

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**ESTUDIO DE LA EFICACIA DE UN SISTEMA DE FILTRADO POR
AGUA DE MATERIAL PARTICULADO Y DE GASES**

CLAUDIA ANDREA JOFRÉ MOLINEIRO

SANTIAGO – CHILE

2014

**ESTUDIO DE LA EFICACIA DE UN SISTEMA DE FILTRADO POR
AGUA DE MATERIAL PARTICULADO Y DE GASES**

CLAUDIA ANDREA JOFRÉ MOLINEIRO

Profesor Guía Dr. Juan Pablo Hurtado

“Trabajo de Graduación presentado a la Facultad de Ciencias, en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al Título de Ingeniero Físico”

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
SANTIAGO – CHILE

2014

ESTUDIO DE LA EFICACIA DE UN SISTEMA DE FILTRADO POR AGUA DE MATERIAL PARTICULADO Y DE GASES

CLAUDIA ANDREA JOFRÉ MOLINEIRO

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Juan Pablo Hurtado Cruz del Departamento de Ingeniería en Minas y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del candidato, Dra. Yolanda Vargas, Dr. Ernesto Gramsch y Dr. Raúl Labbé.

Dra. Yolanda Vargas _____

Dr. Ernesto Gramsch _____

Dr. Raúl Labbé _____

Profesor Patrocinador

Dra. Yolanda Vargas

Directora

Dr. Juan Pablo Hurtado

Profesor Guía

©CLAUDIA ANDREA JOFRÉ MOLINEIRO

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos,
por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita
Bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, Marco Antonio y Gladys, por todo lo que me han entregado a lo largo de todos estos años, sobre todo por la compañía y el apoyo durante este largo camino. A mis hermanas, Sandra y Paula, por la compañía, apoyo y los momentos de risas y diversión.

A Eduardo por estos siete años de amor, cariño, risas, paciencia, compañía, ayuda y apoyo, en especial, en los momentos más duros.

A mis amigos, tanto lo que están como los que quedaron en el camino, por todos los momentos de alegrías, estudio, relajo y sobre todo por la amistad, en especial a Ignacio, Eduardo, Claudio, Manu .N, Manu .S, Rodrigo y José, con quienes compartí los mejores momentos a lo largo de todo este camino.

A todos mis compañeros de carrera con los que compartí durante todos estos años.

A mi profesor guía Juan Pablo Hurtado por darme la oportunidad de trabajar en su laboratorio y por el apoyo entregado a lo largo de todo el trabajo de titulación.

¡Muchas gracias a todos!

Índice de contenidos

Resumen	1
Capítulo I: Introducción	2
1.1 Objetivos del proyecto.....	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Justificación del Proyecto.....	3
1.3 Metodología.....	3
1.4 Descripción proyecto y lugar de trabajo.....	4
Capítulo II: Antecedentes Generales	5
2.1 Definición de Contaminación Ambiental.....	5
2.2 Efluentes gaseosos.....	5
2.2.1 Tipos de Contaminantes.....	5
2.2.1.1 Dióxido de Azufre (SO₂).....	6
2.2.1.2 Monóxido de Carbono (CO).....	6
2.2.1.3 Ozono (O₃)	7
2.2.1.4 Óxidos de Nitrógeno (NxOy).....	7
2.2.1.5 Plomo (Pb).....	8
2.2.1.6 Material Particulado (PM10).....	8
2.3 Mecanismos de Captura de Material Particulado	9
2.3.1 Cámara de Sedimentación	9
2.3.2 Ciclones	10
2.3.3 Filtros de Tela	12
2.3.3.1 Filtro de Mangas	12
2.3.3.2 Filtro tipo Cartucho o Cartridge.....	13

2.3.4 Precipitadores Electrostáticos	14
2.3.4.1 Tipos de Precipitadores Electrostáticos	14
2.3.5 Colectores Húmedos o Scrubbers	18
Capítulo III: Estudio de Aspiradora Comercial.....	19
3.1 Características Aspiradora.....	19
3.2 Estructura de la Aspiradora	19
3.2.1 Detalle parte interior aspiradora.	22
3.2.1.1 Estanque de agua.....	22
3.2.1.2 Filtro de agua.....	24
3.2.1.3 Filtro HEPA	26
3.3 Sistema de Filtrado de la Aspiradora.....	27
3.4 Curva Característica de funcionamiento	29
3.4.1 Norma AMCA-ASHRAE STANDARD 51-1985	29
3.4.1.1 Pieza de Transformación	30
3.4.1.2 Formulación	31
3.4.1.3 Instrumentos para Medición Normalizados	35
3.4.2 Montaje Experimental y Procedimiento de Medición de Caudal	38
3.4.2.1 Montaje Experimental.....	38
3.4.2.2 Procedimiento Experimental	39
3.4.3 Resultados Medición de Caudal	40
Capítulo IV: Sistema de Filtrado de Polvo.....	44
4.1 Montaje Experimental	44
4.1.1 Ingreso de polvo a la aspiradora.	44
4.1.1.1 Descripción del sistema de alimentación de material	45
4.1.2 Sistema de salida.....	51
4.1.2.1 Descripción elementos del sistema de salida	51
4.2 Procedimiento Experimental	54

4.2.1 Algoritmo para Automatización de Sistema de alimentación de material particulado	54
4.2.2 Relaciones entre número de vueltas, tiempo de delay y cantidad de material.....	55
4.2.3 Preparación muestras de polvo	57
4.2.4 Preparación Filtros de la bomba de aspiración	60
4.2.5 Medición de Filtrado de Polvo.....	60
4.2.5.1 Material retenido en sistema de filtro de aspiradora	61
4.2.5.2 Material que sale de la aspiradora.....	62
4.3 Resultados Medición de Polvo	62
4.3.1 Material retenido en sistema de filtrado de aspiradora.....	63
4.3.2 Material que sale de la aspiradora.....	64
Capítulo V: Sistema de Filtrado de Gases.....	66
5.1 Montaje Experimental	66
5.1.1 Ingreso de Gases a la aspiradora.....	66
5.1.2 Sistema de salida.....	67
5.2 Procedimiento Experimental	68
5.3 Resultados medición de gases	70
5.3.1 Medición sin agua en el estanque	70
5.3.2 Medición de gases durante 15 minutos.....	71
5.3.3 Medición de gases durante 30 minutos.....	71
5.3.4 Medición de gases durante 45 minutos.....	72
5.3.5 Consumo de agua durante mediciones.....	74
Capítulo VI: Efectividad del Filtrado de material particulado y de gases, y dimensionamiento industrial	75
6.1 Efectividad del filtrado por agua de material particulado y de gases.....	75
6.1.1 Efectividad del Filtrado de material particulado.....	75

6.1.1.1 Caracterización del material inicial y final	75
6.1.1.2 Comparación masa de material inicial y final.....	88
6.1.1.3 Cálculo Efectividad.....	95
6.1.2 Efectividad del Filtrado de Gases	97
6.2 Dimensionamiento.....	103
6.2.1 Diseño de estanque de agua.....	103
6.2.2 Relación de ancho, largo y altura de estanque respecto a volumen de agua	104
6.2.3 Relación de caudal respecto a volumen de agua.....	106
6.2.4 Relación dimensiones difusor con dimensiones de estanque de agua	106
Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones	109
Referencias	111

Índice de Figuras

Capítulo II: Antecedentes Generales

Figura 2.1: Cámara de Sedimentación.....	10
Figura 2.2: Diagrama de un Ciclón.....	11
Figura 3.3: Estructura de un Filtro de Mangas.....	12
Figura 2.4: Filtro de cartucho o Cartridge.....	13
Figura 2.5: Precipitador Electrostático Placa – Alambre.....	15
Figura 2.6: Precipitador Electrostático Placa Plana.....	15
Figura 2.7: Precipitador Electrostático Tubo-Alambre.....	16
Figura 2.8: Precipitador Electrostático Húmedo.....	17
Figura 2.9: Precipitador Electrostático de dos etapas.....	17
Figura 2.10: Cámara roceadora de sedimentación por gravedad.....	18

Capítulo III

Figura 3.1: Detalle parte superior aspiradora comercial.....	20
Figura 3.2: Detalle parte interior aspiradora comercial.....	20
Figura 3,3: Detalle parte trasera aspiradora comercial.....	21
Figura 3.4: Detalle parte inferior aspiradora comercial.....	21
Figura 3.5: Estanque de agua.....	22
Figura 3.6: Vistas estanque de agua.....	22
Figura 3.7: Estanque de agua en SolidWorks.....	23

Figura 3.8: Filtro húmedo.....	23
Figura 3.9: Flotador.....	24
Figura 3.10: Rejilla.....	24
Figura 3.11: Vistas Filtro de agua.....	25
Figura 3.12: Filtro de agua en SolidWorks.....	25
Figura 3.13: Filtro de aspiración.....	26
Figura 3.14: Filtro de espuma.....	26
Figura 3.15: Filtro HEPA.....	26
Figura 3.16: Inyectores de la aspiradora.....	27
Figura 3.17: Esquema Etapa 2 sistema de filtrado.....	28
Figura 3.18: Esquema Etapa 3 sistema de filtrado.....	28
Figura 3.19: Salida superior de la aspiradora comercial.....	29
Figura 3.20: Salida trasera de la aspiradora comercial.....	29
Figura 3.21: Esquema montaje recomendado por Norma.....	30
Figura 3.22: Pieza de Transformación recomendada por Norma.....	30
Figura 3.23: Barómetro utilizado en mediciones.....	35
Figura 3.24: Psicrómetro utilizado en mediciones.....	36
Figura 3.25: Conexiones Tubo de Pitot según Norma.....	36
Figura 3.26: Posiciones Tubo de Pitot según Norma.....	37
Figura 3.27: Tubo de Pitot de 3 mm utilizado en mediciones.....	37

Figura 3.28: Manómetro Diferencial Digital utilizado en mediciones.....	37
Figura 3.29: Montaje Experimental para medición de caudal.....	38
Figura 3.30: Pieza de transformación para mediciones.....	39
Figura 3.31: Cono estrangulador.....	39
Figura 3.32: Posiciones Tubo de Pitot utilizadas en mediciones.....	40
Figura 3.33: Gráfico Caudal Q versus Presión Total.....	42
Figura 3.34: Gráfico Caudal Q versus Presión Dinámica.....	42
Figura 3.35: Gráfico Caudal Q versus Presión Estática.....	43
Capítulo IV	
Figura 4.1: Sistema Automatizado para alimentación de material.....	44
Figura 4.2: Placa Arduino Mega 2560.....	45
Figura 4.3: Esquema módulo con chip L298N.....	46
Figura 4.4: Conexión Arduino y L298N.....	46
Figura 4.5: Especificaciones motor paso a paso.....	47
Figura 4.6: Elementos para construcción caja protectora.....	48
Figura 4.7: Engranaje utilizado en motor.....	49
Figura 4.8: Engranaje para unión de motor y tornillo.....	49
Figura 4.9: Caja acrílica con sistema de engranaje.....	49
Figura 4.10: Unión de embudo con tubo de cobre para depósito de material.....	50
Figura 4.11: Tolva de alimentación de material particulado.....	50

Figura 4.12: Caja de madera para montaje experimental.....	51
Figura 4.13: Pieza de Transformación metálica.....	52
Figura 4.14: Pieza de transformación unida a tubo de PVC.....	52
Figura 4.15: Bomba de aspiración utilizada en mediciones.....	53
Figura 4.16: Estructura por donde ingresa aire succionado.....	53
Figura 4.17: Transformador y dispositivo de encendido de bomba.....	53
Figura 4.18: Montaje Experimental en SolidWorks.....	54
Figura 4.9: Algoritmo automatización de sistema de alimentación de material.....	55
Figura 4.20: Tamizador Tyler RX-29-10.....	57
Figura 4.21: Balanza RADWAG AS 220/C2 utilizada en medición.....	60
Figura 4.22: Bomba de succión de agua.....	61
 Capítulo V	
Figura 5.1: Montaje Experimental para medición de filtrado de gases.....	66
Figura 5.2: Unión entre tubo de escape y tubo de ingreso a la aspiradora.....	67
Figura 5.3: Analizador de gases utilizado en medición.....	68
 Capítulo VI	
Figura 6.1: Caracterización de material inicial muestras de 100 gramos.....	77
Figura 6.2: Caracterización de material inicial muestras de 400 gramos.....	79
Figura 6.3: Caracterización de material inicial muestras de 600 gramos.....	81
Figura 6.4: Caracterización de material final muestras de 100 gramos.....	84

Figura 6.5: Caracterización de material final muestras de 400 gramos.....	86
Figura 6.6: Caracterización de material final muestras de 600 gramos.....	88
Figura 6.7: Comparación masa inicial y final muestra de 100 [g] en 15 minutos.....	89
Figura 6.8: Comparación masa inicial y final muestra de 100 [g] en 30 minutos.....	89
Figura 6.9: Comparación masa inicial y final muestra de 100 [g] en 45 minutos.....	90
Figura 6.10: Caracterización material inicial y final muestras de 100 gramos.....	90
Figura 6.11: Comparación masa inicial y final muestra de 400 [g] en 15 minutos.....	91
Figura 6.12: Comparación masa inicial y final muestra de 400 [g] en 30 minutos.....	91
Figura 6.13: Comparación masa inicial y final muestra de 400 [g] en 45 minutos.....	92
Figura 6.14: Caracterización material inicial y final muestras de 400 gramos.....	92
Figura 6.15: Comparación masa inicial y final muestra de 600 [g] en 15 minutos.....	93
Figura 6.16: Comparación masa inicial y final muestra de 600 [g] en 30 minutos.....	93
Figura 6.17: Comparación masa inicial y final muestra de 600 [g] en 45 minutos.....	94
Figura 6.18: Caracterización material inicial y final muestras de 600 gramos.....	94
Figura 6.19: Distribución Eficiencia para medición de 15 minutos.....	97
Figura 6.20: Distribución Eficiencia para medición de 30 minutos	97
Figura 6.21: Distribución Eficiencia para medición de 45 minutos	98
Figura 6.22: Concentración O_2 en mediciones.....	99
Figura 6.23: Concentración CO en mediciones.....	100
Figura 6.24: Concentración CO_2 en mediciones.....	101

Figura 6.25: Concentración NO_2 en mediciones.....	102
Figura 6.26: Diseño sistema de filtrado.....	104
Figura 6.27: Esquema para relaciones de tamaño.....	104
Figura 6.28: Esquema difusor para relaciones de tamaño.....	107

Índice de Tablas

Capítulo III

Tabla 3.1: Datos obtenidos con aspiradora sin filtros.....	41
Tabla 3.2: Datos obtenidos con aspiradora con agua y sin filtros.....	41
Tabla 3.3: Datos obtenidos con aspiradora con agua y filtros de espuma y HEPA.....	41

Capítulo IV

Tabla 4.1: Relación número de vueltas por minuto y tiempo delay.....	56
Tabla 4.2: Relación número de vueltas por minuto y cantidad de material depositado.....	57
Tabla 4.3: Cantidad de material por tamaño de malla y tamizado.....	58
Tabla 4.4: Masa material para muestras de 100 gramos.....	58
Tabla 4.5: Masa material para muestras de 400 gramos.....	59
Tabla 4.6: Masa material para muestras de 600 gramos.....	59
Tabla 4.7: Masa inicial de filtros utilizados en bomba de aspiración.....	60
Tabla 4.8: Masa inicial y final de estanque de agua.....	62
Tabla 4.9: Cantidad de agua perdida durante mediciones.....	63
Tabla 4.10: Masa material retenido en agua de muestras de 100 gramos.....	63
Tabla 4.11: Masa material retenido en agua de muestras de 400 gramos.....	64
Tabla 4.12: Masa material retenido en agua de muestras de 600 gramos.....	64
Tabla 4.13: Masa final de filtros utilizados en bomba.....	65

Capítulo V

Tabla 5.1: Concentraciones de gases en medición sin filtro.....	70
Tabla 5.2: Concentraciones de gases en medición con filtro de 15 minutos.....	71
Tabla 5.3: Concentraciones de gases en medición con filtro de 30 minutos.....	72

Tabla 5.4: Concentraciones de gases en medicion con filtro de 45 minutos.....	73
Tabla 5.5: Masa inicial y final de estanque de agua.....	74
Tabla 5.6: Consumo de agua por minuto de cada medición.....	74

Capítulo VI

Tabla 6.1: Masa inicial muestra de 100 gramos en medicion de 15 minutos.....	76
Tabla 6.2: Masa inicial muestra de 100 gramos en medicion de 30 minutos.....	76
Tabla 6.3: Masa inicial muestra de 100 gramos en medicion de 45 minutos.....	77
Tabla 6.4: Masa inicial muestra de 400 gramos en medicion de 15 minutos.....	78
Tabla 6.5: Masa inicial muestra de 400 gramos en medicion de 30 minutos.....	78
Tabla 6.6: Masa inicial muestra de 400 gramos en medicion de 45 minutos.....	79
Tabla 6.7: Masa inicial muestra de 600 gramos en medicion de 15 minutos.....	80
Tabla 6.8: Masa inicial muestra de 600 gramos en medicion de 30 minutos.....	80
Tabla 6.9: Masa inicial muestra de 600 gramos en medicion de 45 minutos.....	81
Tabla 6.10: Masa final muestra de 100 gramos en medicion de 15 minutos.....	82
Tabla 6.11: Masa final muestra de 100 gramos en medicion de 30 minutos.....	83
Tabla 6.12: Masa final muestra de 100 gramos en medicion de 45 minutos.....	83
Tabla 6.13: Masa final muestra de 400 gramos en medicion de 15 minutos.....	84
Tabla 6.14: Masa final muestra de 400 gramos en medicion de 30 minutos.....	85
Tabla 6.15: Masa final muestra de 400 gramos en medicion de 45 minutos.....	85
Tabla 6.16: Masa final muestra de 600 gramos en medicion de 15 minutos.....	86
Tabla 6.17: Masa final muestra de 600 gramos en medicion de 30 minutos.....	87
Tabla 6.18: Masa final muestra de 600 gramos en medicion de 45 minutos.....	87
Tabla 6.19: Porcentaje material retenido en agua en muestras de 100 gramos.....	95
Tabla 6.20: Porcentaje material retenido en agua en muestras de 400 gramos.....	96

Tabla 6.21: Porcentaje material retenido en agua en muestras de 600 gramos.....	96
Tabla 6.22: Dimensiones de estanque de agua por volumen de agua.....	106
Tabla 6.23: Relación entre Caudal y Volumen de agua.....	106
Tabla 6.24: Dimensiones de difusor por Volumen de agua.....	108

Resumen

En las operaciones de faenas subterráneas se generan grandes cantidades de contaminantes tóxicos, por lo que la ventilación cobra gran relevancia, ya que se debe contar con un ambiente libre de contaminantes para proteger la salud de los trabajadores y maximizar la vida útil de las máquinas que actúan en los procesos mineros.

En este trabajo, se presenta el estudio de la eficacia de un sistema de filtrado por agua de material particulado y gases. Para ello se diseña y construyen dos sistemas: uno para el material particulado y otro para gases, a partir de un estudio del sistema de filtrado de una aspiradora comercial, que permitan realizar las mediciones correspondientes para cuantificar la eficacia del filtrado por agua.

En el caso del sistema de filtrado de material particulado, se observó que el litro de agua contenida en el estanque de la aspiradora retiene una gran cantidad de material ingresada al sistema. La eficiencia mínima detectada es de 76,1% para partículas entre 38 y 53 [μm] de diámetro en la medición de 15 minutos con una muestra de 600 [g], mientras que la eficiencia máxima es de 99,6% en para partículas entre 150 y 106 [μm] de diámetro en la medición de 45 minutos con una muestra de 400 [g].

Por otro lado, en el caso del sistema de filtrado de gases, se infiere que el litro de agua utilizado en las mediciones absorbe monóxido y dióxido de carbono e incrementa la concentración de dióxido de nitrógeno.

Otro de los objetivos de este trabajo, es dimensionar el sistema de filtrado para ver si es posible su escalamiento industrial. Para ello se obtuvieron las dimensiones del estanque que contiene el agua y el difusor por el que el flujo de aire circula para entrar al estanque, para volúmenes de agua de 10, 100 y 1000 [L] con caudales de flujo de aire de 1, 10 y 100 [m^3/s]. Con las dimensiones encontradas, es posible llevar el diseño a escalas mayores dependiendo del caudal de aire contaminado que se desee filtrar.

Capítulo I: Introducción

Dado que en las faenas mineras subterráneas existen contaminantes presentes en el aire que afectan la calidad de vida, tanto de los trabajadores como de las máquinas que operan, se hace necesario un sistema de filtrado más eficiente que los implementados actualmente en la industria minera. Es por esto que el trabajo de titulación desarrollado se basa en la evaluación de la eficacia de un sistema de filtrado por agua, de material particulado y de gases.

En este capítulo se presentan los objetivos principales y la justificación del proyecto, junto a la metodología aplicada para la realización del trabajo.

1.1 Objetivos del proyecto

1.1.1 Objetivo General

Evaluar la eficacia de filtrado tanto de material particulado como de gases en una aspiradora comercial con filtro de agua y estudiar la posibilidad de escalar el sistema a nivel industrial.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de medición de polvo para cuantificar la efectividad del sistema de captura.
- Diseñar un sistema de medición de gases para cuantificar la efectividad del sistema de captura (CO , CO_2 y NO_2).
- Realizar mediciones de material particulado y gases por separado para cuantificar la efectividad del sistema de captura.
- Realizar un análisis de efectividad del sistema de filtrado.
- Estudiar la geometría de la instalación
- Determinar componentes y requerimientos para el funcionamiento a escalas mayores.

1.2 Justificación del Proyecto

En la actualidad, en las operaciones de faenas mineras subterráneas se genera una gran cantidad de contaminantes tóxicos, tales como gases y polvo, por lo que la ventilación es un punto que cobra relevancia.

La ventilación en las minas es necesaria para mantener un ambiente libre de contaminantes, para proteger la salud de los trabajadores y maximizar la vida útil de los equipos de trabajo. Existen diferentes Leyes, Reglamentos, Decretos u otros cuerpos legales que regulan lo referente a la contaminación del aire por procesos industriales o particulares, que por medio de la Constitución tienen el deber de asegurar el derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminantes.

1.3 Metodología

El trabajo para cumplir los objetivos planteados anteriormente se divide en las siguientes etapas:

Etapa 1: Recopilación de información y estado del arte.

Etapa 2: Diseño y construcción para sistema de medición de material particulado.

Paso 1: Medición de caudal y presión de aspiradora.

Paso 2: Cálculo de dimensiones de cámara y tuberías del sistema.

Paso 3: Construcción de los sistemas.

Etapa 3: Diseño y construcción para sistema de medición de gases.

Paso 1: Medición de caudal y presión de aspiradora.

Paso 2: Cálculo de dimensiones de cámara y tuberías del sistema.

Paso 3: Construcción de los sistemas.

Etapa 4: Realización de mediciones para material y gases, y cálculo de Efectividad

Paso 1: Medir cantidad de material que ingresa al sistema y queda retenido, con bomba de succión.

Paso 2: Medir cantidad de gases que ingresa y sale del sistema con el analizador de gases.

Etapa 5: Estudio de parámetros técnicos del funcionamiento del sistema y dimensionamiento a nivel industrial.

Paso 1: Medir variables geométricas.

Paso 2: Determinación a mayores escalas de las variables de funcionamiento.

1.4 Descripción proyecto y lugar de trabajo

Esta tesis forma parte de Proyecto DICYT 051215 HC “Optimización de redes de ventilación minera a través de análisis de pérdidas por diseño”, adjudicado por el Profesor Juan Pablo Hurtado, perteneciente al Departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Santiago de Chile.

El lugar de trabajo corresponde al Laboratorio de Ventilación, que está en el sector de la ex-ENAMI, el que está bajo la supervisión del Doctor y Profesor Juan Pablo Hurtado. El laboratorio es una dependencia del Departamento de Ingeniería en Minas.

