 m

5E-

dp50 05 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 1,612559 Pa

Zc 6 m

Diametro [m]	Eficiencia	Fraccion	Recoleccion
24,000	0,189	0,418	0,07922
14,000	0,074	0,336	0,02473
7,800	0,024	0,114	0,00274
4,400	0,008	0,066	0,00051
2,500	0,003	0,026	0,00007
1,400	0,001	0,020	0,00002
0,780	0,000	0,011	0,00000
0,440	0,000	0,004	0,00000
0,250	0,000	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

0,107298925

APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	2
----------------------	---

Dimensiones del Ciclon

H	W		De	S	Lb	Lc	Db
1	0,4		1	1	3	5	0,75

Caída de Presion

V

entrada 1,597 m/s

ΔH 5,667512 m

dp50 3E-05 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 8,16358 Pa

Zc 4 m

Diametro [m]	Eficiencia	Fraccion	Recoleccion
24,000	0,441	0,418	0,18444
14,000	0,211	0,336	0,07105
7,800	0,077	0,114	0,00876
4,400	0,026	0,066	0,00170
2,500	0,008	0,026	0,00022
1,400	0,003	0,020	0,00005
0,780	0,001	0,011	0,00001
0,440	0,000	0,004	0,00000
0,250	0,000	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

0,266239432

APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	1,1
----------------------	-----

Dimensiones del Ciclon

H	W		De	S	Lb	Lc	Db
0,55	0,22		0,55	0,55	1,65	2,75	0,4125

Caída de Presion

V

entrada 5,28 m/s

dp50 1E-05 m

ΔH 5,667512 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 89,21336 Pa

Zc 2,2 m

Diametro [m]	Eficiencia	Fraccion	Recoleccion
24,000	0,826	0,418	0,34549
14,000	0,617	0,336	0,20734
7,800	0,334	0,114	0,03803
4,400	0,137	0,066	0,00906
2,500	0,049	0,026	0,00127
1,400	0,016	0,020	0,00033
0,780	0,005	0,011	0,00005
0,440	0,002	0,004	0,00001
0,250	0,001	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

0,601577028

APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	1
----------------------	---

Dimensiones del Ciclon

H	W	De	S	Lb	Lc	Db
0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	2,5	0,375

Caída de Presion

V

entrada 6,389 m/s

ΔH 5,667512 m

dp50 1E-05 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 130,6173 Pa

Zc 2 m

Diametro [m]	Eficiencia	Fracción	Recoleccion
24,000	0,863	0,418	0,36115
14,000	0,682	0,336	0,22916
7,800	0,400	0,114	0,04558
4,400	0,175	0,066	0,01154
2,500	0,064	0,026	0,00166
1,400	0,021	0,020	0,00043
0,780	0,007	0,011	0,00007
0,440	0,002	0,004	0,00001
0,250	0,001	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

0,649593943

APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	0,9
----------------------	-----

Dimensiones del Ciclon

H	W		De	S	Lb	Lc	Db
0,45	0,18		0,45	0,45	1,35	2,25	0,3375

Caída de Presion

V

entrada 7,888 m/s

ΔH 5,667512 m

8E-

dp50 06 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 199,0814 Pa

Zc 1,8 m

Diametro [m]	Eficiencia	Fraccion	Recoleccion
24,000	0,896	0,418	0,37506
14,000	0,746	0,336	0,25076
7,800	0,477	0,114	0,05443
4,400	0,225	0,066	0,01486
2,500	0,086	0,026	0,00223
1,400	0,029	0,020	0,00059
0,780	0,009	0,011	0,00010
0,440	0,003	0,004	0,00001
0,250	0,001	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

0,698034943

APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	0,8
-----------------------------	------------

Dimensiones del Ciclon

H	W		De	S	Lb	Lc	Db
0,4	0,16		0,4	0,4	1,2	2	0,3

Caída de Presion

V

entrada 9,983 m/s

ΔH 5,667512 m

7E-

dp50 06 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 318,8899 Pa

Zc 1,6 m

Diametro [m]	Eficiencia	Fraccion	Recoleccion
24,000	0,925	0,418	0,38699
14,000	0,807	0,336	0,27123
7,800	0,565	0,114	0,06446
4,400	0,293	0,066	0,01932
2,500	0,118	0,026	0,00306
1,400	0,040	0,020	0,00082
0,780	0,013	0,011	0,00014
0,440	0,004	0,004	0,00002
0,250	0,001	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