Capítulo II: Antecedentes Generales

A lo largo de este capítulo se muestran los conceptos que se deben manejar para tratar el tema principal de este trabajo. Además, se definen los distintos tipos de sistemas de filtrado que existen y son aplicados en la actualidad.

2.1 Definición de Contaminación Ambiental

La Contaminación Ambiental es el resultado de una serie de procesos naturales y no naturales en que en el ambiente se detectan compuestos por sobre los niveles permitidos o que no deberían estar presentes. Dichos procesos pueden tratarse de eventos del tipo industrial, minero o agrícola y en este contexto las matrices ambientales pueden ser los suelos, sedimentos, lodos, aguas tanto de ríos, lagos, lagunas y mares, y el aire atmosférico. Los contaminantes suelen ser naturales, antropogénicos (derivados de la actividad del hombre) o xenobióticos (obtenidos por la síntesis química) [1].

Todos los productos generados por la combustión, con excepción de los vapores de agua, pueden ser considerados contaminantes. Dichos contaminantes pueden ser clasificados en dos grupos: material particulado y gases.

2.2 Efluentes gaseosos

Los efluentes gaseosos son sustancias que se vierten a la atmosfera a través de conductos o emanaciones gaseosas. Dichas sustancias son gases, aerosoles, material particulado, humos negros, nieblas y olores [2].

2.2.1 Tipos de Contaminantes

Los contaminantes químicos pueden dividirse en dos grupos:

Primarios: Emitidos directamente desde el foco contaminante.

Secundarios: Originados en la atmósfera por la reacción entre dos o más contaminantes primarios o por constituyentes normales del aire.

Los contaminantes del aire se pueden clasificar como:

- a. Material particulado o partículas
- b. Compuestos que contienen azufre
- c. Compuestos orgánicos
- d. Compuestos que contienen nitrógeno
- e. Monóxido de carbono
- f. Compuestos halogenados.
- g. Compuestos radiactivos.

Los contaminantes relacionados al material particulado, se dividen de la siguiente forma: polvo fino (menor o igual a 10 [μm] de diámetro o más conocido como MP10), polvo grueso (más de 10 [μm] de diámetro) y polvo muy fino (menor o igual a 2,5 [μm] o MP2.5).

2.2.1.1 Dióxido de Azufre (SO_2)

Es un gas incoloro, de olor picante e irritante en concentraciones mayores a 3 [ppm]. Es 2,2 veces más pesado que el aire. Se produce en volcanes y por combustión de derivados del petróleo azufrados y quema de carbones. Su presencia en el aire produce trastornos principalmente en vías respiratorias, en el ser humano. Los efectos más importantes se producen cuando éste ingresa al organismo absorbido como material particulado o disuelto en gotas de agua presentes en la atmósfera [2].

2.2.1.2 Monóxido de Carbono (CO)

Es un contaminante gaseoso que se produce por la combustión incompleta de los compuestos carbonados (leña, carbón, parafina, petróleo). Se genera especialmente por las emisiones vehiculares, pero también se produce al interior de los hogares por la combustión de estufas, cocinas, humo de cigarrillo y calefontes).

Este contaminante, una vez en los pulmones, reacciona con la hemoglobina en lugar del oxígeno para formar carboxihemoglobina, por lo que afecta la salud interfiriendo en el

trasporte de oxígeno al corazón, a otros músculos y también al cerebro. Otros efectos que produce son: aumento de angina, disminución de las funciones neuroconductuales, menor peso en niños recién nacidos y retardo en el desarrollo postnatal [3].

2.2.1.3 Ozono (O_3)

El ozono es un contaminante de origen fotoquímico que se encuentra en las capas bajas de la atmósfera, más conocida como tropósfera, y se forma por la reacción entre óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, en presencia de radiación solar. [4]

Los elementos precursores de la formación del ozono son generadas por las siguientes fuentes de emisión: Fuentes Evaporativas (distribuidores de bencina, laboratorios y plantas vitivinícolas) y Fuentes de Combustión (calderas, hornos, motores de automóviles) [5].

2.2.1.4 Óxidos de Nitrógeno (N_xO_y)

Los óxidos de nitrógeno se producen a través de tres mecanismos.

- a) Oxidación del nitrógeno contenido en el combustible.
- b) Oxidación del nitrógeno del aire a altas temperaturas.
- c) Oxidación del nitrógeno del aire a bajas temperaturas por la acción de radicales producidos en la combustión.

Existen tres tipos de óxido de nitrógeno que son contribuyentes potenciales de la contaminación del aire.

- a) Monóxido de nitrógeno: gas incoloro y su concentración ambiental es por lo general menor a 0,5 ppm. Es un precursor de la formación del dióxido de nitrógeno y es un compuesto activo en la formación de nebluma fotoquímico, por lo que inicia reacciones que producen contaminantes en el aire.
- b) Dióxido de nitrógeno: gas de color pardo rojizo y muy visible cuando está presente en una cantidad de 1 ppm.

c) Oxido nitroso: gas inerte con características anestésicas. Su concentración ambiental es de 0,5 ppm [2].

2.2.1.5 Plomo (Pb)

Es un metal de color gris azulado que pierde su brillo con la exposición al aire. Contamina el aire a través de las emisiones de los vehículos que utilizan gasolina tetraetilo de plomo y de las emisiones del material particulado resultante de la extracción, transporte, manipulación y almacenamiento de minerales de plomo [6].

El plomo es un compuesto tóxico que se acumula en el sistema nervioso central y es perjudicial para el desarrollo mental de los niños. Entra al organismo por inhalaciones e ingestión, por lo que llega al sistema circulatorio a través de los pulmones y el tracto digestivo, y se excreta por las vías urinarias y las heces. Una exposición excesiva provoca intoxicación [7].

2.2.1.6 Material Particulado (PM10)

Son partículas líquidas o sólidas de diámetro menor o igual a 10 micrones. Por su tamaño, es capaz de ingresar al sistema respiratorio del ser humano. Mientras menor sea el diámetro de las partículas, mayor es el potencial daño a la salud [8].

Su origen está en los procesos de combustión (bencina, carbón, gas, etc.), ya sea generado por Fuentes Fijas (Hornos, Calderas) o Fuentes Móviles (Vehículos), por el levantamiento de polvo generado por el viento o por el tránsito de vehículos, por emisiones volcánicas y por partículas que se incorporan a la atmósfera (polen, esporas) [9].

El material particulado del aire se puede clasificar en dos grupos:

- a) El que no ingresa al aparato respiratorio (bronquios y pulmones), quedando atrapado en las vías respiratorias superiores (VRS) debido al tamaño de las partículas (diámetro mayor a 10 micras)
- b) El que ingresa a las vías respiratorias por tener un tamaño menor a 10 micras. Debido a esto, se les denomina PM10 o material particulado respirable.

El segundo grupo puede subdividirse en mayores y menores a 2,5 micras, siendo estas últimas, PM2.5, las que causan un mayor daño en la salud ya que son capaces de ingresar por las vías respiratorias llegando a los alvéolos, alterando los mecanismos defensivos del organismo, y así facilitando el ingreso de microorganismos, bacterias y virus [2].

2.3 Mecanismos de Captura de Material Particulado

A continuación, se entrega una descripción comparativa de los principales equipos existentes en el mercado para la recolección de polvo, mostrando su funcionamiento, ventajas y desventajas.

2.3.1 Cámara de Sedimentación

Este dispositivo es utilizado para la reducción del material particulado en la entrada de otros tipos de dispositivos de captura. Su principio de funcionamiento es utilizar la gravedad como medio de asentamiento.

Su construcción consiste en cámaras largas, horizontales y rectangulares, con la entrada en un lado y con la salida en la parte superior o en el lado opuesto. Aquí es donde la velocidad de la corriente gaseosa se reduce, por lo que las partículas que se encuentran suspendidas (las de mayor tamaño) luego de un tiempo decaen por acción de la gravedad para luego depositarse en una tolva.

El flujo dentro de la cámara debe ser uniforme, el que se obtiene generalmente por medio de rectificadores de flujo situados en la entrada de la cámara.

Existen dos tipos de cámaras de sedimentación: la cámara de expansión y la cámara de bandejas múltiples [2].

a) Cámara de Expansión: se caracteriza por la reducción de la velocidad de la corriente de gas mientras que el gas se expande en la cámara. Esto permite que las partículas de mayor tamaño se asienten o sedimenten fuera de la corriente de gas. Se utilizan para la recolección de partículas con un diámetro superior a 10 micras, sin embargo, atrapan con mayor eficiencia partículas con un diámetro superior a 50 micras.

b) Cámara de Bandejas Múltiples: es una cámara de expansión que contiene varias bandejas delgadas por las que el gas circula entre ellas. La velocidad del gas es mayor que en la cámara de expansión al igual que la eficiencia de recolección, debido a que la distancia que las partículas deben recorrer en la caída es menor. Recolectan partículas con un diámetro de 15 micras o mayor.

En la Figura 2.1 se muestra el diseño de ambas cámaras de sedimentación: cámara de expansión y cámara de bandejas múltiples, detalladas anteriormente.

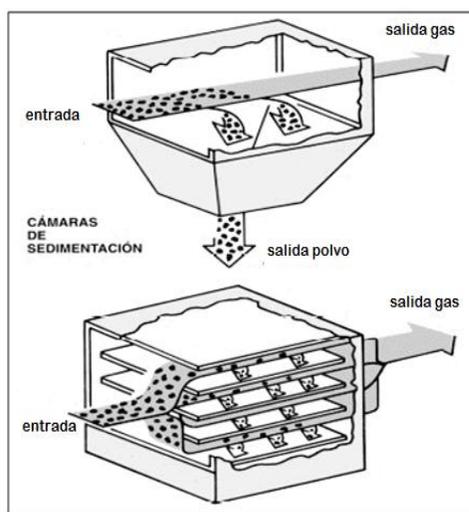


Figura 2.1: Cámara de sedimentación: Cámara de Expansión y Cámara de Bandejas Múltiples (Fuente: Página web Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería).

2.3.2 Ciclones

Los ciclones remueven el material particulado de una corriente gaseosa a través de una fuerza centrífuga. Básicamente, es una cámara de sedimentación en que la aceleración de gravedad es reemplazada por una aceleración centrífuga.

Estos dispositivos son adecuados para separar partículas con un diámetro superior a 5 micras.

Dentro de un ciclón, la trayectoria del gas que ingresa comprende un doble vórtice, donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado externo y uno ascendente en el lado interno

La mezcla gaseosa ingresa en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales, como se explicó anteriormente, hasta la parte inferior de la sección cónica, para luego ascender en un segundo espiral de diámetro más pequeño, y así salir por la parte superior a través de un ducto vertical centrado [2].

En la Figura 2.2 se muestra la trayectoria de la mezcla gaseosa descrita anteriormente.

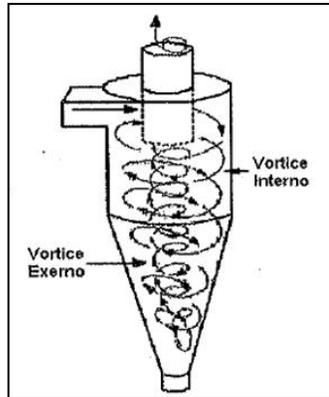


Figura 2.2: Diagrama del funcionamiento de un ciclón [2].

Existen distintos tipos de ciclones de entrada tangencial:

a) Ciclones de alta eficiencia: diseñados para recolección de partículas pequeñas. Tienen una eficacia entre un 80% y 99% para partículas con diámetro superior a 20 micras, entre un 60% y 95% para partículas con diámetros inferiores a 10 micras y entre un 20% y 70% para partículas de diámetros desde 2,5 micras.

b) Ciclones Convencionales: tienen una eficacia entre un 70% y 90% para partículas con diámetros superiores a 20 micras, entre un 30% y 90% para partículas con diámetro inferiores a 10 micras y entre 0% y 40% para partículas con diámetros inferiores a 2,5 micras.

c) Ciclones de alta Capacidad: están diseñados para remover solo partículas con diámetros superiores a 20 micras con una eficacia para este diámetro entre el 80% y 99%. Sin embargo, tiene una eficacia entre 10% y 40% para partículas con diámetro inferior a 10 micras y del 0% a 10% para diámetros inferior a 2,5 micras.

2.3.3 Filtros de Tela

En este dispositivo, el gas pasa a través de una tela de tejido apretado o de papel para ser recolectado por un tamiz u otro mecanismo.

En el mercado se utilizan dos tipos de filtros de tela, tanto en la industria como en la minería. Estos son los siguientes [2]:

2.3.3.1 Filtro de Mangas

Son filtros de auto limpieza continua que utilizan elementos filtrantes tipo mangas capaces de recolectar partículas submicrónicas que vienen de una corriente de aire o de gas.

Básicamente, un filtro de manga consiste en uno o más compartimientos aislados que contienen hileras de mangas de tela, en forma de tubos redondos. El polvo proveniente de una masa de aire pasa a lo largo de las mangas y luego a través de ellas, reteniendo en la parte exterior las partículas de polvo. Cuando el aire filtrado se encuentra en la parte interior de las mangas, pasa a la cámara superior de aire limpio a través de boquillas del Vénturi para luego, por medio de un aspirador o ventilador, salir al exterior. En la Figura 2.3 se muestra la estructura interna de un filtro de mangas que puede ayudar a entender el detalle del funcionamiento anteriormente descrito.

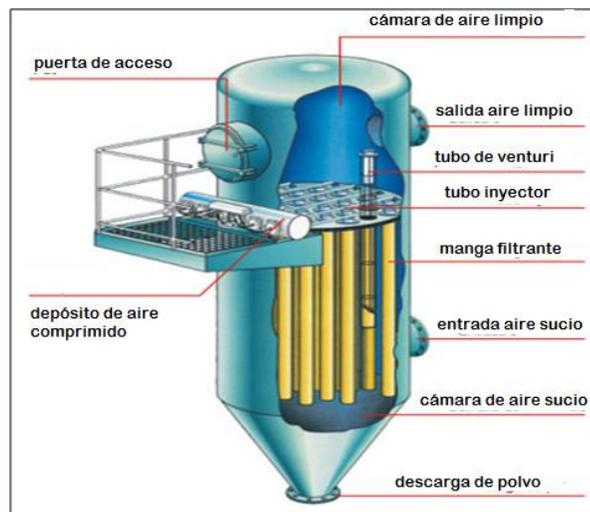


Figura 2.3: Estructura interna de un Filtro de Mangas (Fuente: www.catmosferical.wikispaces.com/estrategiasparaelcontrol).

Este tipo de filtro de tela recolecta partículas de diámetros que van desde las submicras hasta cientos de micras. Por lo que su eficiencia se encuentra entre el 99% y 99.9%.

Para remover el polvo que queda retenido en los filtros de tela, se aplica un sistema de limpieza automático, mediante pulsos de aire comprimido.

2.3.3.2 Filtro tipo Cartucho o Cartridge

Este tipo de filtro está diseñado para ser instalado en espacios pequeños y además pueden ser utilizados como reemplazo de los filtros de mangas.

Su funcionamiento es similar al del Filtro de Mangas. El gas pasa por una tela de papel plisado (con fibras de celulosa impregnadas con resina fenólica), provocando que el material particulado sea recolectado en la tela. El polvo agrupado es removido por un sistema de limpieza automático, mediante pulsos de aire comprimido.

Como dice su nombre, este tipo de filtro tiene un cartucho, que tiene un núcleo interior de soportes rodeado por un medio de filtración plisado y una malla exterior. Un extremo del cartucho se encuentra abierto pero en dirección inversa a la corriente del gas.

La eficiencia de este tipo de filtro es del 99.99%.

En la Figura 2.4 se muestra un filtro de Cartucho o Cartridge.



Figura 2.4: Filtro de Cartucho o Cartridge (Fuente: www.es.made-in-china.com/co_trfilter/product_spun_bonded_polyestrer-air-filter-cartridge).

2.3.4 Precipitadores Electrostáticos

Estos filtros son utilizados para el tratamiento de gases provenientes de distintas instalaciones industriales, por ejemplo Centrales Termoeléctricas, fábricas de cemento, papeleras, manufacturas etc. Se pueden usar en contaminantes menores o iguales a 10 micras (MP10), material particulado menor o igual a 2,5 micras y en contaminantes peligrosos del aire.

Su funcionamiento se basa en fuerzas eléctricas para remover las partículas fuera de la corriente de gas que ingresa al sistema y sobre las placas del colector. Está constituido por un electrodo emisor y un electrodo o placa recolectora. El electrodo emisor genera un campo eléctrico que carga las partículas obligándolas a pasar a través de una región en la que se encuentran iones gaseosos. Estos iones se adhieren a las partículas suspendidas en el gas entre los electrodos. Los iones positivos son atraídos hacia los electrodos de emisión y los negativos se desplazan hacia las placas colectoras.

Las partículas con carga negativa, como se dijo anteriormente, se desplazan hacia las placas recolectoras a las que se adhieren mientras se descargan. Estas se acumulan y forman una capa de polvo en la superficie de la placa, la que es eliminada a través de vibraciones. Las partículas desprendidas caen por efecto de la gravedad hacia el fondo del filtro, depositándose en una tolva de fondo, desde la que el polvo se extrae. Existen distintos tipos de precipitadores que se describen a continuación [2].

2.3.4.1 Tipos de Precipitadores Electrostáticos

a) Precipitadores de Placa-Alambre: Este tipo de precipitador utiliza como electrodos largos alambres con pesas colgando entre las placas o soportados por estructuras rígidas. El gas debe pasar a través de los alambres a medida que fluye por la unidad. Este dispositivo permite que las líneas de flujo operen en paralelo, por lo que se utiliza para grandes volúmenes de gas. Con este dispositivo se hace difícil recolectar partículas con diámetros entre 0,1 y 1 micras. En la Figura 2.5 se muestra un esquema del Precipitador Electrostático

Placa-Alambre, en la que se puede apreciar las placas con los alambres colgados con sus respectivas pesas.

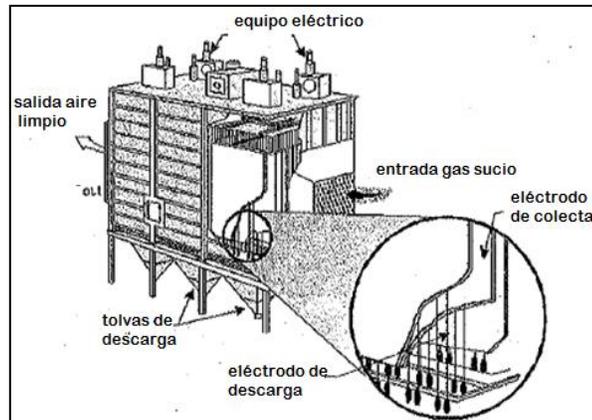


Figura 2.5: Precipitador Electrostático Placa-Alambre [2].

b) Precipitadores de Placa Plana: Este dispositivo reemplaza los alambres por placas planas para los electrodos de emisión. Las placas incrementan el campo eléctrico para la recolección de partículas y aumentan el área superficial para su recolección. Los electrodos son agujas adheridas en los bordes de las placas. Con este precipitador se recolectan partículas desde 1 micra. En la Figura 2.6 se observa un precipitador electrostático de placa plana.

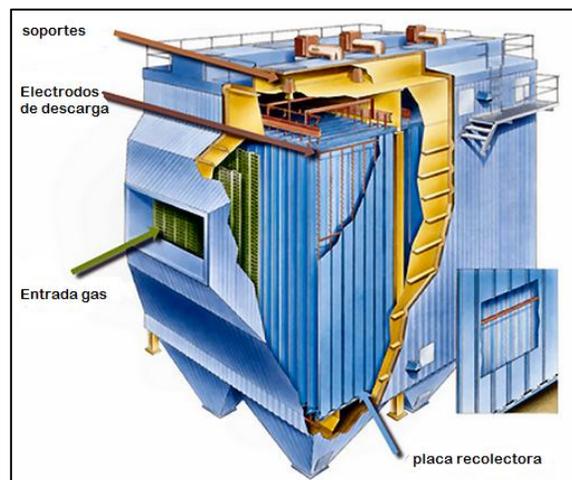


Figura 2.6: Precipitador Electrostático Placa Plana (Fuente: www.id12a.wikispaces.com/aplicacionesdelaelectrostatica).

c) Precipitadores Tubulares (Tubo-Alambre): En este tipo de dispositivos los electrodos se encuentran orientados a lo largo del eje de un tubo. Dichos electrodos son alambres con pesas en sus extremos suspendidos desde la parte superior del precipitador. Estos precipitadores son unidades de una etapa, es decir, el gas pasa a través de la región del electrodo, el que opera a un alto voltaje por toda la longitud del tubo, y la corriente varía a lo largo de su longitud a medida que las partículas son removidas del sistema. Los recolectores son golpeados por métodos mecánicos. En la Figura 2.7 se observa un precipitador electrostático tubular.

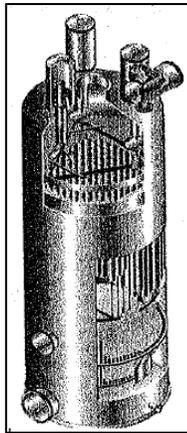


Figura 2.7: Precipitador Electrostático Tubo-Alambre. [2].

d) Precipitadores Húmedos: utilizan una fuente de agua, la que se inyecta o se rocía por aspersion cerca de la parte superior de las placas colectoras, en forma continua o en intervalos programados. El agua fluye con las partículas recolectadas hacia un depósito donde el agua es drenada. En la Figura 2.8 se observa un precipitador electrostático húmedo.

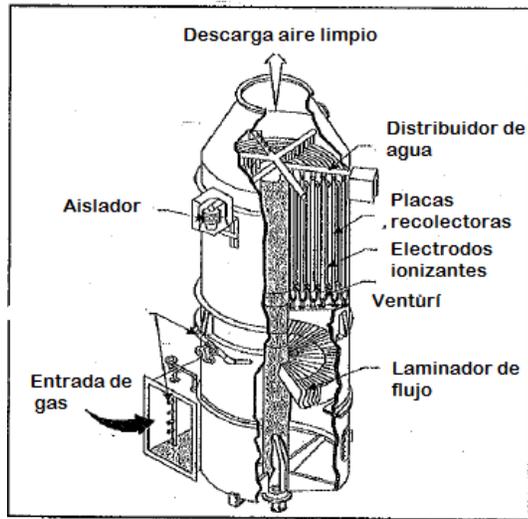


Figura 2.8: Precipitador Electrostático Húmedo [2].

e) **Precipitadores Híbridos:** Estos precipitadores combinan dos procesos. En una primera sección se opera de igual forma que en los precipitadores electrostáticos en seco con una limpieza por medio de vibraciones, y en una segunda sección con el proceso en húmedo.

f) **Precipitadores de dos etapas:** este es un dispositivo en serie, con el electrodo de descarga o ionizador precediendo a los electrodos de recolección. Esta configuración permite más tiempo para la carga de partículas. En la Figura 2.9 se observa un precipitador electrostático de dos etapas.

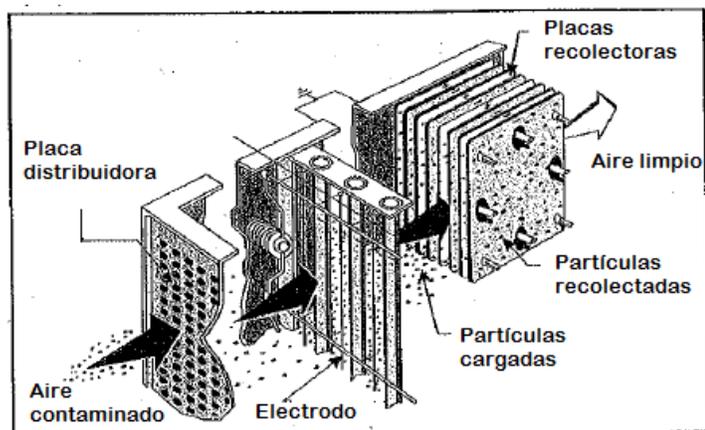


Figura 2.9: Precipitador Electrostático de dos etapas [2].

2.3.5 Colectores Húmedos o Scrubbers

Los lavadores húmedos o Scrubbers funcionan bajo un proceso en el que las partículas de material particulado son removidas de la corriente de gas a una de líquido. Poseen una cámara de sedimentación con rociadores, los que hacen que finas gotitas de agua laven el gas, para que el polvo convertido en lodo por la agrupación de ellas, se deposite en la base de la cámara por efecto de la gravedad. El gas libre de partículas de polvo, pasa hacia arriba para salir al exterior [2].

En la Figura 2.10 se observa una cámara rociadora de sedimentación por gravedad.

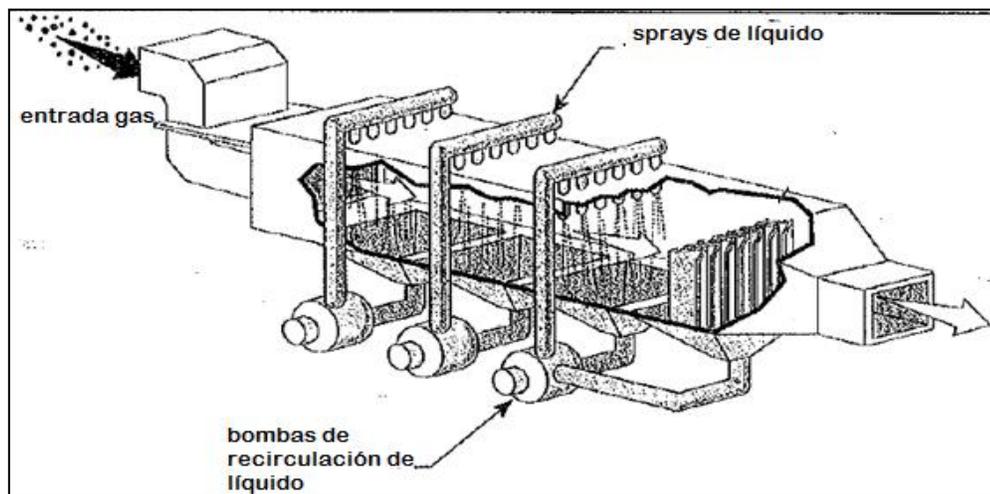


Figura 2.10: Cámara rociadora de sedimentación por gravedad [2].

Capítulo III: Estudio de Aspiradora Comercial

En este capítulo se da a conocer la aspiradora comercial que se utiliza para la elaboración de este trabajo, tanto su estructura como su sistema de filtrado. También se realizan mediciones para obtener su curva característica de funcionamiento.

3.1 Características Aspiradora

La aspiradora comercial utilizada corresponde a una aspiradora Thomas GENIUS S1 Aquafilter. Una de las características principales es que cuenta con un estanque de agua en reemplazo de la bolsa de género que utilizan otras aspiradoras comerciales. Dicho sistema tiene un comportamiento dual, ya que se puede utilizar para un aspirado en seco y para un aspirado de líquidos. El aspirado en seco se utiliza con el estanque con agua y el aspirado de líquidos con el estanque sin agua. La aspiradora cuenta además con otros tipos de filtros que complementan el sistema de filtrado de polvo.

La potencia de filtrado varía entre los 650 y 1600 [W], la que es caracterizada por una señal de luz:

Señal de luz verde: 650 – 1125 [W].

Señal de luz amarilla: 1125 – 1600 [W].

3.2 Estructura de la Aspiradora

A continuación, se obtiene el detalle de la estructura de la aspiradora Thomas GENIUS S1 Aquafilter [10]. En la Figura 3.1 se muestra el detalle de la parte superior de la aspiradora.

1. Cubierta principal.
2. Ingesta de conexión.
3. Mango.
4. Apertura y cierre de la cubierta.
5. Botón para rebobinar el cable.
6. Tecla de encendido/apagado y regulador electrónico de potencia de aspiración.
7. Luz iluminadora de la regulación electrónica de potencia de aspiración.
8. Puerto de escape de aire

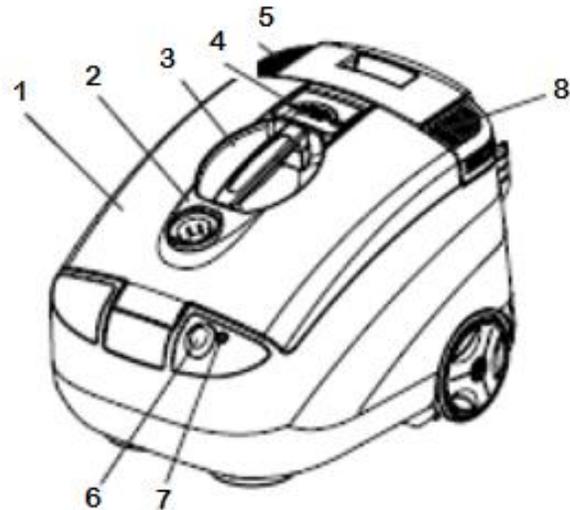


Figura 3.1: Detalle de la parte superior de la aspiradora [10].

En la Figura 3.2 se muestra la estructura interna de la aspiradora, la que se describirá en detalle más adelante.

9. Filtro de agua
- 9a. Filtro de espuma
- 9b. Filtro de aspiración
10. Tanque de agua
- 10a. Filtro húmedo
- 10b. Flotador
11. Filtro HEPA
12. Filtro protector del motor

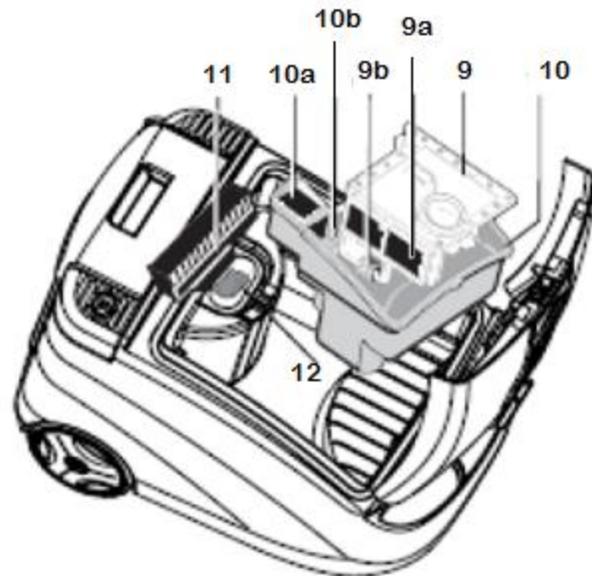


Figura 3.2: Detalle de la parte interior de la aspiradora [10].

En la Figura 3.3 se muestra la parte trasera de la aspiradora.

- 13. Soporte de los tubos de aspiración
- 14. Caja de accesorios con cubierto removible
- 15. Enchufe
- 16. Micro filtro MKA

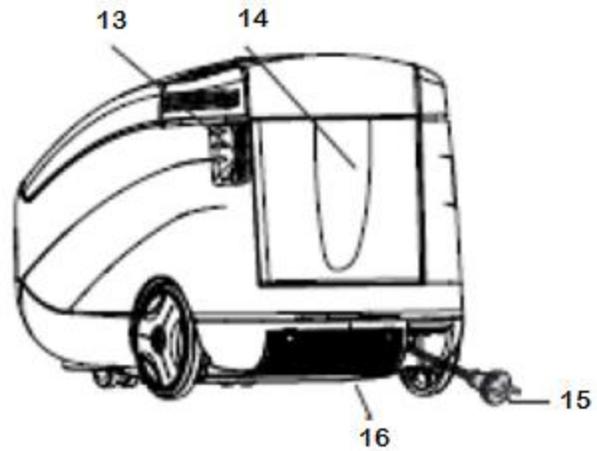


Figura 3.3: Detalle de la parte trasera de la aspiradora [10].

En la Figura 3.4 se muestra el detalle de la parte inferior de la aspiradora.

- 17. Ruedas pequeñas de movimiento
- 18. Soporte de tubos de aspiración
- 19. Ruedas grandes para transportar

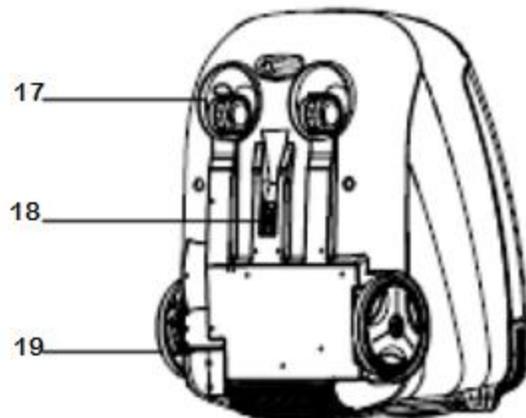


Figura 3.4: Detalle de la parte inferior de la aspiradora [10].

3.2.1 Detalle parte interior aspiradora.

Como se pudo ver en la Figura 3.2 del presente capítulo, la parte interna de la aspiradora cuenta con varios elementos que serán detallados a continuación.

3.2.1.1 Estanque de agua

El estanque de agua (10) consiste en un depósito plástico cuyo fin es contener el agua para el filtrado de polvo que ingresa a la aspiradora. La cantidad de agua necesaria para dicha labor está indicada en el estanque en forma de nivel y es de 1 [L].

En la Figura 3.5 se muestra la geometría interna del estanque de agua, además del pequeño depósito en el que se deposita 1 [L] de agua para el funcionamiento de la aspiradora. En la Figura 3.6 se muestra la geometría externa del estanque de agua en 5 vistas (laterales, frente, trasera e inferior). En la Figura 3.7 se muestra el estanque de agua en un dibujo elaborado en Solidworks.



Figura 3.5: Estanque de agua. Tiene indicado el nivel de agua necesaria para el filtrado de polvo.



Figura 3.6: Vistas del Estanque de agua.

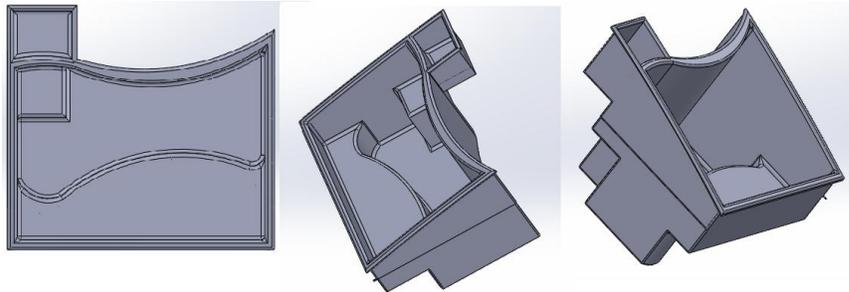


Figura 3.7: Estanque de agua dibujado en Solidworks.

El estanque de agua posee tres secciones necesarias para el proceso de filtración, éstas son:

a) Filtro Húmedo

Como se ve en la Figura 3.8, el filtro húmedo (10a) consiste en una esponja que se coloca en el estanque de agua. El objetivo de este filtro es capturar partículas de polvo muy fino (menor o igual a 2,5 micras) que no son capaces de quedar retenidas en el agua.



Figura 3.8: Filtro Húmedo.

b) Flotador

El flotador (10b) corresponde a un bloque móvil de plástico sujetado por una arista en la pared del estanque de agua. La principal característica de este bloque es que puede cerrar el paso del flujo de aire hacia el filtro húmedo.

En la Figura 3.9 se muestra el flotador que va situado sobre el relieve del estanque de agua. En este caso se encuentra cerrando el paso del aire que ingresa a la aspiradora.



Figura 3.9: Flotador.

c) Rejilla

Esta rejilla divide el estanque de agua en dos y va situado bajo el filtro de agua, separando el material grueso que ingresa, permitiendo pasar hasta un cierto tamaño de partículas. El tamaño de la cuadrícula de la rejilla es de 1 mm por lado. En la Figura 3.10 se muestra lo descrito anteriormente.



Figura 3.10: Rejilla que separa el estanque de agua en dos.

3.2.1.2 Filtro de agua

El filtro de agua (9) consiste en una pieza cuya geometría permite el paso del flujo de aire con material, a través de un difusor, de manera tal que éste ingrese al agua contenida en el estanque. En la Figura 3.11 se puede ver la geometría del filtro de agua que contiene un difusor por donde ingresa el flujo de aire y en la Figura 3.12 el filtro de agua dibujado en Solidworks.



Figura 3.11: Vistas Filtro de agua que contiene el difusor.

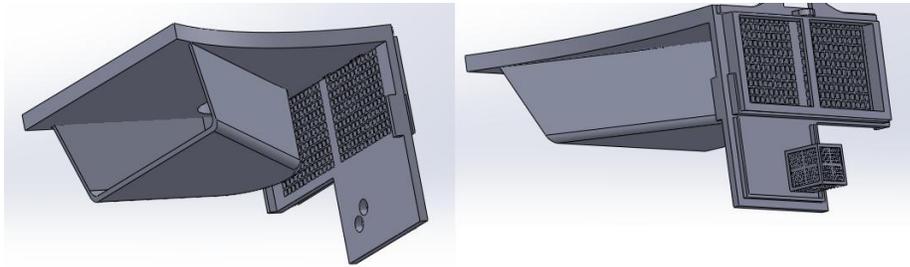


Figura 3.12: Filtro de agua dibujado en Solidworks.

El filtro de agua contiene dos partes fundamentales para el sistema de filtración:

a) Filtro de Aspiración

El filtro de aspiración (9b) es una pequeña pieza en forma de cubo con ranuras cuadradas conectada a través de la parte inferior del filtro de agua con un par de mangueras de 1 [cm] de diámetro externo, las que se conectan a los inyectores en la parte superior del filtro de agua.

En la Figura 3.13, se puede apreciar la geometría del Filtro de Aspiración cuya función es filtrar el material particulado contenido en el estanque para que éste no ingrese a los inyectores.

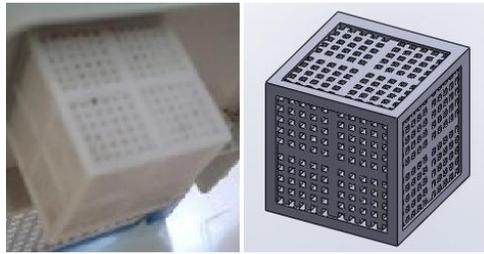


Figura 3.13: Fotografía y Dibujo en Solidworks de Filtro de Aspiración.

b) Filtro de Espuma

El filtro de espuma (9a) consiste en un rectángulo de espuma contenido en un soporte adherido a la pared del filtro de agua, cuyo objetivo principal es filtrar el aire con material que no ingresa al agua, reteniendo las partículas.

En la Figura 3.14 se puede ver el diseño del filtro y de su soporte.



Figura 3.14: Filtro de Espuma.

3.2.1.3 Filtro HEPA

El filtro HEPA o High Efficiency Particulate Air, fue creado con el fin de controlar la contaminación fina del aire. Por definición y aplicando la Norma Militar MIL STD 282, debe tener una eficiencia mínima del 99,97% en aerosoles de 0,3 micras de diámetro [2].

En la Figura 3.15 se muestra el filtro HEPA que se utiliza en la aspiradora, situado sobre un soporte plástico.



Figura 3.15: Filtro HEPA.

3.3 Sistema de Filtrado de la Aspiradora

El sistema de filtrado de la aspiradora se puede separar en etapas para describir el proceso de filtración del aire que ingresa a la aspiradora y así, obtener un aire limpio. Dichas etapas se describen a continuación.

Etapa 1: Rocío de agua en partículas

En esta etapa se produce la ingesta de agua del estanque de agua a través del filtro de aspiración (9b) conectado por medio de dos mangueras a la parte superior del filtro de agua (9), con el fin de alimentar los inyectores situados en la ingesta de conexión (2) para humedecer las partículas de material que ingresan al interior de la aspiradora.

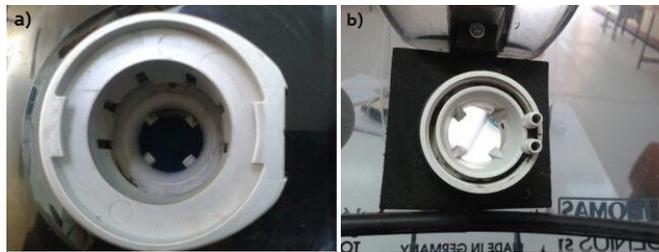


Figura 3.16: a) Inyectores vista superior tapa aspiradora. b) Inyectores vista inferior tapa aspiradora.

Etapa 2: Paso por Filtro de agua

Una vez que el aire succionado ingresa al filtro de agua (9), se produce la separación por tamaño de las partículas del material. Dentro del filtro de agua queda el polvo grueso (mayor a 10 [μm]) traspasando por el filtro de espuma (9a) solo el polvo fino (menor o igual a 10 [μm]) y el polvo muy fino (menor o igual a 2,5 [μm]).



Figura 3.17: a) Se indica Filtro de agua (9) y Filtro de espuma (9a). b) Se indica la separación de material dentro del estanque de agua (10).

Etapa 3: Paso por filtro húmedo

En el estanque de agua (10), luego del paso por el filtro de agua, el polvo fino y polvo muy fino nuevamente es separado a través del filtro húmedo (10a), quedando retenido en el estanque de agua el polvo fino.

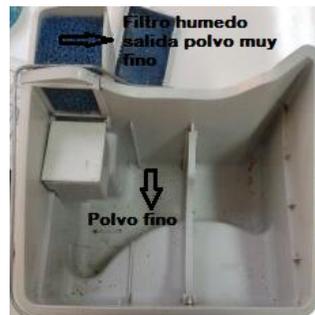


Figura 3.18: Estanque de agua (10) donde se observa el filtro húmedo (10a) por el que se retiene o sale polvo muy fino, quedando el polvo fino retenido en el lado izquierdo del estaque.

Etapa 4: Paso por Filtro HEPA

El polvo muy fino que no queda retenido en el estanque de agua, sigue su curso hacia el filtro HEPA (11). Para luego, seguir su curso a las salidas de la aspiradora.

Etapa 5: Salida de aire limpio

El polvo que no es retenido por el filtro HEPA sigue circulando por el interior de la aspiradora hacia el ducto de salida. El polvo restante pasa a través del filtro protector del

motor (12) circulando por la parte interior de la aspiradora hasta toparse con el micro filtro MKA (situado en la salida trasera de la aspiradora) , el que retiene el polvo muy fino, saliendo aire 99,99% libre de partículas de polvo al ambiente.



Figura 3.19: Salida Superior de la aspiradora.



Figura 3.20: Salida trasera de la aspiradora y el filtro MKA que va situado para terminar de filtrar el aire antes de salir.

3.4 Curva Característica de funcionamiento

Para obtener la curva característica de la aspiradora utilizada para la realización de este trabajo, se aplicó la Norma AMCA-ASHRAE STANDARD 51-1985, con el fin de obtener los datos necesarios para la construcción de dicha curva.

Cabe destacar, que se obtuvieron curvas características de la aspiradora con distintos funcionamientos: sin agua ni filtros, con agua y sin filtros, y con agua y con filtros.

3.4.1 Norma AMCA-ASHRAE STANDARD 51-1985

Dos sociedades norteamericanas de reconocimiento mundial en la ventilación, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE) y Air Movement and Control Association Inc. (AMCA), se unen para entregar métodos o técnicas de laboratorio necesarias para el ensayo de ventiladores [11]. Esta norma permite

dar a conocer los métodos, reglas y fórmulas para determinar las curvas características de las distintas instalaciones.

En este caso, la instalación que se quiere ensayar es la aspiradora y para ello se emplea el esquema de la Figura 3.21.

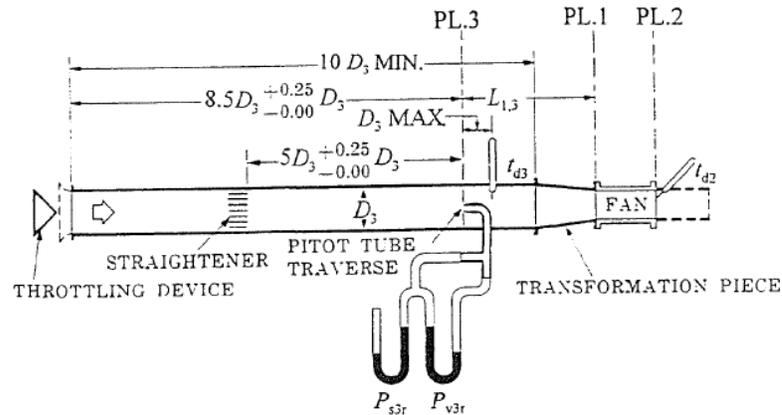


Figura 3.21: Esquema de Montaje recomendado por la norma [11].

Como se puede ver en la Figura 3.21 se muestra los elementos que se deben construir para realizar las mediciones. En el caso de este trabajo solo se fabrica la pieza de transformación para adecuarlo al tubo de entrada de la aspiradora.

3.4.1.1 Pieza de Transformación

La pieza de transformación que se muestra en el esquema de la Figura 3.22, se emplea para la conexión de dos conductos de diferente diámetro.

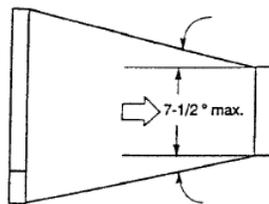


Figura 3.22: Esquema Pieza de Transformación recomendada por la Norma [11].

3.4.1.2 Formulación

Las fórmulas entregadas por la Norma se encuentran en el sistema de medida Imperial, basada en International Bureau of Weights and Measures [12].

Densidad del Aire Atmosférico

La densidad del aire atmosférico (ρ_0) se determina por las mediciones tomadas en el área experimental general de la temperatura del bulbo seco (t_{d0}), la temperatura del bulbo húmedo (t_{w0}) y de la presión barométrica (p_b), utilizando las siguientes expresiones:

$$p_e = 2,96 \times 10^{-4} \cdot t_{w0}^2 - 1,5 \times 10^{-2} \cdot t_{w0} + 0,41 \quad (3.1)$$

$$p_p = p_e - p_b \left(\frac{t_{d0} - t_{w0}}{2700} \right) \quad (3.2)$$

$$R = 53,35 \left(\frac{ft \cdot lb}{lbm \cdot R} \right) \quad (3.3)$$

$$\rho_0 = \frac{70,73(p_b - 0,378 \cdot p_p)}{R(t_{d0} + 459,7)} \quad (3.4)$$

Donde,

p_e : Presión de Vapor Saturado Temperatura húmeda.

p_p : Presión de Vapor Parcial.

R : Constante de Gases.

La ecuación de p_e es válida solo para temperaturas entre los 4,4 [°C] y 32,2 [°C].

Densidad de Aire del Ventilador

Esta densidad se calcula a través de la densidad de aire atmosférico, la presión total de entrada del ventilador con su temperatura total de entrada correspondiente y de la presión

barométrica. Notar que el ventilador en este caso es la aspiradora. La expresión para determinar la densidad de aire de la aspiradora es la siguiente:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{P_{t1} + 13,63 p_b}{13,63} \right) \left(\frac{t_{d0} + 459,7}{t_{t1} + 459,7} \right) \quad (3.5)$$

Donde

P_{t1} : Presión Total de entrada al Ventilador

p_b : Presión Barométrica.

t_{d0} : Temperatura seca del aire.

t_{t1} : Temperatura Total de entrada al Ventilador. En este caso $t_{d0} = t_{t1}$.

Densidad de Aire en un Plano

La densidad de Aire de un Plano “X” de un ducto (ρ_x) se puede calcular corrigiendo la densidad del aire atmosférico (ρ_0) para una Presión estática (P_{sx}) y una temperatura (t_{dx}), como indica la siguiente expresión:

$$\rho_x = \rho_0 \left(\frac{t_{d0} + 459,7}{t_{dx} + 459,7} \right) \left(\frac{P_{sx} + 13,63 p_b}{13,63 p_b} \right) \quad (3.6)$$

Si $P_{sx} < 4$ [in. wg] (10,16 [cm]), $\rho_x \approx \rho_0$

Viscosidad del Aire

La viscosidad μ se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$\mu = (11 + 0,018 t_d) \cdot 10^{-6} \quad (3.7)$$

El valor de la viscosidad del aire es de $1,222 \times 10^{-5}$ [lbm/ft · s], el cual es válido para temperaturas entre 4,4 y 37,7 [°C] [13].