0,74604399

APÉNDICE F

ITERACIONES PARA TAMAÑO DEL CICLON

Diametro Asumido [m]	4
----------------------	---

Dimensiones del Ciclon

H	W		De	S	Lb	Lc	Db
2	0,8		2	2	6	10	1,5

Caída de Presion

V

entrada 0,399 m/s

ΔH 5,667512 m

8E-

dp50 05 m

Cabeza 6,4

Caída de Presion 0,510224 Pa

Zc 8 m

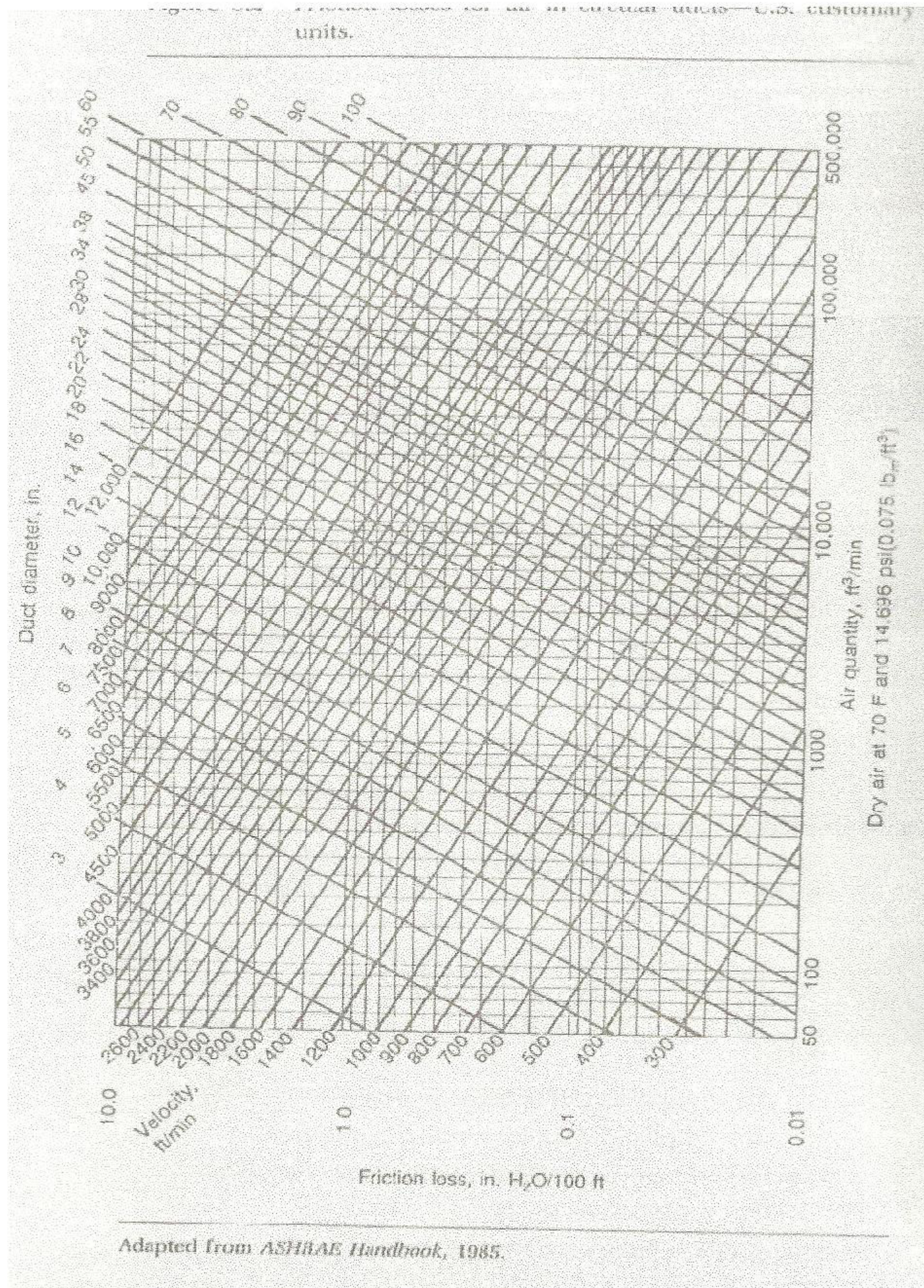
Diametro [m]	Eficiencia	Fracccion	Recoleccion
24,000	0,090	0,418	0,03753
14,000	0,032	0,336	0,01090
7,800	0,010	0,114	0,00117
4,400	0,003	0,066	0,00022
2,500	0,001	0,026	0,00003
1,400	0,000	0,020	0,00001
0,780	0,000	0,011	0,00000
0,440	0,000	0,004	0,00000
0,250	0,000	0,004	0,00000
0,090	0,000	0,001	0,00000