Presión Dinámica

La presión dinámica (P_{v3}) corresponde a la velocidad media, y se calcula tomando la sumatoria de las raíces cuadradas de las medidas individuales de un barrido (P_{v3r}) y dividiendo por el número de medidas (n), como se muestra a continuación:

$$P_{v3} = \left(\frac{\sum_1^n \sqrt{P_{v3r}}}{n} \right)^2 \quad (3.8)$$

Velocidad

La velocidad promedio V_3 se obtiene a través de la densidad del aire que atraviesa un plano (ρ_3) y la presión dinámica correspondiente (P_{v3}).

$$V_3 = 1096 \sqrt{P_{v3} / \rho_3} \quad (3.9)$$

Caudal

El caudal en el plano PL.3 se obtiene con la velocidad V_3 y con el área de la sección transversal A_3 .

$$Q_3 = V_3 \cdot A_3 \quad (3.10)$$

Caudal del ventilador

El caudal del ventilador, o en este caso de la aspiradora, se calcula usando la siguiente expresión,

$$Q = Q_3 \left(\frac{\rho_3}{\rho} \right) \quad (3.11)$$

Presión Dinámica- Tubo de Pitot

Cuando las mediciones son realizadas con el Tubo de Pitot, la presión dinámica del ventilador (P_v) se calcula considerando la presión dinámica del plano PL.3 como se muestra en la expresión 3.12.

$$P_v = P_{v3} \left(\frac{A_3}{A_2} \right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \quad (3.12)$$

Donde A_2 y A_3 son las áreas de los ductos.

Cuando P_{s3} y P_{s2} difieran en menos de $101,6 \text{ mmH}_2\text{O}$, $\rho_3 \approx \rho_2$

Presión Total – Tubo de Pitot

La presión total es la diferencia de la presión total en la salida y la presión total en la entrada.

$$P_t = P_{t2} - P_{t1} \quad (3.13)$$

Donde $P_{t2} = P_v$

Presión estática

La presión estática es la diferencia entre la presión total P_t y la presión total dinámica en el ventilador.

$$P_s = P_t - P_v \quad (3.14)$$

Presión Estática en el punto de medición

La presión estática en el plano PL.3 se obtiene de las n mediciones que se realizan en el barrido, y para su cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{s3} = \frac{\sum_1^n P_{s3r}}{n} \quad (3.15)$$

Presión Total en la entrada del ventilador

Esta presión tiene relación con las presiones dinámicas, presiones estáticas y de la geometría del ducto por el que circula el flujo de aire, de la siguiente forma:

$$P_{t1} = P_{s3} + P_{v3} - f \left(\frac{L_{1,3}}{D_{h3}} \right) P_{v3} \quad (3.16)$$

Donde,

$$\text{Coeficiente de fricción: } f = \frac{0,14}{R_e^{0,17}}$$

$$\text{Número de Reynolds: } R_e = \frac{D_h \cdot V \cdot \rho}{60\mu}$$

Diámetro Hidráulico: $D_h = D$ si el ducto es circular.

$$\text{Largo Equivalente: } \frac{L_e}{D_h} = \frac{15,04}{\left[1 - 26,65\left(\frac{y}{D}\right) + 184,6\left(\frac{y}{D}\right)^2\right]^{1,83}}$$

Donde y es el espesor máximo del enderezador de flujo y D es el diámetro de la tubería.

3.4.1.3 Instrumentos para Medición Normalizados

a) Barómetro

Instrumento con el que se mide la Presión Barométrica, es decir, la presión absoluta existente en la atmósfera. El barómetro utilizado en este trabajo entrega el valor de la presión atmosférica en milímetros de mercurio [mmHg] a una determinada temperatura. En la Figura 3.23 se muestra el barómetro utilizado en las mediciones.



Figura 3.23: Barómetro utilizado en las mediciones. (Fuente: Memoria Francisco Hernández, Capítulo II).

b) Psicrómetro

Instrumento utilizado para la medición de temperatura en un bulbo seco y temperatura en bulbo húmedo. La temperatura en el bulbo seco corresponde a la temperatura del aire medida por un termómetro de temperatura seca, mientras que la temperatura del bulbo

húmedo corresponde a la temperatura medida por un sensor de temperatura cubierto con paño que se moja con agua. La temperatura que entregan los termómetros es en °C. Como se aprecia en la Figura 3.24 el psicrómetro consta de dos termómetros en un rango de -10 [°C] hasta los 60 [°C]. El Bulbo que contiene la marca de color verde, corresponde al bulbo húmedo.



Figura 3.24: Psicrómetro utilizado en las mediciones.

c) Tubo de Pitot

Instrumento para medir las presiones del flujo de aire que ingresa a la aspiradora. Entrega la Presión Dinámica, Presión Estática y la Presión Total, dependiendo de cómo se conecte el Tubo de Pitot junto a un Manómetro, como se muestra en la Figura 3.25.

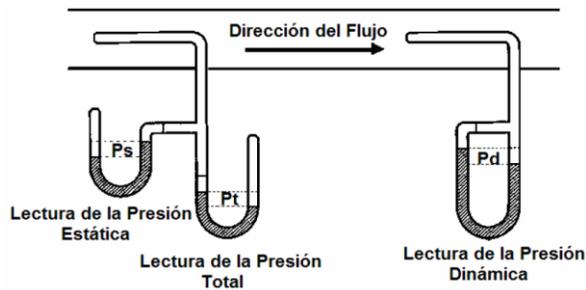


Figura 3.25: Conexiones del Tubo de Pitot y Manómetro. [12].

Para realizar los cálculos del punto 3.4.1.2, se debe realizar un barrido colocando el Tubo de Pitot en ciertas posiciones al interior del ducto, las que son determinadas por la Norma y dependen del diámetro interior del ducto utilizado, como se muestra en la Figura 3.26

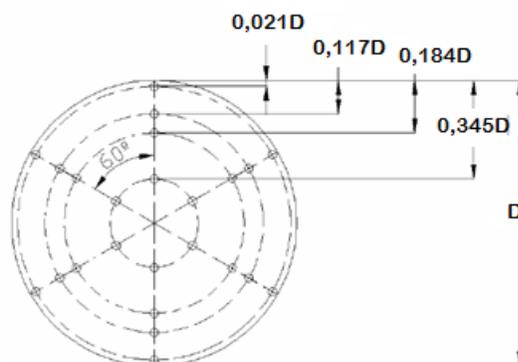


Figura 3.26: Posiciones del Tubo de Pitot para realizar las mediciones [12].

El Tubo de Pitot utilizado para realizar las mediciones tiene un diámetro de 3 [mm] y se muestra en la Figura 3.27.



Figura 3.27: Tubo de Pitot de 3 [mm] utilizado en el trabajo.

En este trabajo, las mediciones se realizaron solo en el eje vertical.

d) Anemómetro de Tubo de Pitot y Manómetro Diferencial HD350

Instrumento que junto al Tubo de Pitot entrega los valores de las presiones necesarias en este trabajo, es decir, la presión dinámica, presión estática y la presión total, además de entregar si es necesario la velocidad del flujo y el valor del caudal. En la Figura 3.28 se observa el instrumento ya descrito.



Figura 3.28: Manómetro Diferencial Digital HD350 utilizado en el trabajo. (Fuente: www.extech.com.es)

3.4.2 Montaje Experimental y Procedimiento de Medición de Caudal

3.4.2.1 Montaje Experimental

Para realizar las mediciones de Caudal requeridas para la obtención de la curva de funcionamiento de la aspiradora se construye el montaje experimental, mostrado en la Figura 3.29, según la Norma ASHARE-AMCA.

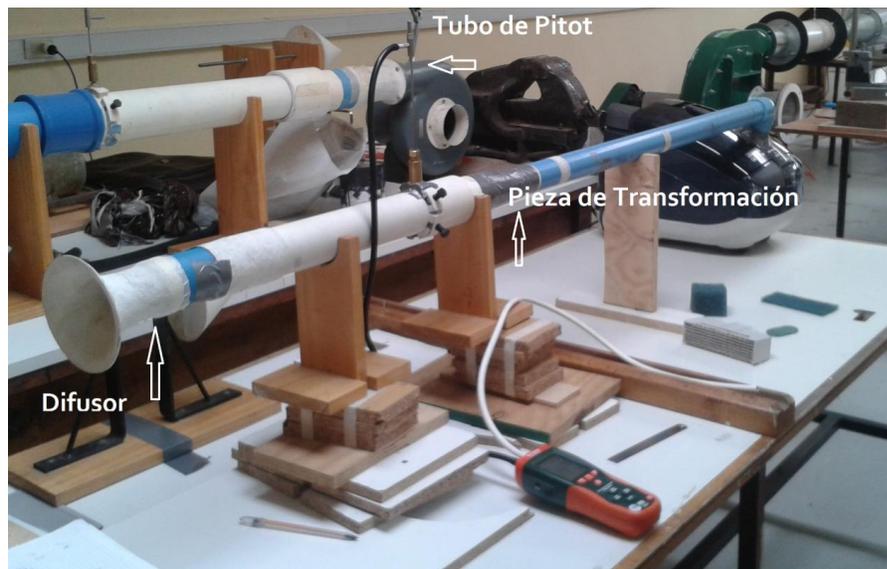


Figura 3.29: Montaje Experimental para la Medición del Caudal de la aspiradora.

En la Figura 3.29 se puede ver que la aspiradora se encuentra conectada a un tubo de PVC de 50 [mm], el que se encuentra conectado por medio de una pieza de transformación a un tubo de PVC de 60 [mm]. La pieza de transformación se construyó siguiendo la Norma nombrada anteriormente y tiene un largo de 8 [cm]. Al final del tubo de 60 [mm] se encuentra un Difusor con el que, junto a un cono estrangulador, se va variando el caudal de aire que va a ingresar a la aspiradora. Sobre el tubo de 60 [mm] también se encuentra un orificio en el que se debe colocar el Tubo de Pitot, para realizar las mediciones que serán entregadas por un manómetro digital.

En la Figura 3.30 se puede apreciar la pieza de transformación construida.



Figura 3.30: Pieza de Transformación construida para el montaje experimental.

En la Figura 3.31 se muestra el cono estrangulador con el difusor utilizados para la variación del caudal.



Figura 3.31: Cono estrangulador utilizado para la variación del caudal.

3.4.2.2 Procedimiento Experimental

Para realizar las mediciones de caudal y obtener los tres puntos de operación en la curva característica de la aspiradora (sin agua, solo con agua y con agua y sus filtros), se deben realizar los siguientes pasos:

Paso 1: Medición del diámetro interior del tubo en que se coloca el Tubo de Pitot, para determinar las posiciones de éste.

Paso 2: Medición y registro de la Presión Barométrica p_b , al inicio de la medición.

Paso 3: Medición y registro de la Temperatura seca T_{d0} y la Temperatura húmeda T_{w0} , al inicio de la medición con el psicrómetro.

Paso 4: Medición y registro de la Presión Dinámica P_{v3r} , en cada una de las posiciones del Tubo de Pitot con un manómetro digital.

Paso 5: Medición y registro de la Presión Estática P_{s3r} , en cada una de las posiciones del Tubo de Pitot con el manómetro digital.

Paso 6: Medición y registro de la Presión Barométrica p_b , al final del barrido.

Paso 7: Medición y registro de la Temperatura seca T_{d0} y la Temperatura húmeda T_{w0} , al final del barrido.

Paso 8: Una vez obtenidas las medidas, se deben realizar los cálculos correspondientes al punto 3.4.1.2.

Se debe repetir desde el paso 2 al paso 8 cada vez que se varíe el caudal con el cono estrangulador, para cada una de las curvas mencionadas anteriormente.

3.4.3 Resultados de la Medición del Caudal

El ducto utilizado para realizar las mediciones de caudal tiene un diámetro de 60 [mm], por lo que según la Norma, las posiciones en que debe colocar el Tubo de Pitot se muestran en la Figura 3.32:

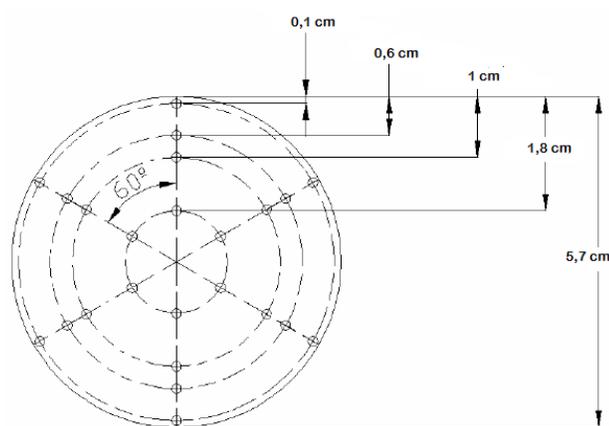


Figura 3.32: Posiciones en que se debe colocar el Tubo de Pitot para un ducto de 5,7 [cm] de diámetro interno.

Los datos de la curva característica de la aspiradora sin ningún tipo de filtro se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Datos obtenidos de la medición con la aspiradora sin agua y sin filtros.

Caudal	V₃ [m/s]	Q [m³/s]	Pv [Pa]	Pt [Pa]	Ps [Pa]
I	15,2	0,0386	226,7	-153,1	-379,8
II	15,1	0,0384	222,8	-147,5	-370,3
III	15,1	0,0386	225,2	-146,8	-372,0
IV	15,3	0,0391	231,0	-148,8	-379,8
V	15,1	0,0384	224,6	-158,6	-383,2
VI	15,1	0,0384	224,1	-192,9	-417,0
VII	15,4	0,0392	233,6	-260,3	-493,9
VIII	15,4	0,0392	235,2	-385,2	-620,4
IX	15,2	0,0388	226,4	-380,8	-607,2
X	13,4	0,0341	182,1	-2718,2	-2900,4
XI	9,0	0,0230	94,9	-9710,7	-9805,6
XII	8,0	0,0203	83,2	-15969,1	-16052,3

Los datos obtenidos con el estanque con agua y sin otro tipo de filtro se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Datos obtenidos de la medición con la aspiradora con agua y sin filtros.

Caudal	V₃ [m/s]	Q [m³/s]	Pv [Pa]	Pt [Pa]	Ps [Pa]
I	9,8	0,0250	52	-16790	-16880
II	11,8	0,0301	60	-8820	-8900
III	16,1	0,0411	148	-126	-291
IV	16,2	0,0413	159	-85	-244
V	16,1	0,0411	155	-80	-235
VI	16	0,0408	153	-77	-234

Los datos obtenidos en la medición con filtro de agua, filtros de esponjas y filtro HEPA se muestran en la Tabla 3.3

Tabla 3.3: Datos obtenidos de medición con aspiradora con agua, filtros de esponja y filtro HEPA.

Caudal	V₃ [m/s]	Q [m³/s]	Pv [Pa]	Pt [Pa]	Ps [Pa]
I	8,9	0,0227	48	-17200	-17300
II	9,6	0,0245	52	-1649	-1686
III	11,3	0,0288	78	-44	-124
IV	11,4	0,0291	78	-46	-126
V	11,7	0,0298	85	-63	-147
VI	13,1	0,0334	100	-575	-674

En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se puede ver el caudal Q obtenido con la Norma para cada uno de los barridos realizados para distintos caudales con sus respectivas presiones: Presión

Dinámica P_v , Presión Total P_t y Presión Estática P_s , y la Velocidad del flujo V_3 de aire que ingresa a la aspiradora. Con los datos obtenidos de las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se puede realizar una gráfica del caudal respecto a cada una de las presiones calculadas.

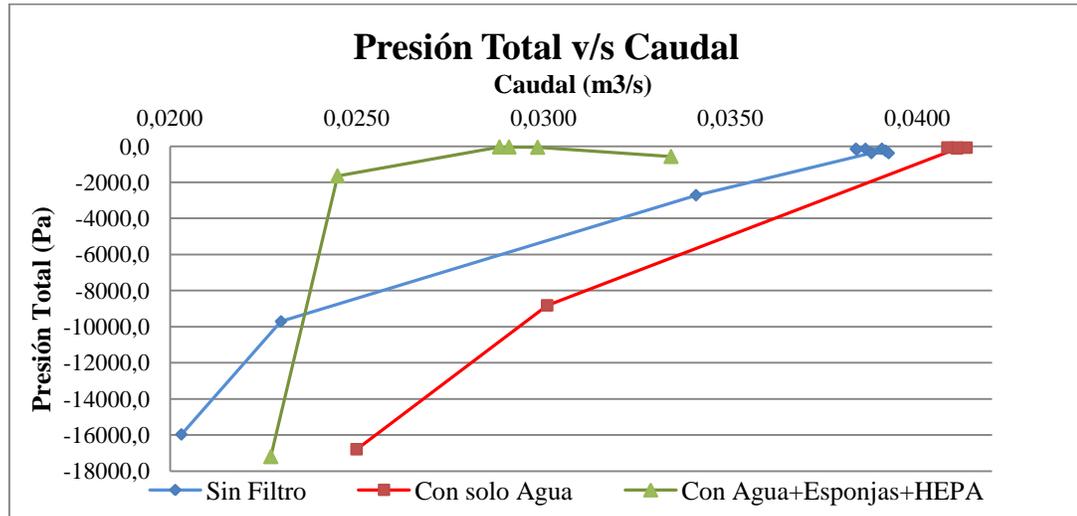


Figura 3.33: Gráfica Caudal Q versus Presión Total.

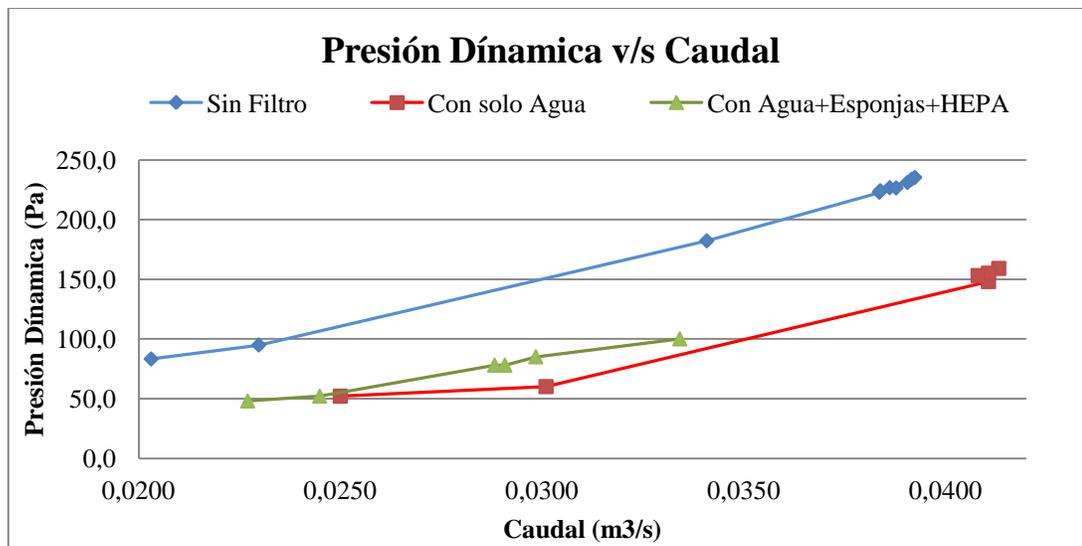


Figura 3.34: Gráfica Caudal Q versus Presión Dinámica.

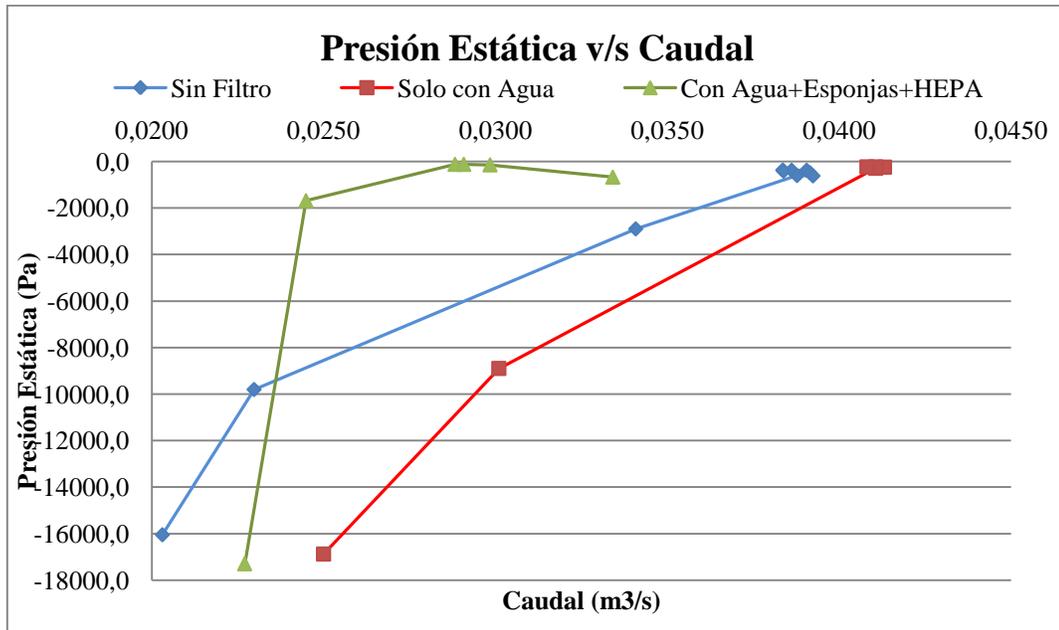


Figura 3.35: Gráfica Caudal Q versus Presión Estática.

En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3, la línea de color azul corresponde a las mediciones realizadas con la aspiradora sin ningún tipo de filtro, la línea de color rojo solo con agua en el estanque y la línea de color verde corresponde a los datos obtenidos de la medición con la aspiradora con agua y con los filtros de esponja y HEPA.

Como se puede ver en las figuras, los caudales de la aspiradora aumentan al utilizar solo agua como filtro y disminuyen al utilizar agua, esponjas y filtro HEPA, respecto a los caudales obtenidos para la aspiradora sin ningún tipo de filtro. Otra observación, es que las curvas de la Figura 3.33 y las curvas de la Figura 3.35 tienen la misma forma, esto se debe a que la Presión Dinámica es tan pequeña que no afecta en la Presión Total.

Capítulo IV: Sistema de Filtrado de material particulado

En el presente capítulo se describe el montaje experimental utilizado para la realización de las mediciones del filtrado de material, el procedimiento experimental y la presentación de los resultados obtenidos con su análisis respectivo.

4.1 Montaje Experimental

El montaje experimental consta de dos partes. La primera consiste en el ingreso de material particulado a la entrada de la aspiradora y la segunda, en la salida de éste. Ambas se detallan a continuación.

4.1.1 Ingreso de material a la aspiradora.

Para el ingreso de material se utiliza un sistema automatizado de alimentación de material particulado mediante ARDUINO con un motor paso a paso, el que se encuentra conectado a un sistema de engranajes para el movimiento de un tornillo sin fin dentro de un tubo de cobre. A través de este movimiento se hace ingreso de material particulado contenido en un embudo a un tubo PVC de 60 [mm] de diámetro conectado a la entrada de la aspiradora Thomas GENIUS S1 Aquafilter. Para alimentar el circuito se utiliza una fuente de poder GOLDTOOL DC POWER SUPPLY GPS-3005B. Lo anteriormente descrito se puede apreciar en la Figura 4.1.

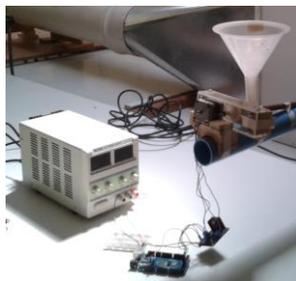


Figura 4.1: Sistema automatizado para alimentación de material.

4.1.1.1 Descripción del sistema de alimentación de material

4.1.1.1.1 Sistema automatizado

Para realizar la automatización se utilizó una placa ARDUINO MEGA 2560 conectada a un L298N, que a su vez se encuentra conectada a un motor paso a paso.

ARDUINO MEGA 2560

Arduino es una plataforma física computacional open-hardware basada en una placa con entradas y salidas, tanto analógicas como digitales (Figura 4.2). Está basado en el microcontrolador ATmega2560. Consiste en 54 pines de entradas/salidas digitales (de las que 14 pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16 [MHz], conexión USB, conector de alimentación, conector ICSP y botón de reset. Para utilizarlo solo se conecta a un PC por medio de un cable USB o una fuente de alimentación externa [14].

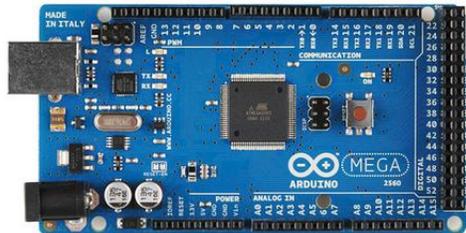


Figura 4.2: Placa Arduino Mega 2560 (Fuente: www.arduino.cl/arduino-mega-2560)

L298N Dual H Bridge DC Motor driver

Es un chip que permite controlar hasta dos motores de corriente continua o un motor paso a paso bipolar hasta 2 [A]. En la Figura 4.3, se observa un esquema del módulo que contiene el chip L298N.

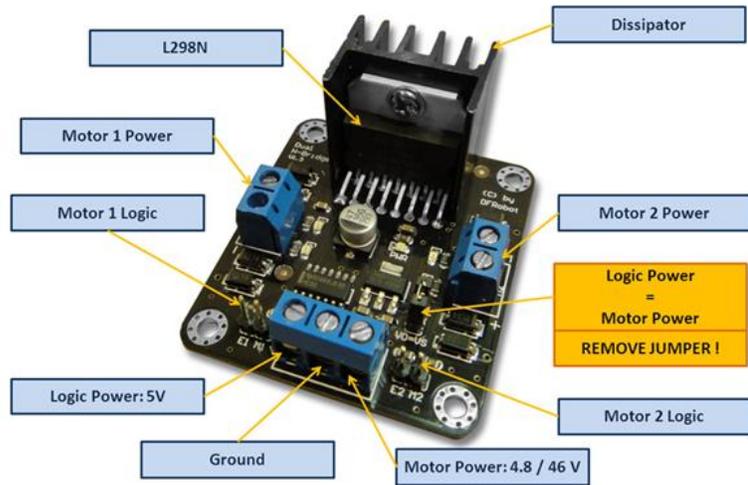


Figura 4.3: Esquema Modulo con chip L298N, utilizado en el experimento.

Cada motor es controlado por dos pines que van conectados hacia el controlador, en este caso, al Arduino.

Conexión Arduino – L298N

La conexión que se debe realizar entre la placa arduino y el modulo es la que se muestra en la Figura 4.4.

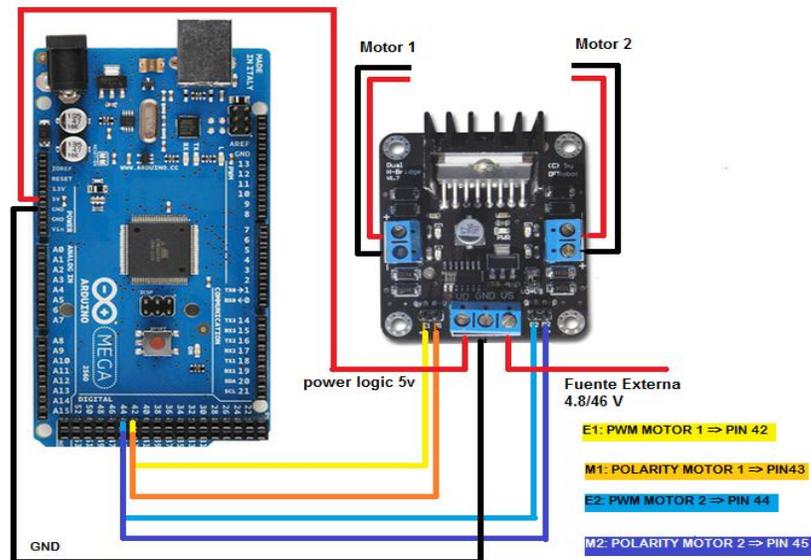


Figura 4.4: Esquema de conexión entre Arduino y L298N.

Motor Paso a Paso

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierten impulsos eléctricos en desplazamientos angulares, es decir, son capaces de avanzar una serie de grados o pasos, por lo que se pueden considerar como un conversor digital-analógico.

El motor utilizado en este experimento es un motor de paso híbrido de 2 fases (modelo FL39ST38-0504B) y tiene un tamaño de 39 [mm]. Las especificaciones se muestran en la Figura 4.5.

Ítem	Especificaciones
Paso angular	1.8
Precisión paso angular	±5% (paso completo)
Exactitud de resistencia	±10%
Exactitud de inductancia	±20%
Aumento de temperatura	80°C
Temperatura ambiente	-20°C – 50°C
Resistencia de aislamiento	100M Ω min, 500 VDC
Fuerza dieléctrica	500 VAC por minuto
Juego radial de eje	0.02 Máx.
Juego axial de eje	0.08 Máx.
Fuerza radial máxima	28N
Fuerza axial máxima	10N



Número de Modelo		Rango Voltaje	Corriente	Resistencia	Inductancia	Torque	N° cables	Inercia Rotor	Peso	Longitud
Eje simple	Doble eje	V	A	Ω	mH	g·cm		g·cm2	kg	mm
FL398ST38-0504A	FL398ST38-0504B	12	0,5	24	45	2900	4	24	0.2	39

Figura 4.5: Especificaciones Motor paso a paso utilizado.

4.1.1.1.2 Sistema de Engranajes

Este sistema consta de un conjunto de engranajes cuyo fin es aumentar el torque de giro, el cual va dentro de una caja de acrílico transparente para protegerlo del polvo del entorno y así no interferir en el movimiento. En primera instancia se encuentran los engranajes conectados al motor paso a paso y en segunda, un engranaje conectado al tornillo sin fin encargado de depositar el material a través del movimiento del motor.

Caja de acrílico con soportes de madera

La caja consta de tres placas de acrílico, una superior para sostener el motor y dos laterales para cerrar, unidas a dos soportes de madera sostenidas en una placa de plástico que sostiene el engranaje del tornillo.

La placa de acrílico superior tiene un largo de 14,7 [cm] y 4 [cm] de ancho. Lleva un orificio de 2,2 [cm] para que el motor quede al tope y 2 orificios de menor tamaño para poder atornillar y así fijar el motor. Las otras dos placas de acrílico tienen las mismas dimensiones mencionadas anteriormente.

Los soportes de madera tienen un largo de 4 [cm] y un ancho de 3 [cm].

La placa de plástico lleva en su centro un orificio de 1,3 [cm] en donde va un rodamiento que une el sistema de engranajes con el tornillo.

En la Figura 4.6 se observan las placas de acrílico, placa de plástico y los soportes utilizados para la construcción de la caja.



Figura 4.6: Elementos para la construcción de la caja protectora.

Engranajes

El engranaje que va unido al motor es de plástico y tiene un ancho de 4 [cm] y en su centro tiene uno más pequeño de 1 [cm].

En la Figura 4.7 se observa el engranaje utilizado anteriormente descrito.



Figura 4.7: Engranaje utilizado en el motor.

El engranaje que va unido al tornillo sin fin consta de 2 engranajes acoplados para formar un sistema. La parte más pequeña del engranaje se une con el engranaje del motor y a su vez tiene un eje metálico unido a la placa de acrílico superior (Figura 4.8). El conjunto de la caja con el sistema de engranajes se muestra en la Figura 4.9.

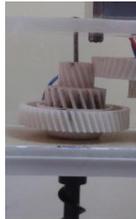


Figura 4.8: Engranaje en forma de torta para la unión del engranaje del motor y del tornillo.



Figura 4.9: Caja de acrílico y soportes de madera en cuyo interior se encuentra el sistema de engranajes.

4.1.1.1.3 Tolva de alimentación de material particulado

Este sistema consta de un tornillo sin fin de plástico, que se encuentra dentro de un tubo de cobre de 3/8 de pulgada por el que circula el material contenido en una tolva (embudo), que se encuentra unido al tubo de cobre. El movimiento del motor hace que el tornillo sin fin gire y que el material circule por el tubo de cobre hasta que se deposita en un tubo de PVC de 60 [mm] de diámetro unido a la entrada de la aspiradora.

El tornillo sin fin tiene un largo de 18,3 [cm] y un diámetro de 0,5 [cm]. En su parte superior va un rodamiento con un tornillo como eje que une este último con el rodamiento de la placa plástica.

El tubo de cobre de 3/8 de pulgada tiene un largo de 20 [cm] y va unido al rodamiento del tornillo de plástico. En la parte inferior, tiene un corte de 2 [cm] de largo que actúa como tapa protectora para que el material no escape en el ingreso de este al tubo de PVC. En la parte superior del tubo se tiene un orificio de 1 [cm] a 2 [cm] del rodamiento, en donde es insertado y sellado con silicona líquida al embudo donde es contenido el material que se desea ingresar.

El embudo es de plástico y tiene un diámetro máximo de 14,5 [cm] (parte superior) y un diámetro mínimo de 1 [cm] (parte inferior).

En la Figura 4.10 se puede observar el sistema descrito anteriormente, además de cómo va sostenido en el tubo de PVC. El motor va sobre un soporte construido especialmente para mantenerlo en la posición correcta para su funcionamiento, y el tubo de cobre está sostenido sobre un soporte, también construido especialmente para que éste tenga una inclinación que permita el ingreso adecuado del polvo al tubo de PVC, como se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.10: Unión de embudo con tubo de cobre para el depósito de material en tubo de PVC.



Figura 4.11: Tolva de alimentación de material particulado utilizado en el experimento.

4.1.2 Sistema de salida

Este sistema consta de una caja de madera, en donde se inserta la aspiradora, unida a una estructura metálica que a su vez se encuentra unida a un tubo de PVC de 243 [mm] de diámetro, en la que en su parte final se instala una bomba de aspiración que captura el polvo que sale de la aspiradora.

4.1.2.1 Descripción elementos del sistema de salida

Caja de madera

Esta caja fue diseñada en base a las dimensiones de la aspiradora dejando unos centímetros libres para la circulación del aire que sale de las salidas de la aspiradora y considerando la dirección del flujo. Las dimensiones interiores de la caja son de 48x41x30 [cm]. En la Figura 4.12 se muestra un esquema de la caja de madera que se construyó para el montaje.

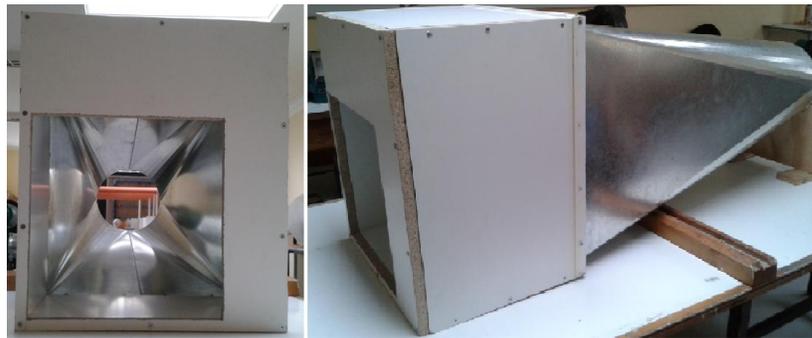


Figura 4.12: Caja de madera unida a pieza de transformación que se construye para el montaje experimental.

Pieza de Transformación

Las dimensiones de esta pieza se calculan en base a las dimensiones interiores de la caja de madera (alto y ancho) y con la Norma AMCA-ASHRAE, descrita en el punto 3.4.1.1, para la construcción de la pieza de transformación. Con las dimensiones de la caja de madera y aplicando la norma, se tiene que esta estructura debe tener un largo de 90 [cm].

El diseño de esta pieza fue realizado con el programa SolidWorks, y se muestra en la Figura 4.13.

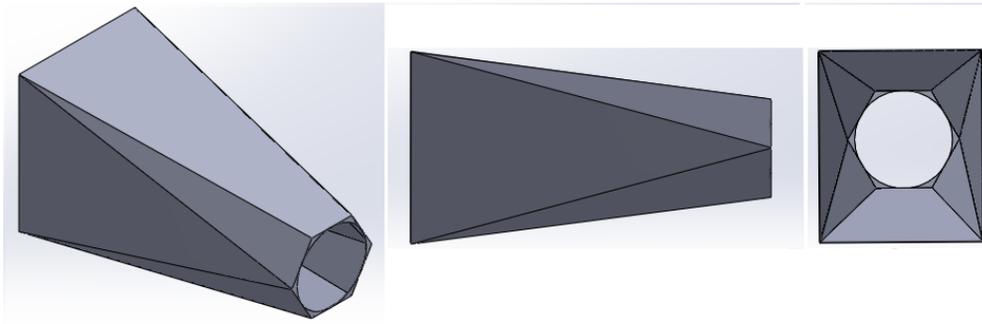


Figura 4.13: Pieza de transformación metálica para la unión de la caja de madera y el tubo de PVC.

Tubo PVC

Se utiliza un tubo de PVC de 243 [mm] de diámetro interior, que va conectado a la pieza de transformación, como se muestra en la Figura 4.14, para que el flujo de aire que sale de la aspiradora circule por el tubo lo más homogéneamente posible hasta salir al exterior.



Figura 4.14: Tubo de PVC conectado a la pieza de transformación metálica.

Bomba de Aspiración

La bomba de aspiración utilizada corresponde a una bomba MSA 03-0452, la que aspira 2 litros de aire/ minuto.

En la Figura 4.15, la bomba está conectada a una manguera por la que circula el aire succionado que a su vez pasa por una estructura que sostiene un porta filtro, como se muestra en la Figura 4.16.



Figura 4.15: Bomba utilizada en la medición del sistema de Filtrado de Polvo



Figura 4.16: Estructura por donde ingresa el aire succionado.

La bomba a su vez está conectada a un dispositivo de encendido que es alimentado por un transformador y que se encuentra conectado a la red de 220 [V] (Figura 4.17).



Figura 4.17: Transformador y dispositivo de encendido de la Bomba.

La bomba, para realizar las mediciones, está dentro del tubo de PVC para captar el aire con polvo que sale de la aspiradora. En la Figura 4.18, se puede apreciar el montaje experimental completo construido con el Software SolidWorks.

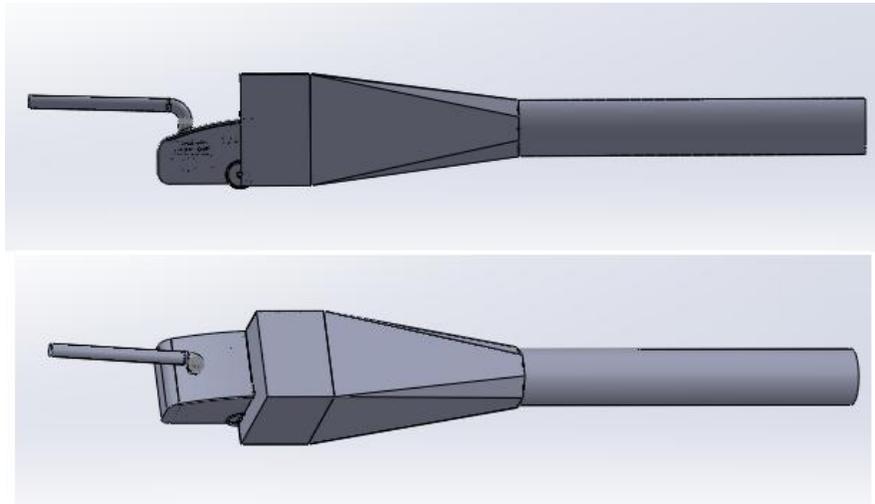


Figura 4.18: Montaje Experimental construido en SolidWorks.

4.2 Procedimiento Experimental

En este ítem se presentan los procedimientos necesarios para realizar las mediciones de filtrado de material particulado.

4.2.1 Algoritmo para Automatización de Sistema de alimentación de material particulado

Para automatizar el sistema de depósito de material, se realizó un algoritmo computacional con el que se le da la orden al motor de girar, haciendo girar el tornillo sin fin dentro del tubo de cobre para depositar el material, contenido en el embudo, dentro del tubo de PVC conectado a la entrada de la aspiradora.

El algoritmo identifica las variables de entradas correspondientes a los pines del motor, es decir, la conexión entre la placa de Arduino con el dispositivo L298N, además de la variable tiempo. Esta variable corresponde al tiempo de delay con el que se requiere controlar los pasos del motor. Una vez identificadas las variables de entrada se configuran los pines como salidas digitales, para luego ir activando los pines para el movimiento del motor en un paso. Como se requiere que el motor de una cantidad de pasos determinada según la cantidad de material que se desea introducir en el sistema, se realiza la activación de los pines dentro de un Loop, en el que también se debe considerar la variable de tiempo

de delay entre paso y paso del motor, el número de vueltas que el motor debe realizar y con ello, el número de pasos.

El algoritmo descrito anteriormente, se muestra en la Figura 4.19.

```
giro_motor_3
// Movimiento de Rotación de un motor paso a paso

int motorE1 = 42;
int motorM1 = 43;
int motorE2 = 44;
int motorM2 = 45;
int delayTime = 6; // Delay que determina el tiempo entre paso y paso,
                  // 2ms es lo mas lo mas pequeño que puede ser.

void setup(){

  pinMode(motorE1,OUTPUT); // Configuración de los pines como salida digital
  pinMode(motorM1,OUTPUT);
  pinMode(motorE2,OUTPUT);
  pinMode(motorM2,OUTPUT);

  digitalWrite(motorE1,HIGH); // Los pines se activan
  digitalWrite(motorE2,HIGH);

  int vueltas=100;
  int pasos= vueltas*50;

  for (int i=0;i<=pasos;i++){ // Se mandan pulsos al motor

    digitalWrite(motorM1,HIGH);
    digitalWrite(motorM2,LOW);
    delay(delayTime);

    digitalWrite(motorM1,LOW);
    digitalWrite(motorM2,LOW);
    delay(delayTime);

    digitalWrite(motorM1,LOW);
    digitalWrite(motorM2,HIGH);
    delay(delayTime);

    digitalWrite(motorM1,HIGH);
    digitalWrite(motorM2,HIGH);
    delay(delayTime);
  }
}
```

Figura 4.19: Algoritmo para giro de motor paso a paso en automatización del sistema de alimentación de material particulado.

4.2.2 Relaciones entre número de vueltas, tiempo de delay y cantidad de material

Para poder introducir el tiempo de delay y el número de vueltas que se requiere en el movimiento del motor en el algoritmo, se realizaron cálculos para determinar la relación

entre ambas variables. Los cálculos consisten en determinar para un número conocido de vueltas que el motor realiza en un minuto, el delay entre paso y paso. Para ello se utilizó la siguiente relación.

$$1 \text{ vuelta} \rightarrow x \text{ [s]}$$

$$N^\circ \text{ de vueltas} \rightarrow 60 \text{ [s]}$$

El resultado de esta relación corresponde al tiempo total de giro, por lo que dividiendo por 200 (número de pasos que realiza el motor paso a paso utilizado), se obtiene el tiempo delay entre cada uno de los pasos.

Dicho lo anterior, en la Tabla 4.1 se tiene la relación entre el número de vueltas, que varía entre 10 y 150 por minuto, y su respectivo tiempo de delay.

Tabla 4.1: Relación entre Número de vueltas por minuto y tiempo de delay en un motor de paso a paso

N° de vueltas en 60 segundos	N° de Pasos totales	Delay [ms]	Delay [s]	Tiempo en 200 pasos [ms]	Tiempo en 200 pasos [s]
150	30000	2	0,00200	400	0,400
140	28000	2,14	0,00214	428	0,428
130	26000	2,3	0,00230	460	0,460
120	24000	2,5	0,00205	500	0,500
110	22000	2,7	0,00270	540	0,540
100	20000	3	0,00300	600	0,600
90	18000	3,3	0,00330	660	0,660
80	16000	3,8	0,00380	760	0,760
70	14000	4,3	0,00430	860	0,860
60	12000	5	0,00500	1000	1,000
50	10000	6	0,00600	1200	1,200
40	8000	7,5	0,00750	1500	1,500
30	6000	10	0,01000	2000	2,000
20	4000	15	0,01500	3000	3,000
10	2000	30	0,03000	6000	6,000

Otra relación que se debe tener en consideración, es la relación entre el número de vueltas con la cantidad de material que se desea ingresar. Para ello se utilizó el sistema de depósito de material automatizado y para cada una de las revoluciones por minuto se masa la cantidad de material depositado. En la Tabla 4.2 se observa los datos experimentales obtenidos.

Tabla 4.2: Relación entre Número de vueltas y cantidad de polvo depositado.

RPM	N° Pasos	Delay [ms]	Delay [s]	Flujo másico de polvo [g/min]
150	30000	2	0,002	247,44
140	28000	2,14	0,00214	231,13
130	26000	2,3	0,0023	219,03
120	24000	2,5	0,0025	203,16
110	22000	2,7	0,0027	183,02
100	20000	3	0,003	176,31
90	18000	3,3	0,0033	156,58
80	16000	3,8	0,0038	138,84
70	14000	4,3	0,0043	122,52
60	12000	5	0,005	109,54
50	10000	6	0,006	91,23
40	8000	7,5	0,0075	71,07
30	6000	10	0,01	52,45
20	4000	15	0,015	33,77
10	2000	30	0,03	17,35

4.2.3 Preparación muestras de polvo

Para obtener las muestras de material necesarias para realizar las mediciones de filtrado, se tamizó el material con mallas de la escala de Tyler para separarlo en distintos tamaños. Se tamizó una cantidad de 7,5 [kg] de material con las mallas de 14, 20, 28, 40, 48,65, 100, 150, 200, 270 y 400, en un tamizador Tyler automático modelo RX-29-10. El material se separó en 4 tamizados, 3 de 2 [kg] y uno de 1,5 [kg] con un tiempo de 30 minutos de tamización.



Figura 4.20: Tamizador Tyler modelo RX-29-10 en funcionamiento.

En la Tabla 4.3 se muestra la cantidad de material total por malla y por tamizado.

Tabla 4.3: Cantidad de polvo por número de malla y por tamizado.

N° Malla Tyler	Diámetro menor [μm]	Tamizado 1	Tamizado 2	Tamizado 3	Tamizado 4	Masa Total [g]
		Masa polvo [g]	Masa polvo [g]	Masa polvo [g]	Masa polvo [g]	
14	1180	826,0	848,1	843,0	588,2	3105,3
20	850	109,8	107,5	105,6	81,4	404,3
28	600	116,7	120,4	143,3	82,7	463,1
40	425	126,7	175,7	261,6	95,8	659,8
48	300	154,8	162,2	112,1	118,5	547,6
65	212	163,4	107,9	66,5	148,6	486,4
100	150	182,9	205,1	318,4	162,6	686,1
150	106	120,5	146,6	63,2	99,1	429,4
200	75	62,8	35,4	23,3	55,5	177,0
270	53	43,3	60,6	44,4	30,8	179,1
400	38	19,8	15,5	8,3	20,3	63,9
Fondo	< 38	25,7	4,4	1,5	20	51,6
TOTAL		833,7	1033,8	1042,6	833,9	3744

De los datos de la Tabla 4.3 se utilizó el material de las mallas 28, 40, 48, 65, 100, 150, 200, 270 y 400, por el óptimo funcionamiento del motor. Con el material obtenido, se separó y tamizó tres muestras de 100 [g], 400 [g] y de 600 [g], cuyo detalle se muestra a continuación en las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6.

Tabla 4.4: Masa de material para muestras de 100 gramos.