TOTAL

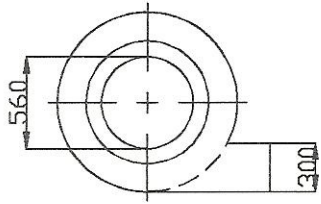
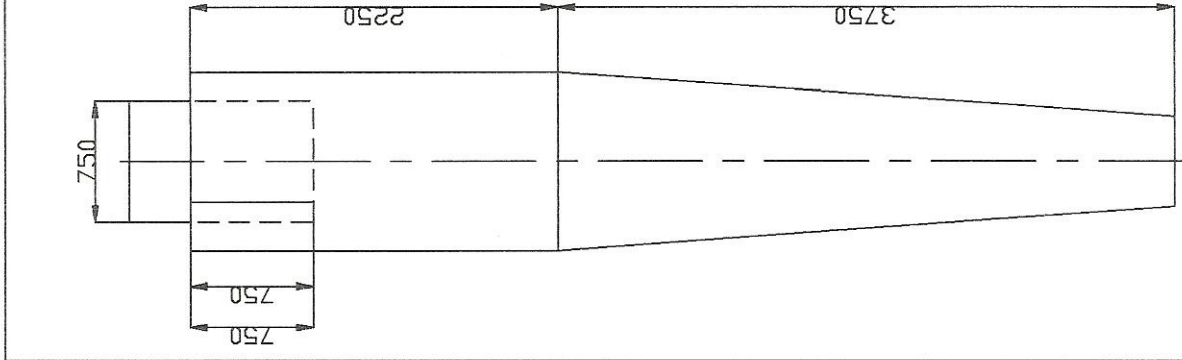
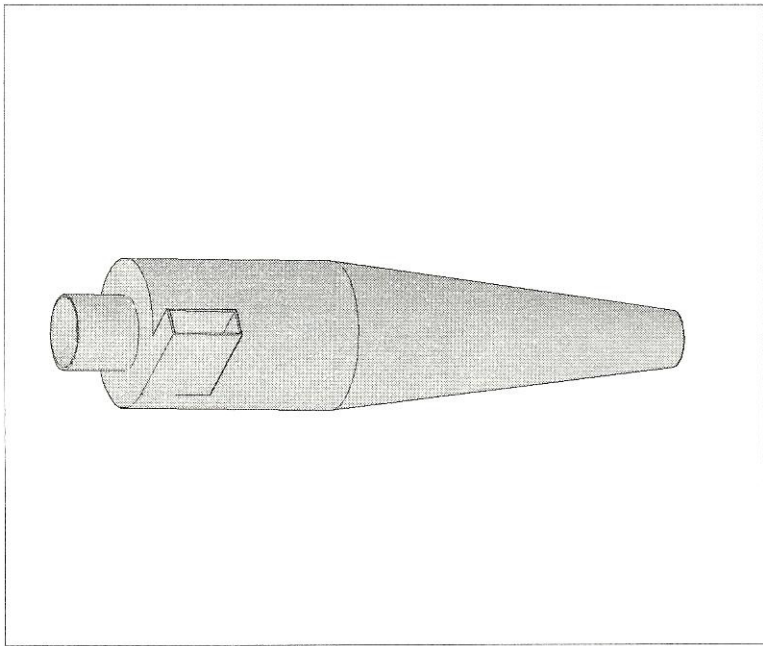
0,049855992

APENDICE G

CAIDA DE LA PRESION DE LA TUBERIA



NGrev	Nota de revisión	Fecha	Firma	Compro bado



NOMBRE DE ARCHIVO CICLÓN	Nº FSCM	PLANO 1	ESCALA 1:1404
TAM. ESQUEMÁTICO			
DIBUJADO			
COMPROBAR MP			
APROB.			
REALIZADO ENERO 2010 EA			
REV			
CONTRATO Nº			
E1			

BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS

DAVIS, WAYNE T.; Air Pollution Engineering Manual, Second Edition; Willey Interscience, New York, 2000

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS, APPLICATIONS; Industrial Venrtilation a Manual of Recommended Practicem 18th Edition, Michigan, 1984

COOPER AND ALLEY: Air Pollution Control, Waveland Press Inc. Second Edition; 1 994.

RICHARDS, JOHN R., AIR CONTROL TECHNIQUES; Control of Particulate Matter Emissions Student Manual Third Edition; ICES Ltd; North Carolina 2000

WARK Y WARNER; Contaminación del Aire (Origen y Control) Segunda Edición; Editorial Limusa; 1992.

DAVID H.F. LIU, BELA G. LIPTAK; Environmental Engineers' Handbook, Second Edition; CRC Press, New Jersey, 1997

CROOM MILES L.; Filter Collector Technology 4th Edition; Mc Grawhill, 1994

DOCUMENTOS WEB RECOMENDADOS

- US-EPA. AP-42, Iron and Steel Production

<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/final/c12s05.pdf>

- Ministerio de Ambiente del Ecuador, Texto Unificado de la Legislación Secundaria TULSMA, Libro VI Anexo 3

<http://www.ambiente.gob.ec/docs/LIBRO%20VI%20Anexo%203.pdf>