N° Malla	Diámetro menor [μm]	Muestra 15 minutos	Muestra 30 minutos	Muestra 45 minutos
		Masa [g]	Masa [g]	Masa [g]
28	600	10,8	9,2	8,8
40	425	12,4	12,4	9,7
48	300	13,4	13,4	12,2
65	212	16,5	16,7	17,6
100	150	17,8	17,9	18,7
150	106	12,6	13,7	15,6
200	75	6,9	7,3	7,9
270	53	3,7	3,4	3,6
400	38	2,7	2,7	2,7
Fondo	< 38	3,2	3,3	3,2
Tamizado total [g]		100,0	100,0	100,0

Tabla 4.5: Masa de material para muestras de 400 gramos.

N° Malla	Diámetro menor [μm]	Muestra 15 minutos	Muestra 30 minutos	Muestra 45 minutos
		Masa [g]	Masa [g]	Masa [g]
28	600	37,9	37,9	43,9
40	425	44,3	45,4	46,3
48	300	51,2	50,3	49,9
65	212	70,5	66,5	68,1
100	150	77,8	73,7	80,4
150	106	52,9	54,5	53
200	75	30,5	34,9	24,9
270	53	11,5	12,5	13,2
400	38	10,9	11,8	9,6
Fondo	< 38	12,5	12,5	10,7
Tamizado total [g]		400,0	400,0	400,0

Tabla 4.6: Masa de material para muestras de 600 gramos

N° Malla	Diámetro menor [μm]	Muestra 15 minutos	Muestra 30 minutos	Muestra 45 minutos
		Masa [g]	Masa [g]	Masa [g]
28	600	66,5	66,7	60,7
40	425	70,5	72,2	64,5
48	300	77,9	77,8	71,8
65	212	106,3	97,4	104,3
100	150	116,6	118,2	126,4
150	106	72,6	75,3	87,6
200	75	40,5	38,8	38,6
270	53	20,9	26,9	17,6
400	38	13,8	14,5	14,6
Fondo	< 38	14,4	11,9	14,8
Tamizado total [g]		600,0	599,7	600,9

Se consideraron tres muestras con similares masas por diámetro mayor de las partículas para 100 [g], 400 [g] y 600 [g]. Esto se debe a que se realizan mediciones con distintos tiempos de aspiración con la aspiradora. Estos tiempos son 15, 30 y 45 minutos, para analizar la saturación del agua contenida en la aspiradora.

4.2.4 Preparación Filtros de la bomba de aspiración

Los filtros de la bomba de aspiración que se colocan en el portafiltro se deben masar con una Balanza RADWAG AS 220/C/2, la que puede pesar una masa mínima de 10 [mg] y una máxima de 220 [g]. Además, se debe medir la temperatura seca y temperatura húmeda con un psicrómetro.

En la Figura 4.21, se puede observar la balanza utilizada en la medición de masa inicial de los filtros con un filtro en proceso de medición.



Figura 4.21: Balanza RADWAG AS 220/C/2 utilizada en medición de masa de filtros.

Los valores de los filtros destinados para cada una de las muestras de material, se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Masas iniciales de filtros utilizados en bomba de aspiración.

Muestra [g]	Tiempo [min]	Masa Inicial Filtro $\pm 0,0003$ [g]	Humedad [%]
100	15	0,0102	56,5
100	30	0,0093	42,0
100	45	0,0112	47,2
400	15	0,0105	32,4
400	30	0,0095	59,8
400	45	0,0108	46,4
600	15	0,0108	51,6
600	30	0,0122	43,9
600	45	0,0092	37,4

4.2.5 Medición de Filtrado de Polvo

Básicamente, el procedimiento consiste en medir la cantidad de material que sale de la aspiradora luego de que éste pase por el sistema de filtrado y medir la cantidad de material que queda retenido en el agua del sistema de filtrado de la aspiradora.

Antes de realizar las mediciones y una vez que el montaje experimental ya está montado, se deben seguir los siguientes pasos.

1. Masar estanque de agua de la aspiradora.
2. Colocar 1 litro de agua en estanque y nuevamente masar el depósito de agua.
3. En algoritmo del sistema de alimentación de material particulado introducir el número de vueltas correspondiente a la muestra de material que se desea ingresar (en este caso 60 RPM).
4. Colocar filtro en bomba e introducir bomba en Tubo de salida.
5. Colocar muestra de material en tolva del sistema de alimentación.
6. Encender aspiradora y sistema de alimentación de material.
7. Esperar el tiempo de medición correspondiente para cada una de las muestras de material (15, 30 y 45 minutos)
8. Apagar aspiradora.
9. Masar estanque de agua.

4.2.5.1 Material retenido en sistema de filtro de aspiradora

Este método consiste en medir la cantidad de material que es retenido en el sistema de filtrado de la aspiradora, es decir, en el estanque con agua. Para ello, se debe recuperar todo el material retenido en el estanque del sistema de filtrado de la aspiradora, lavando el estanque y depositándolo en un nuevo depósito.

El agua con el material recuperado se introduce en un filtro de vacío unido a una bomba de succión con el fin de succionar toda el agua posible del depósito, como se muestra en la Figura 4.22.



Figura 4.22: Bomba de succión de agua.

Una vez que ya se succiona el agua, se retira el material y se deja secar, para luego tamizar y masar.

4.2.5.2 Material que sale de la aspiradora

La bomba de aspiración, como se describió en el punto 4.1.2, succiona el aire que sale de la aspiradora y lo hace pasar por el filtro que está en un portafiltro. El método consiste en medir la masa del filtro una vez transcurrido el tiempo de funcionamiento de la aspiradora para cada una de las muestras de material, ya descritas en el punto 4.2.3.

Para medir la masa retenida en los filtros se utiliza la balanza mencionada anteriormente.

4.3 Resultados Medición de Polvo

Una vez terminada la medición en los tiempos correspondientes para cada una de las muestras, se realizó la medición de masa del estanque de agua. En la Tabla 4.8 se muestran los valores de la masa del estanque inicial, es decir, con el litro de agua, y la masa del estanque final, con las temperaturas correspondientes a cada medición.

Tabla 4.8: Valores de masa inicial y final del estanque de agua.

Muestra [g]	Tiempo [min]	Masa de agua [g]	Masa Depósito [g]	Masa inicial Depósito [g]	Td [°C]	Tw [°C]	Masa final Depósito [g]	Td [°C]	Tw [°C]
100	15	1000,0	604,9	1604,9	20,0	14,5	1512,5	21,0	14,5
100	30	1000,0	604,9	1604,9	22,0	14,0	1465,6	22,5	14,5
100	45	1014,8	605,7	1620,5	20,0	13,0	1214,5	20,0	13,0
400	15	1000,0	604,9	1604,9	22,0	14,0	1754,9	22,0	13,5
400	30	1000,0	604,7	1604,7	21,5	16,0	1699,7	20,0	15,0
400	45	1000,0	606,3	1606,3	24,0	16,5	1545,1	23,0	16,0
600	15	1000,0	606,5	1606,5	22,5	16,5	1832,7	23,0	16,0
600	30	1000,0	604,8	1604,8	22,0	14,0	1752,5	22,0	13,5
600	45	1000,1	605,3	1605,4	25,0	15,5	1586,4	23,0	15,0

Con estos datos obtenidos y haciendo una diferencia entre las masas finales del estanque con la masa inicial y considerando la masa de material de la muestra que ingresa a la aspiradora, se puede obtener la cantidad de agua que se pierde durante la medición, tanto por el aire que ingresa como de su evaporación por el calor del motor. Los resultados se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Diferencia entre masa final e inicial del estanque de agua.

Muestra [g]	Tiempo [min]	Masa Depósito con agua y material [g]	Masa Depósito con agua Final [g]	Masa de Agua que se pierde [g]
100	15	1704,9	1512,5	192,4
100	30	1704,9	1465,6	239,3
100	45	1720,5	1214,5	506
400	15	2004,9	1754,9	250
400	30	2004,7	1699,7	305
400	45	2006,3	1545,1	461,2
600	15	2206,5	1832,7	373,8
600	30	2204,8	1752,5	452,3
600	45	2205,4	1586,4	619

4.3.1 Material retenido en sistema de filtrado de aspiradora

Después de la recuperación del material del estanque y del tamizaje correspondiente a cada una de las muestras se obtuvieron los siguientes resultados, los que se pueden observar en las tablas 4.10, 4.11 y 4.12.

Tabla 4.10: Masa de material en muestra de 100 [g] para cada tiempo de aspiración.

Nº Malla	Diámetro menor [μm]	Muestra 15 minutos	Muestra 30 minutos	Muestra 45 minutos
		Masa [g]	Masa [g]	Masa [g]
28	600	10,3	9,0	8,4
40	425	11,9	11,5	9,5
48	300	12,9	12,7	11,8
65	212	16	15,8	17,3
100	150	16,5	15,8	18
150	106	11,6	13,2	15,3
200	75	6,8	7,1	7,5
270	53	3,2	3,1	3,3
400	38	2,4	2,4	2,4
Fondo	< 38	2,7	2,8	2,5
Tamizado total [g]		94,3	93,4	96,0

Tabla 4.11: Masa de material en muestra de 400 [g] para cada tiempo de aspiración.

N° Malla	Diámetro menor [μm]	Muestra 15 minutos	Muestra 30 minutos	Muestra 45 minutos
		Masa [g]	Masa [g]	Masa [g]
28	600	36,1	37,2	42,4
40	425	43,8	43,8	44,6
48	300	50,7	49,7	48,9
65	212	68,5	65,2	67,2
100	150	69	69,4	76,1
150	106	51,8	54	52,8
200	75	30	32,6	22,5
270	53	11	11,4	12,7
400	38	10,1	10,2	9,4
Fondo	< 38	10,4	11,4	9,1
Tamizado total [g]		381,4	384,9	385,7

Tabla 4.12: Masa de material en muestra de 600 [g] para cada tiempo de aspiración.

N° Malla	Diámetro menor [μm]	Muestra 15 minutos	Muestra 30 minutos	Muestra 45 minutos
		Masa [g]	Masa [g]	Masa [g]
28	600	63,3	63,3	58,3
40	425	68,1	67,4	61,6
48	300	76,5	76,2	70,3
65	212	102,6	91,7	96,2
100	150	104,8	106,3	114,5
150	106	70,2	73,1	85
200	75	37,7	36,3	36,2
270	53	20,3	25,7	16,2
400	38	10,5	13,1	13
Fondo	< 38	14,3	11,7	14,3
Tamizado total [g]		568,3	564,8	565,6

4.3.2 Material que sale de la aspiradora

Una vez finalizada la medición en el tiempo correspondiente se retira el filtro de la bomba de aspiración y luego se introduce en la balanza para obtener su masa. Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de los filtros destinado a cada una de las muestras de material. Los valores de las masas iniciales y finales de cada uno de los filtros se muestran en la Tabla 4.13, además de los valores iniciales para establecer una comparación.

Tabla 4.13: Masas finales de los filtros utilizados en cada una de las mediciones.

Muestra [g]	Tiempo [min]	Masa Inicial Filtro ± 0,0003 [g]	Humedad [%]	Masa Final Filtro ± 0,0003 [g]	Humedad [%]
100	15	0,0102	56,5	0,0101	50,4
100	30	0,0093	42,0	0,0095	42,7
100	45	0,0112	47,2	0,0111	32,4
400	15	0,0105	32,4	0,0103	42,0
400	30	0,0095	59,8	0,0097	54,4
400	45	0,0108	46,4	0,0107	47,6
600	15	0,0108	51,6	0,0110	55,4
600	30	0,0122	43,9	0,0125	42,1
600	45	0,0092	37,4	0,0097	37,4

Como se puede ver en la tabla, para el caso de la muestra de 600 [g] para la medición de 45 minutos se observa un aumento en la masa final del filtro respecto a la masa inicial de éste, sin embargo, su valor se encuentra dentro del error de la balanza entregado por el fabricante, observándose además una humedad relativa igual para ambos casos. Por lo tanto, con las muestras analizadas no se puede observar la saturación del agua utilizada con el ingreso de 600 [g] de material en el sistema de filtrado.

Capítulo V: Sistema de Filtrado de Gases

En el presente capítulo se realiza una descripción del montaje y procedimiento experimental utilizado para la medición del filtrado de O_2 , CO_2 , CO y NO_2 y los resultados obtenidos en las mediciones realizadas.

5.1 Montaje Experimental

El montaje experimental se divide en dos partes, la primera es por la que ingresan los gases a la aspiradora para ser filtrado, y la segunda es por donde sale el aire limpio o con presencia de gases.

5.1.1 Ingreso de Gases a la aspiradora

Los gases que se ingresan al sistema de filtrado de la aspiradora son los provenientes del tubo de escape de un automóvil, el que está conectado por un tubo corrugado metálico al tubo unido a la aspiradora, para salir de la aspiradora por una estructura en la que se encuentra un Analizador de Gases. En la Figura 5.1, se puede apreciar el montaje experimental descrito anteriormente.



Figura 5.1: Montaje Experimental utilizado para la medición del filtrado de gases.

5.1.1.1 Descripción de elementos para ingreso de gases

Automóvil

El auto utilizado es una camioneta SsangYong Actyon Sports 4x4 perteneciente al Departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Santiago de Chile. Este automóvil utiliza Diesel como combustible.

Tubo metálico corrugado

Este tubo corrugado se utiliza para la unión entre el tubo de escape del automóvil con el tubo que va conectado a la aspiradora. Tiene un diámetro de 3 pulgadas por un metro de largo.



Figura 5.2: Unión entre tubo de escape de camioneta y tubo de ingreso de la aspiradora.

5.1.2 Sistema de salida

El sistema por el que salen los gases que ingresan a la aspiradora es el mismo utilizado en el montaje experimental del sistema de filtrado de material particulado, es decir, la caja de madera unida a la estructura metálica y a un tubo de PVC, descrito en el Capítulo IV en el punto 4.1.2, solo que en vez de utilizar una bomba de aspiración de material se utiliza un Analizador de Gases.

5.1.2.1 Descripción elementos sistema de salida

Caja de madera

Pieza de Transformación

Tubo PVC

La caja de madera, pieza de transformación y el tubo de PVC se encuentran descritos en el Capítulo IV, en el ítem 4.1.2.1.

Analizador de Gases

El analizador de gases utilizado es un aparato portátil Dräger x-am 5600 cuya aplicación es la medición de gases para una supervisión continua de la concentración de varios gases en el aire ambiental en el puesto de trabajo y o áreas con riesgo de explosión. La medición en este dispositivo permite la medición de hasta cuatro gases gracias a los sensores que lo componen [15].

Este dispositivo, para la medición, se encuentra dentro del tubo de PVC además de estar calibrado para ello. La calibración se realizó en un centro especializado de Dräger a fines del mes de mayo.



Figura 5.3: Analizador de Gases Dräger x-am 5600 utilizado en la medición.

5.2 Procedimiento Experimental

Para la medición del filtrado de gases se realizan mediciones con el analizador de gases y la camioneta encendida. En primera instancia, se miden los gases provenientes del tubo de

escape con el estanque de agua de la aspiradora sin agua ni filtros, para poder obtener las concentraciones de los gases que salen de la camioneta durante 15 minutos. En segunda instancia, se debe llenar el estanque de agua de la aspiradora con un litro y medir su masa e iniciar la medición en un tiempo de 15 minutos. Una vez terminada la medición, se debe masar el estanque de agua y limpiar.

Se realizan dos mediciones adicionales a la ya descrita. Una para un tiempo de medición de 30 minutos y otra para un tiempo de 45 minutos. En ambos casos, se debe realizar el procedimiento de llenar el estanque de la aspiradora con un litro de agua y medir su masa antes de la medición y una vez finalizada, masar nuevamente el estanque de agua.

El proceso de medir la masa del estanque de agua al inicio y final de la medición, indica la cantidad de agua que se pierde en cada una de las mediciones.

A continuación, se muestran los pasos a seguir para realizar las mediciones ya descritas.

Paso 1: Encender analizador de gases.

Paso 2: Encender camioneta y aspiradora.

Paso 3: Medir durante 15 minutos sin filtro de agua.

Paso 4: Apagar aspiradora y camioneta, y retirar analizador de gases para su apagado.

Paso 5: Llenar estanque con un litro de agua y masar.

Paso 6: Instalar estanque en aspiradora y colocar analizador de gases encendido en tubo de PVC.

Paso 7: Encender camioneta y aspiradora.

Paso 8: Medir durante 15 minutos.

Paso 9: Apagar aspiradora y camioneta, y retirar analizador para su apagado.

Paso 10: Retirar estanque de agua y masar.

Para las siguientes mediciones, es decir para 30 y 45 minutos se debe realizar el procedimiento desde el punto 4 hasta el paso final. En el paso 8 varía el tiempo de la medición.

5.3 Resultados medición de gases

Los datos de las mediciones realizadas son recuperados del analizador de gases, a través de un software incorporado que permite visualizar los datos en el PC en un archivo que muestra las concentraciones medidas de cada uno de los gases en los tiempos de medición (15, 30 y 45 minutos). Las concentraciones de los gases detectadas se muestran a continuación en tablas de datos y en graficas donde se puede ver el comportamiento de los gases.

5.3.1 Medición sin agua en el estanque

En la Tabla 5.1 se muestran las concentraciones de los gases de interés en cada uno de los minutos de la medición.

Tabla 5.1: Concentraciones de los gases en medición sin filtro de agua

Minuto	O ₂ [%Vol]	CO [ppm]	NO ₂ [ppm]	CO ₂ [%Vol]
0	18,9	860	0,7	0,23
1	17,8	1430	6,7	0,33
2	18,9	915	16,6	0,22
3	19,1	770	20,2	0,2
4	19,2	745	22,2	0,19
5	19,2	735	23	0,18
6	19,2	705	23,6	0,17
7	19,2	685	24	0,17
8	19,2	660	24	0,17
9	19,3	630	23,6	0,16
10	19,3	605	23,4	0,16
11	19,3	580	23	0,16
12	19,3	555	22,4	0,16
13	19,3	530	22,4	0,16
14	19,4	510	22	0,15
15	19,4	492	21,8	0,15

5.3.2 Medición de gases durante 15 minutos

En la Tabla 5.2, se muestran los datos obtenidos durante la medición de gases en 15 minutos de funcionamiento de la aspiradora con agua en su estanque.

Tabla 5.2: Datos de las concentraciones de gases en 15 minutos de medición.

Minuto	O ₂ [%Vol]	CO [ppm]	NO ₂ [ppm]	CO ₂ [%Vol]
0	19,4	690	5,6	0,18
1	19,4	645	26	0,19
2	19,5	428	28,2	0,15
3	19,5	408	29,2	0,15
4	19,5	400	29,4	0,15
5	19,5	388	29,4	0,15
6	19,5	376	29,2	0,15
7	19,5	374	29,2	0,14
8	19,5	368	29	0,14
9	19,5	370	29	0,14
10	19,6	378	29,2	0,14
11	19,6	384	29,2	0,14
12	19,6	390	29,6	0,14
13	19,6	394	29,8	0,14
14	19,6	400	30,2	0,14
15	19,5	404	30,6	0,14

5.3.3 Medición de gases durante 30 minutos

En la Tabla 5.3 se muestran los datos obtenidos durante la medición de gases durante 30 minutos con filtro de agua.

Tabla 5.3: Datos de las concentraciones de gases en 30 minutos de medición.

Minuto	O ₂ [%Vol]	CO [ppm]	NO ₂ [ppm]	CO ₂ [%Vol]
0	19,4	555	27,4	0,16
1	19,6	348	31,4	0,15
2	19,6	362	32,4	0,14
3	19,6	372	32,8	0,14
4	19,6	384	33,6	0,14
5	19,6	380	33	0,14
6	19,6	376	33	0,14
7	19,6	372	32,8	0,14
8	19,6	368	32,4	0,14
9	19,6	366	32,2	0,14
10	19,6	364	32	0,14
11	19,6	358	31,8	0,14
12	19,6	348	31,2	0,14
13	19,6	342	31	0,14
14	19,6	340	30,8	0,13
15	19,6	334	30,6	0,13
16	19,6	328	30,4	0,13
17	19,6	326	30,2	0,14
18	19,6	320	30	0,14
19	19,6	316	29,8	0,13
20	19,6	310	29,4	0,13
21	19,6	306	29,4	0,14
22	19,6	300	29	0,13
23	19,6	296	29	0,13
24	19,6	294	29	0,13
25	19,6	290	28,8	0,13
26	19,6	286	28,6	0,13
27	19,6	288	28,6	0,13
28	19,6	280	28,4	0,14
29	19,6	276	28,2	0,13

5.3.4 Medición de gases durante 45 minutos

En la Tabla 5.4 se muestran los datos obtenidos por el analizador de gases en 45 minutos de medición con filtro de agua.

Tabla 5.4: Datos de las concentraciones de gases durante 45 minutos de medición con filtro de agua.

Minuto	O ₂ [%Vol]	CO [ppm]	NO ₂ [ppm]	CO ₂ [%Vol]
0	19,6	372	32,2	0,15
1	19,7	294	32,6	0,14
2	19,6	292	32,8	0,14
3	19,6	290	32,8	0,14
4	19,6	290	32,6	0,14
5	19,6	286	32	0,13
6	19,6	284	31,8	0,13
7	19,6	282	31,2	0,13
8	19,6	280	31,2	0,13
9	19,6	278	31	0,13
10	19,6	274	30,8	0,13
11	19,7	272	30,4	0,13
12	19,6	272	30,4	0,13
13	19,6	268	30,2	0,13
14	19,7	266	29,8	0,13
15	19,7	260	29,8	0,13
16	19,7	256	29,6	0,13
17	19,7	254	29,4	0,13
18	19,7	252	29,4	0,13
19	19,7	248	29	0,13
20	19,7	248	29	0,13
21	19,7	244	28,8	0,13
22	19,7	246	28,8	0,13
23	19,7	244	28,8	0,13
24	19,7	240	28,6	0,13
25	19,7	238	28,4	0,13
26	19,6	238	28,4	0,13
27	19,6	236	28,4	0,13
28	19,7	234	28,2	0,13
29	19,7	232	28	0,13
30	19,6	230	28	0,13
31	19,6	228	27,8	0,13
32	19,6	228	27,8	0,13
33	19,6	228	28	0,13
34	19,6	228	28	0,13
35	19,6	228	27,8	0,13
36	19,6	228	27,8	0,13
37	19,6	228	28	0,13
38	19,7	224	27,6	0,13
39	19,7	222	27,6	0,13
40	19,6	222	27,6	0,13
41	19,7	224	27,6	0,13
42	19,7	222	27,6	0,13
43	19,7	222	27,6	0,13
44	19,7	220	27,6	0,13

5.3.5 Consumo de agua durante las mediciones

Uno de los datos a medir, según el procedimiento experimental, es la masa del estanque con agua antes de iniciar la medición y luego de terminada. Con ello, se puede obtener el agua perdida durante las mediciones y también el consumo de agua por minuto para cada una de las mediciones. En la Tabla 5.5 se muestra la masa del estanque de agua inicial y final en cada uno de las mediciones.

Tabla 5.5: Datos de medición de masa inicial y final del estanque con agua.

Tiempo [min]	Masa Estanque [g]	Masa Estanque Inicial [g]	Masa Estanque Final [g]
15	604,8	1604,8	1548,9
30	604,8	1604,8	1488,8
45	604,8	1604,8	1414,0

En la Tabla 5.6 se muestra la diferencia de la masa inicial con la final y el cálculo del consumo de agua por minuto en cada una de las mediciones. El cálculo del consumo de agua, se obtiene dividiendo la masa de agua perdida en la medición por la cantidad de minutos de cada una de ellas.

Tabla 5.6: Calculo de consumo de agua, a través de la diferencia de masa de estanque de agua.

Diferencia de Masa [g]	Consumo de agua por minuto [g/min]
55,9	3,727
116,0	3,867
190,8	4,240

Capítulo VI: Análisis de la Efectividad del Filtrado de material particulado y de gases y Dimensionamiento a nivel industrial

En el presente capítulo se muestra la eficiencia del sistema de filtrado de material particulado y gases, y el análisis para el dimensionamiento a nivel industrial.

6.1 Efectividad del filtrado por agua de material particulado y de gases

En este ítem se realiza un análisis de los datos obtenidos en las mediciones realizadas para obtener la efectividad del filtrado de material particulado y de gases. Para el caso del filtrado de material, el análisis se basa en la comparación de las muestras iniciales y de las muestras finales, y para el caso del filtrado de gases, su análisis se basa en la diferencia de gases iniciales con los gases finales obtenidos en la medición.

6.1.1 Efectividad del Filtrado de material particulado

Para obtener la efectividad del Filtrado de material particulado a través de agua, como se dijo anteriormente, se debe realizar una caracterización del material de las muestras iniciales y las muestras finales y el cálculo de porcentaje de retención de material del agua.

6.1.1.1 Caracterización del material inicial y final

Para obtener las curvas de caracterización del material se realiza un tamizaje para cada una de las muestras y así obtener, según el tamaño de las partículas, la cantidad de material que contiene cada muestra. Además, se debe calcular el porcentaje que ocupa cada uno de los tamaños y también su porcentaje de masa acumulada.

Caracterización material muestras iniciales

A continuación se muestran las tablas obtenidas para cada una de las muestras, junto a la curva de caracterización o distribución de tamaño de cada una de ellas agrupadas en una gráfica.

Muestras de 100 gramos

Los datos obtenidos para la medición de 15 minutos se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 15 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
3,2	3,20	3,20	38
2,7	2,70	5,90	53
3,7	3,70	9,60	75
6,9	6,90	16,50	106
12,6	12,60	29,10	150
17,8	17,80	46,90	212
16,5	16,50	63,40	300
13,4	13,40	76,80	425
12,4	12,40	89,20	600
10,8	10,80	100,00	850

Los datos obtenidos para la medición de 30 minutos se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
3,3	3,30	3,30	38
2,7	2,70	6,00	53
3,4	3,40	9,40	75
7,3	7,30	16,70	106
13,7	13,70	30,40	150
17,9	17,90	48,30	212
16,7	16,70	65,00	300
13,4	13,40	78,40	425
12,4	12,40	90,80	600
9,2	9,20	100,00	850

Los datos obtenidos para la medición de 45 minutos se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 45 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
3,2	3,20	3,20	38
2,7	2,70	5,90	53
3,6	3,60	9,50	75
7,9	7,90	17,40	106
15,6	15,60	33,00	150
18,7	18,70	51,70	212
17,6	17,60	69,30	300
12,2	12,20	81,50	425
9,7	9,70	91,20	600
8,8	8,80	100,00	850

Con los datos de las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3 se construye la grafica que se muestra en la Figura 6.1.

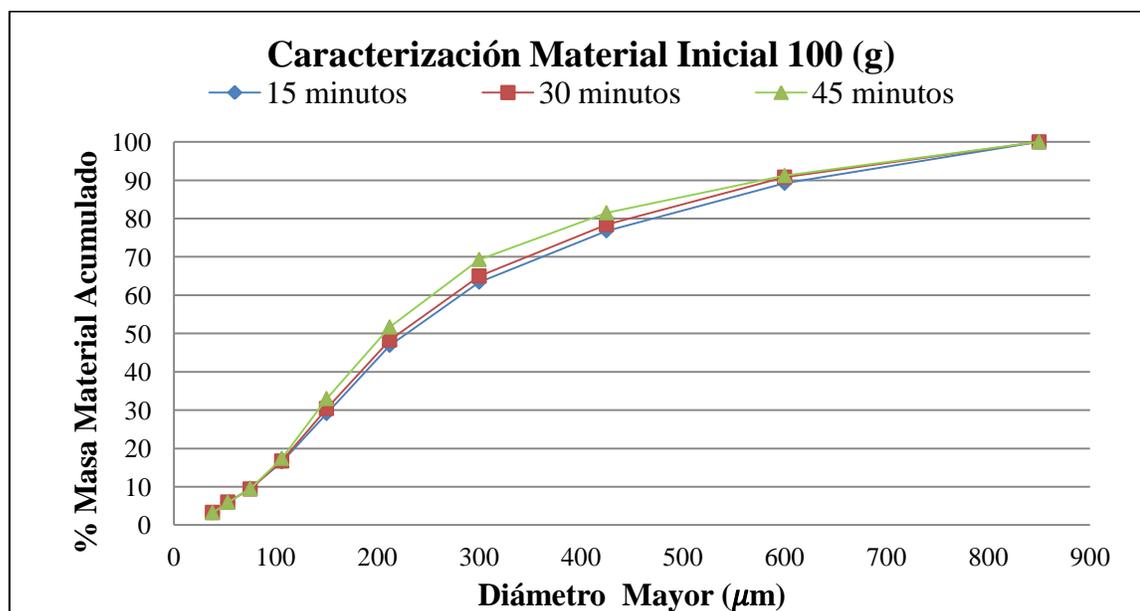


Figura 6.1: Curva característica del material con las tres muestras de 100 gr, para medición de 15, 30 y 45 minutos.

Muestras de 400 gramos

Los datos obtenidos para la medición de 15 minutos se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 15 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
12,5	3,13	3,13	38
10,9	2,73	5,85	53
11,5	2,88	8,73	75
30,5	7,63	16,35	106
52,9	13,23	29,58	150
77,8	19,45	49,03	212
70,5	17,63	66,65	300
51,2	12,80	79,45	425
44,3	11,08	90,53	600
37,9	9,48	100,00	850

Los datos obtenidos para la medición de 30 minutos se muestran en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
12,5	3,13	3,13	38
11,8	2,95	6,08	53
12,5	3,13	9,20	75
34,9	8,73	17,93	106
54,5	13,63	31,55	150
73,7	18,43	49,98	212
66,5	16,63	66,60	300
50,3	12,58	79,18	425
45,4	11,35	90,53	600
37,9	9,48	100,00	850

Los datos obtenidos para la medición de 45 minutos se muestran en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
10,7	2,68	2,68	38
9,6	2,40	5,08	53
13,2	3,30	8,38	75
24,9	6,23	14,60	106
53	13,25	27,85	150
80,4	20,10	47,95	212
68,1	17,03	64,98	300
49,9	12,48	77,45	425
46,3	11,58	89,03	600
43,9	10,98	100,00	850

Con los datos de la Tabla 6.4, 6.5 y 6.6 se construye la grafica mostrada en la Figura 6.2.

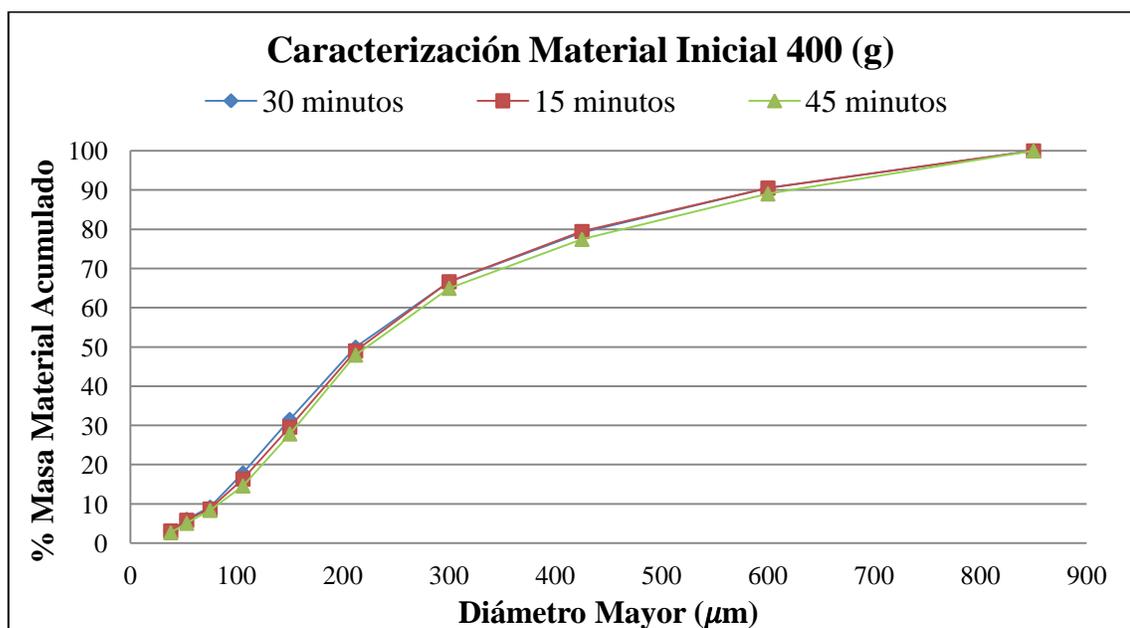


Figura 6.2: Curva característica del material con las tres muestras de 400 gr, para medición de 15, 30 y 45 minutos.

Muestras de 600 gramos

Los datos obtenidos para la medición de 15 minutos se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 15 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
14,4	2,40	2,40	38
13,8	2,30	4,70	53
20,9	3,48	8,18	75
40,5	6,75	14,93	106
72,6	12,10	27,03	150
116,6	19,43	46,47	212
106,3	17,72	64,18	300
77,9	12,98	77,17	425
70,5	11,75	88,92	600
66,5	11,08	100,00	850

Los datos obtenidos para la medición de 30 minutos se muestran en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
11,9	1,98	1,98	38
14,5	2,42	4,40	53
26,9	4,49	8,89	75
38,8	6,47	15,36	106
75,3	12,56	27,91	150
118,2	19,71	47,62	212
97,4	16,24	63,87	300
77,8	12,97	76,84	425
72,2	12,04	88,88	600
66,7	11,12	100,00	850

Los datos obtenidos para la medición de 45 minutos se muestran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 45 minutos

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
14,8	2,46	2,46	38
14,6	2,43	4,89	53
17,6	2,93	7,82	75
38,6	6,42	14,25	106
87,6	14,58	28,82	150
126,4	21,04	49,86	212
104,3	17,36	67,22	300
71,8	11,95	79,16	425
64,5	10,73	89,90	600
60,7	10,10	100,00	850

Con los datos de las Tablas 6.7, 6.8 y 6.9 se construye la grafica de la Figura 6.3.

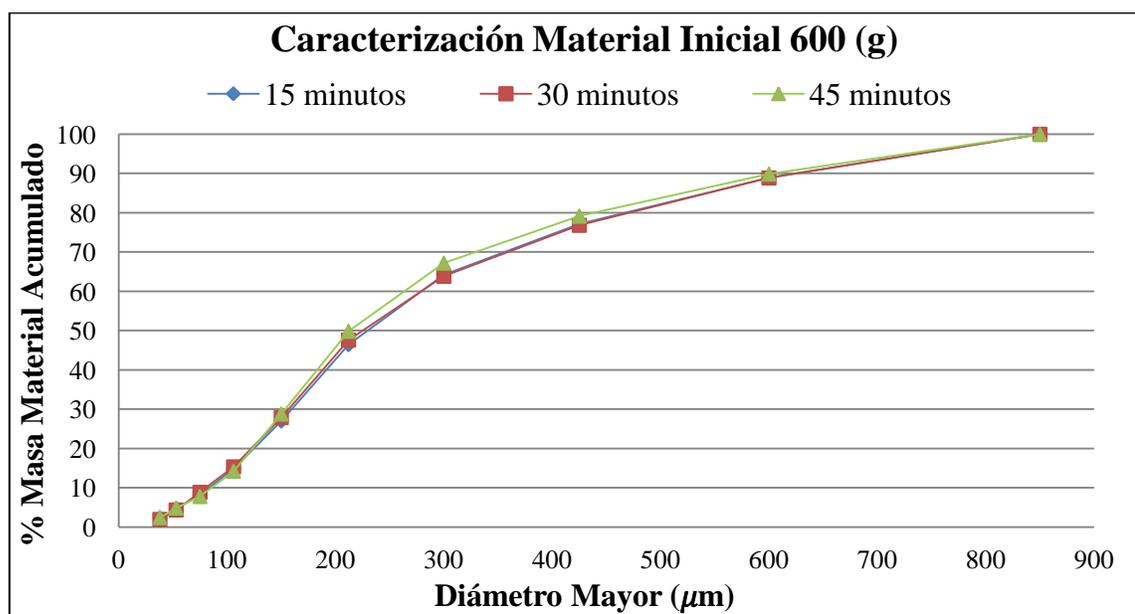


Figura 6.3: Curva característica del material con las tres muestras de 600 gr, para medición de 15, 30 y 45 minutos

Caracterización material muestras finales

Las tablas que contienen la cantidad de masa según el tamaño del diámetro máximo de partículas y los cálculos necesarios para realizar la caracterización del material, se muestran a continuación en conjunto a la gráfica que muestra las curvas de caracterización de cada una de las muestras.

Muestras de 100 gramos

Los datos obtenidos luego de la medición de 15 minutos se muestran en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 15 minutos

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
2,7	2,86	2,86	38
2,4	2,55	5,41	53
3,2	3,39	8,80	75
6,8	7,21	16,01	106
11,6	12,30	28,31	150
16,5	17,50	45,81	212
16	16,97	62,78	300
12,9	13,68	76,46	425
11,9	12,62	89,08	600
10,3	10,92	100,00	850

Los datos obtenidos luego de la medición de 30 minutos se muestran en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
2,8	3,00	3,00	38
2,4	2,57	5,57	53
3,1	3,32	8,89	75
7,1	7,60	16,49	106
13,2	14,13	30,62	150
15,8	16,92	47,54	212
15,8	16,92	64,45	300
12,7	13,60	78,05	425
11,5	12,31	90,36	600
9	9,64	100,00	850

Los datos obtenidos luego de la medición de 45 minutos se muestran en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 45 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
2,5	2,60	2,60	38
2,4	2,50	5,10	53
3,3	3,44	8,54	75
7,5	7,81	16,35	106
15,3	15,94	32,29	150
18	18,75	51,04	212
17,3	18,02	69,06	300
11,8	12,29	81,35	425
9,5	9,90	91,25	600
8,4	8,75	100,00	850

Con los datos obtenidos luego de finalizadas las mediciones realizadas, se construye la grafica de la Figura 6.4.

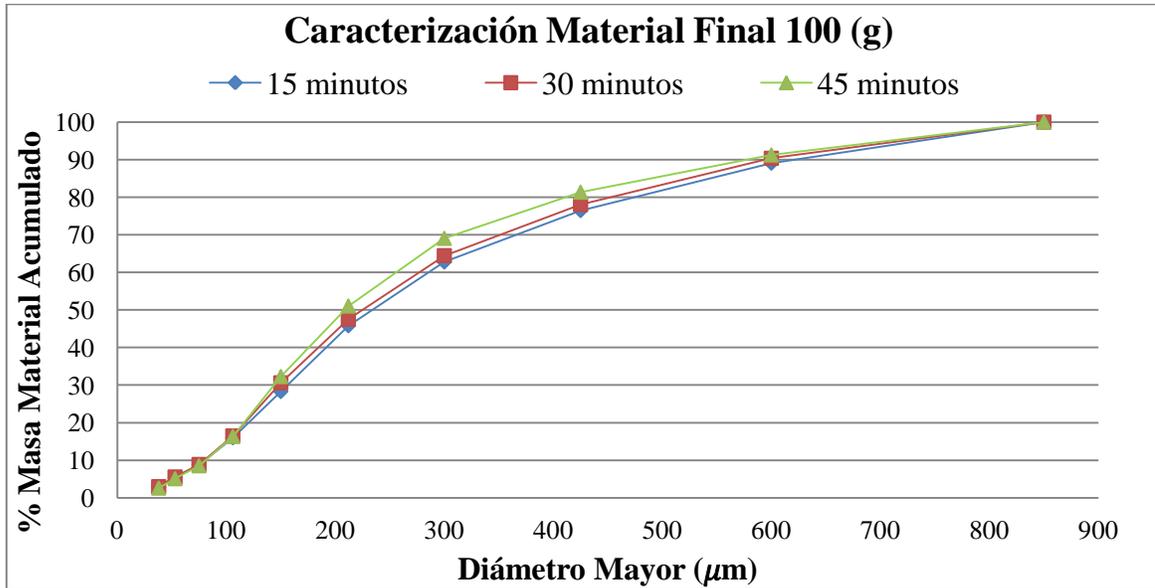


Figura 6.4: Curva característica del material con las tres muestras de 100 gr, para medición de 15, 30 y 45 minutos.

Muestras de 400 gramos

Los datos obtenidos luego de la medición de 15 minutos se muestran en la Tabla 6.13

Tabla 6.13: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 15 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
10,4	2,73	2,73	38
10,1	2,65	5,37	53
11	2,88	8,26	75
30	7,87	16,12	106
51,8	13,58	29,71	150
69	18,09	47,80	212
68,5	17,96	65,76	300
50,7	13,29	79,05	425
43,8	11,48	90,53	600
36,1	9,47	100,00	850

Los datos obtenidos luego de la medición de 30 minutos se muestran en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
11,4	2,96	2,96	38
10,2	2,65	5,61	53
11,4	2,96	8,57	75
32,6	8,47	17,04	106
54	14,03	31,07	150
69,4	18,03	49,10	212
65,2	16,94	66,04	300
49,7	12,91	78,96	425
43,8	11,38	90,34	600
37,2	9,66	100,00	850

Los datos obtenidos luego de la medición de 45 minutos se muestran en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 45 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
9,1	2,36	2,36	38
9,4	2,44	4,80	53
12,7	3,29	8,09	75
22,5	5,83	13,92	106
52,8	13,69	27,61	150
76,1	19,73	47,34	212
67,2	17,42	64,77	300
48,9	12,68	77,44	425
44,6	11,56	89,01	600
42,4	10,99	100,00	850

Con los datos obtenidos de las Tablas 6.13, 6.14 y 6.15 se construye la grafica de la Figura 6.5.

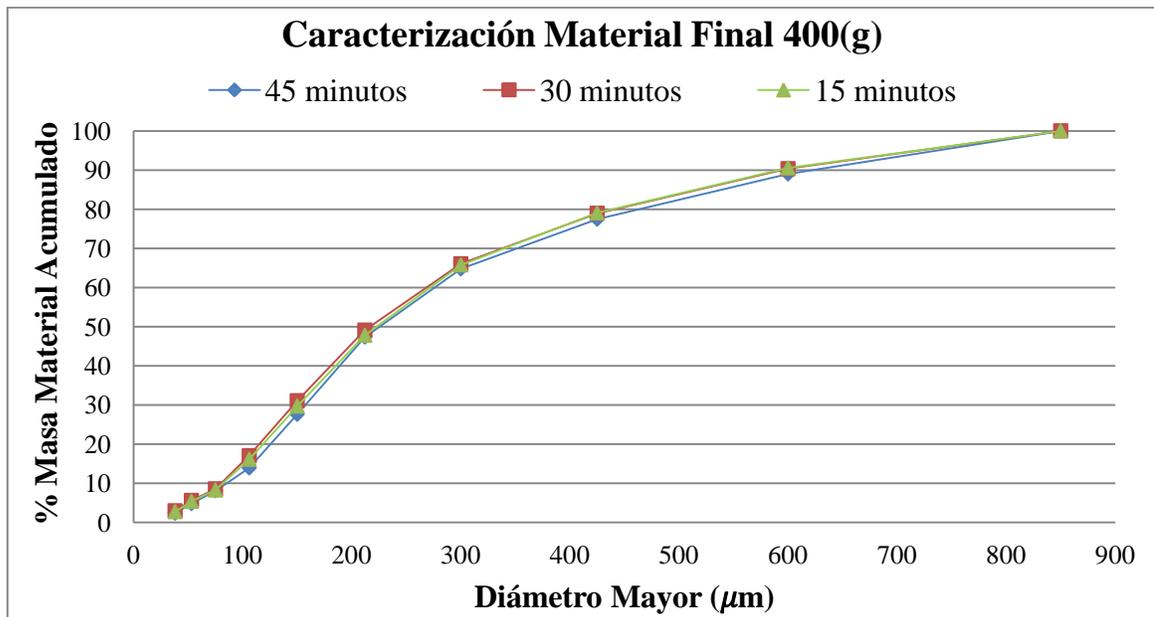


Figura 6.5: Curva característica del material con las tres muestras de 400 gr, para medición de 15, 30 y 45 minutos.

Muestras de 600 gramos

Los datos obtenidos una vez finalizada la medición de 15 minutos se muestran en la Tabla 6.16.

Tabla 6.16: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 15 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
14,3	2,52	2,52	38
10,5	1,85	4,36	53
20,3	3,57	7,94	75
37,7	6,63	14,57	106
70,2	12,35	26,92	150
104,8	18,44	45,36	212
102,6	18,05	63,42	300
76,5	13,46	76,88	425
68,1	11,98	88,86	600
63,3	11,14	100,00	850

Los datos obtenidos luego de realizada la medición de 30 minutos se muestran en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 30 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
11,7	2,07	2,07	38
13,1	2,32	4,39	53
25,7	4,55	8,94	75
36,3	6,43	15,37	106
73,1	12,94	28,31	150
106,3	18,82	47,13	212
91,7	16,24	63,37	300
76,2	13,49	76,86	425
67,4	11,93	88,79	600
63,3	11,21	100,00	850

Los datos obtenidos una vez finalizada la medición de 45 minutos se muestran en la Tabla 6.18.

Tabla 6.18: Masa de material utilizado para cada uno de los diámetros máximos de las partículas para medición de 45 minutos.

Masa Material [g]	% Masa de material	% Masa material acumulado	Diámetro mayor [μm]
14,3	2,53	2,53	38
13	2,30	4,83	53
16,2	2,86	7,69	75
36,2	6,40	14,09	106
85	15,03	29,12	150
114,5	20,24	49,36	212
96,2	17,01	66,37	300
70,3	12,43	78,80	425
61,6	10,89	89,69	600
58,3	10,31	100,00	850

Con los datos de las Tablas 6.16, 6.17 y 6.18 se construye la grafica de la Figura 6.6.

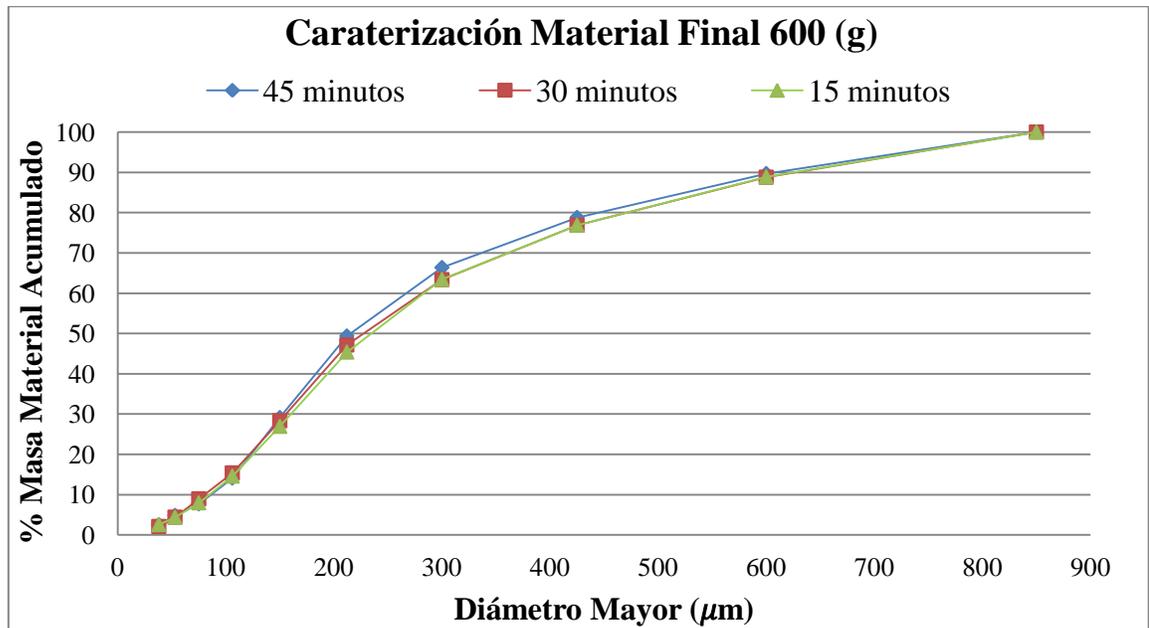


Figura 6.6: Curva característica del material con las tres muestras de 600 gr, para medición de 15, 30 y 45 minutos.

6.1.1.2 Comparación masa de material inicial y final

Para comparar las masas iniciales y las masas finales del material particulado, se obtienen gráficas de las Figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18 en las que se puede observar la diferencia de masa para cada una de las muestras de material, además de las caracterizaciones de material inicial y final para cada una de las muestras utilizadas para las mediciones agrupadas por cantidad de material.

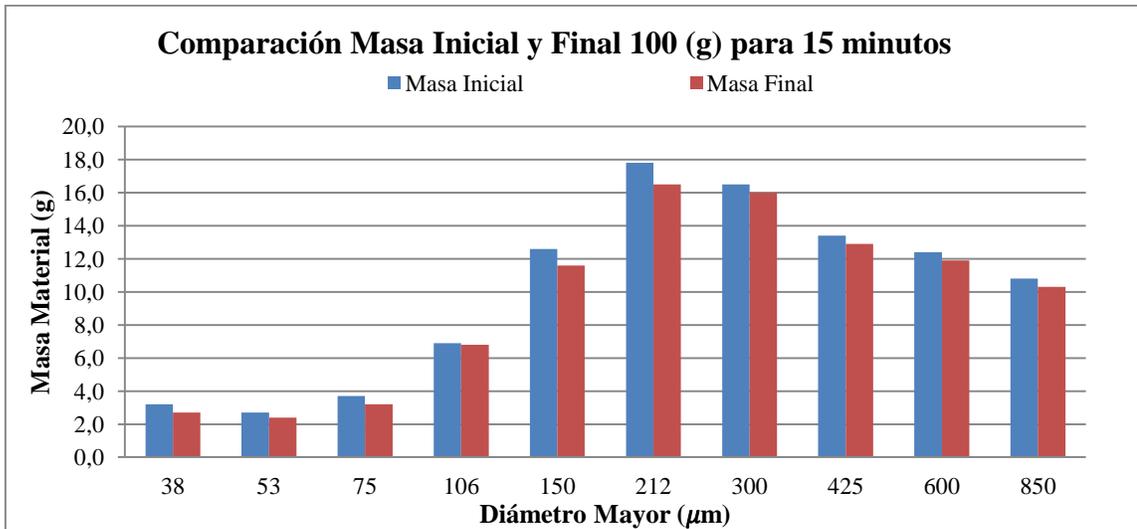


Figura 6.7: Comparación de material muestra de 100 gramos para medición de 15 minutos.

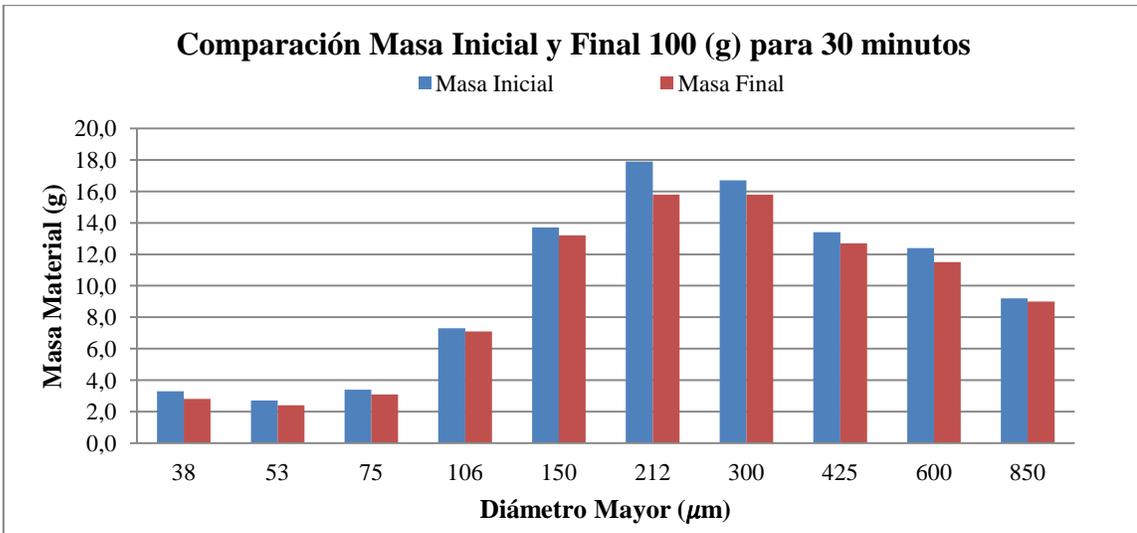


Figura 6.8: Comparación de material muestra de 100 gramos para medición de 30 minutos.

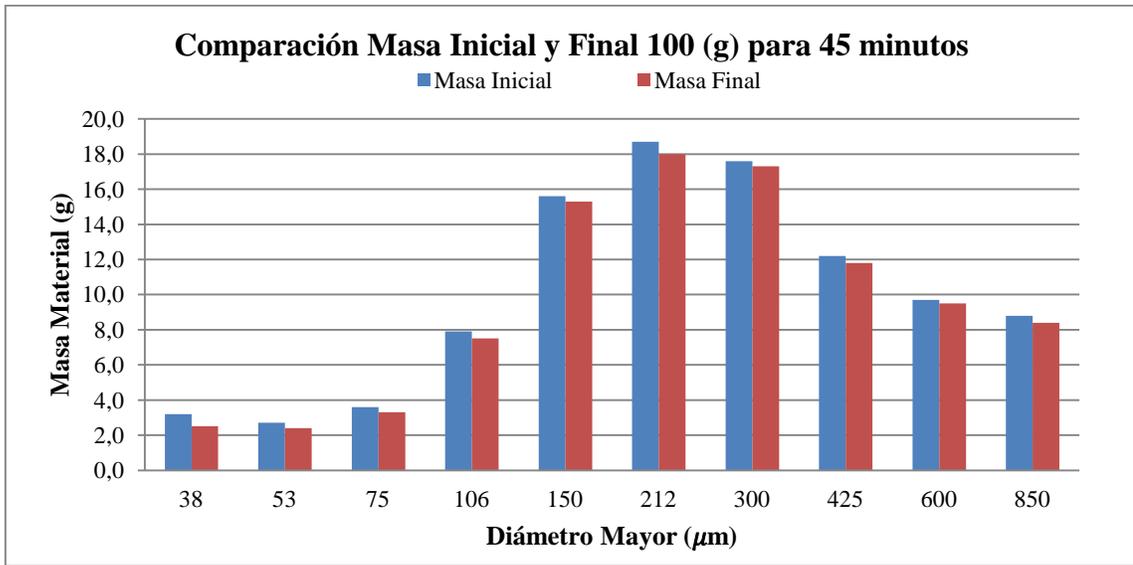


Figura 6.9: Comparación de material muestra de 100 gramos para medición de 45 minutos.

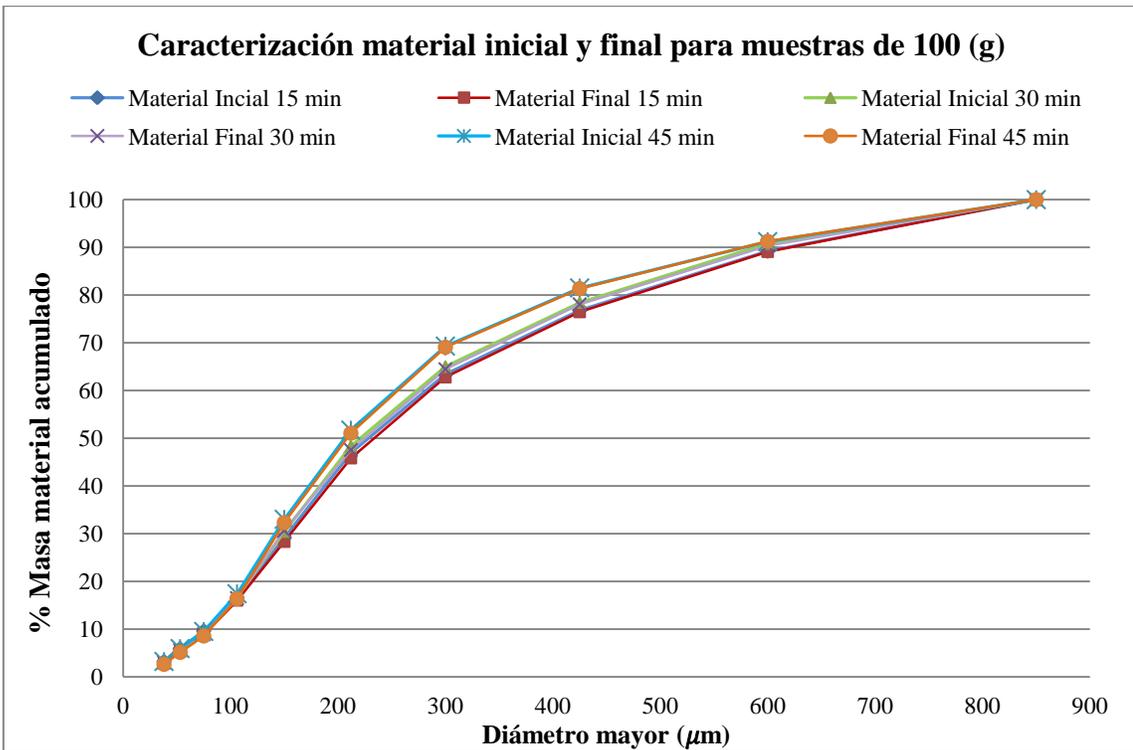


Figura 6.10: Caracterización de material inicial y final para muestra de 100 gramos.

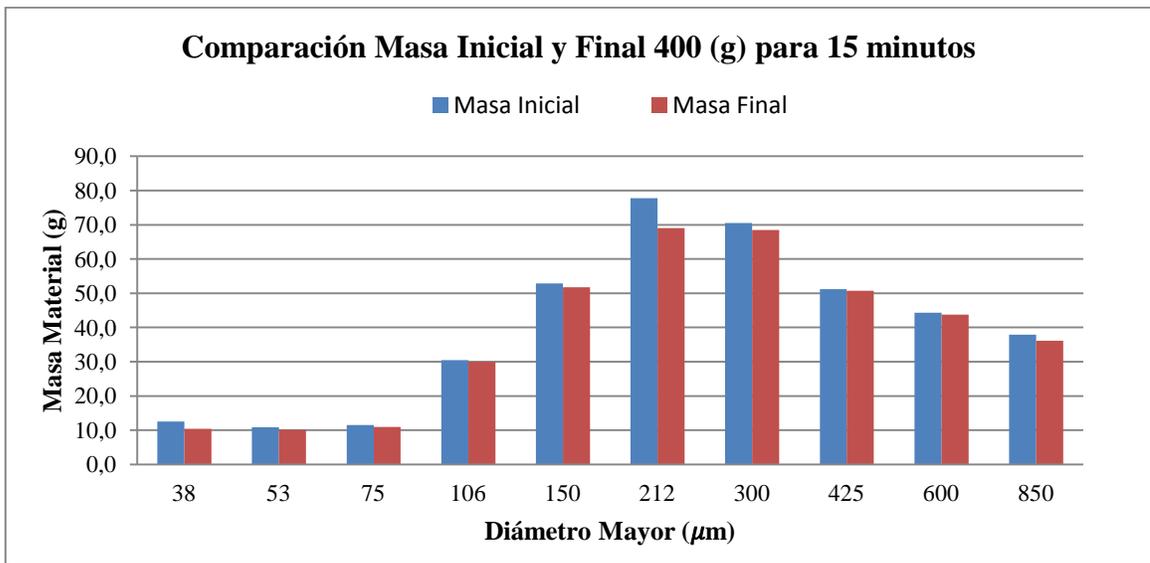


Figura 6.11: Comparación de material muestra de 400 gramos para medición de 15 minutos.

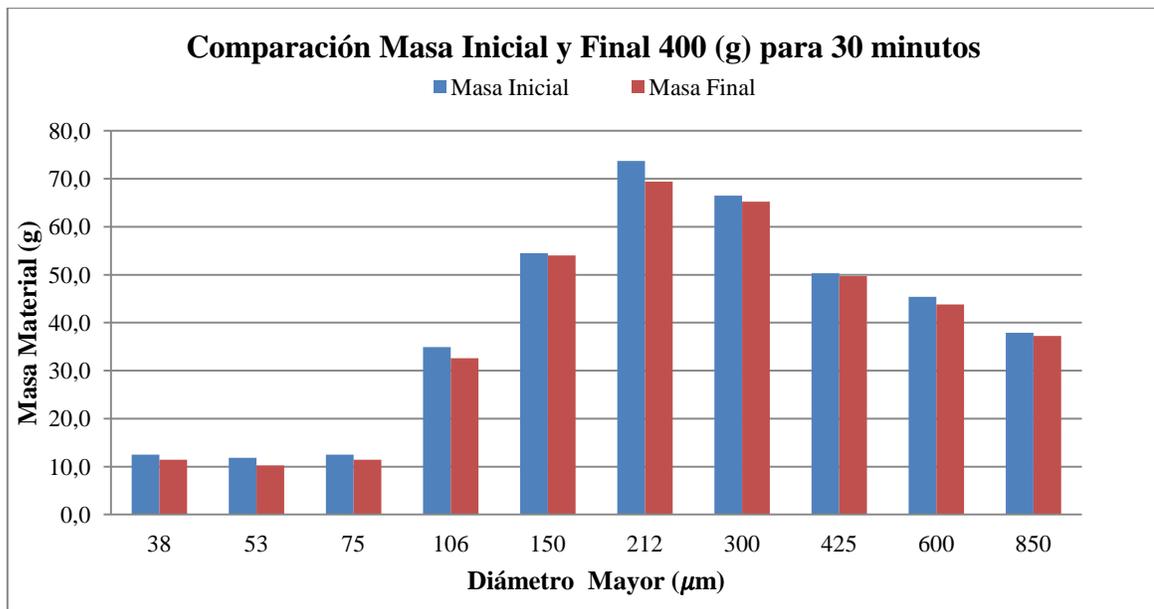


Figura 6.12: Comparación de material muestra de 400 gramos para medición de 30 minutos.

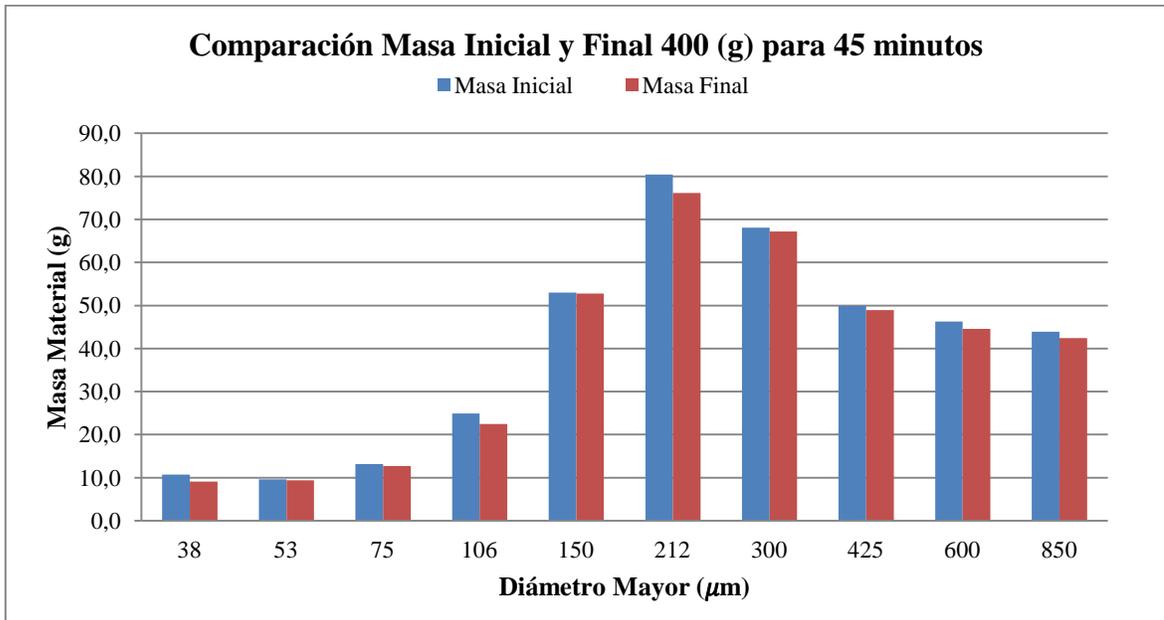


Figura 6.13: Comparación de material muestra de 400 gramos para medición de 45 minutos.

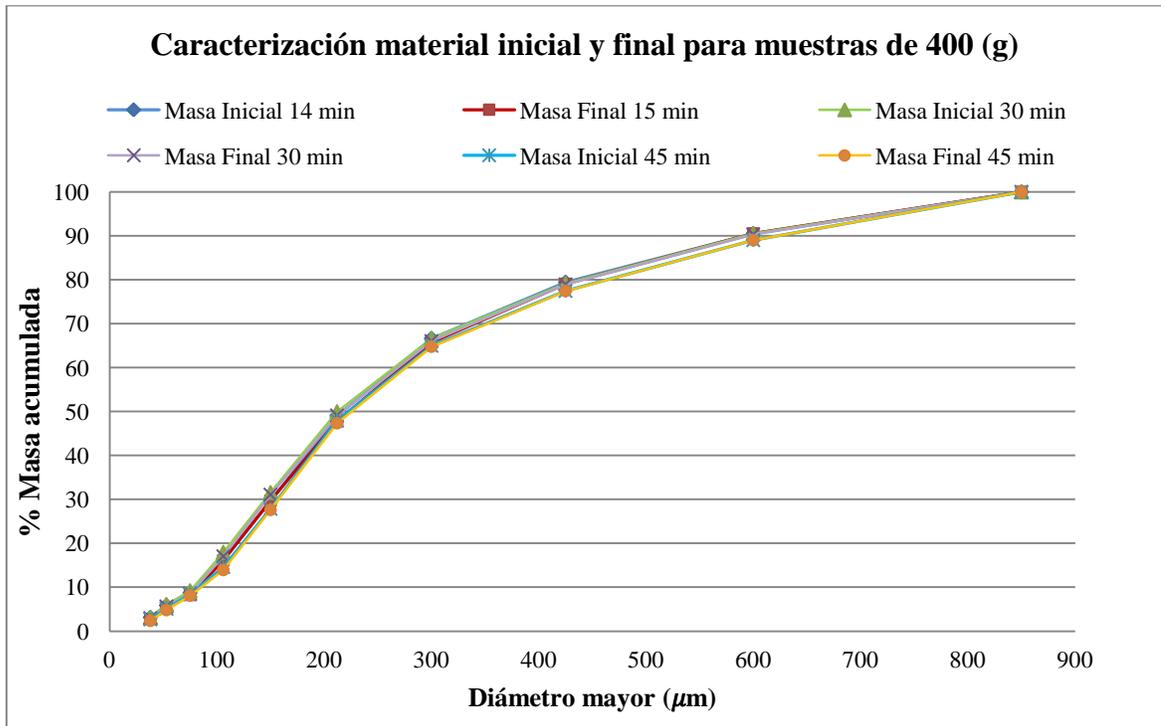


Figura 6.14: Caracterización de material inicial y final para muestra de 400 gramos.

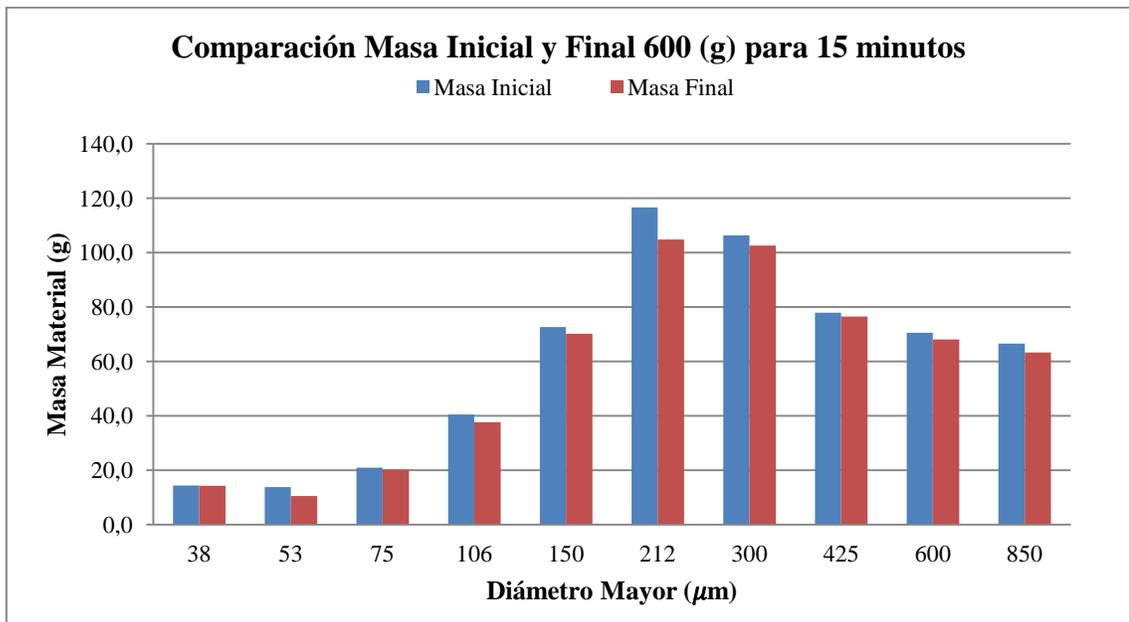


Figura 6.15: Comparación de material muestra de 600 gramos para medición de 15 minutos.

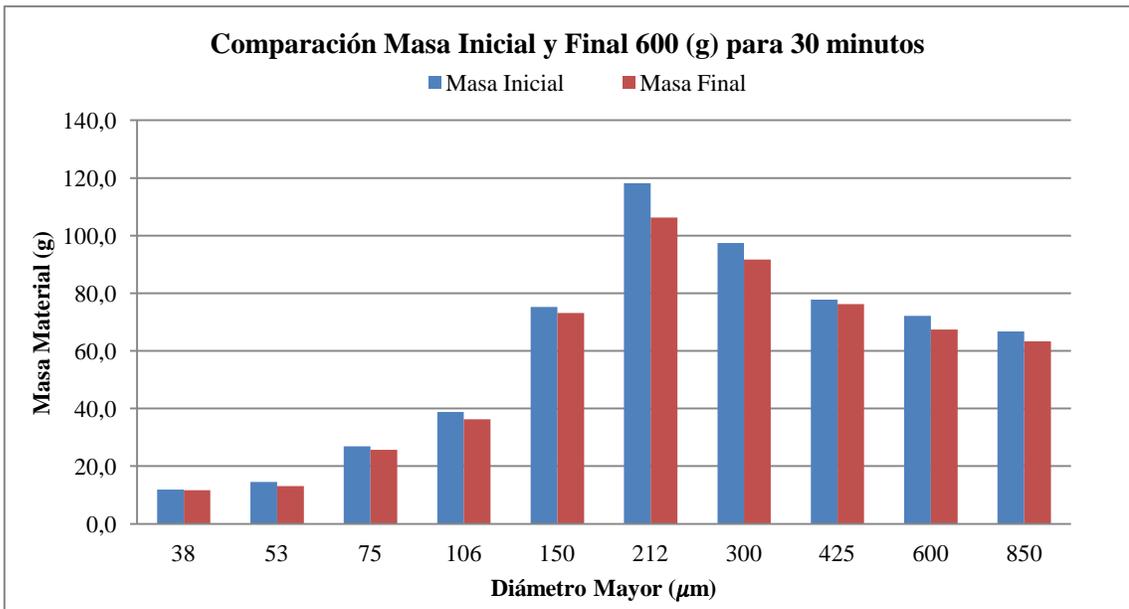


Figura 6.16: Comparación de material muestra de 600 gramos para medición de 30 minutos.

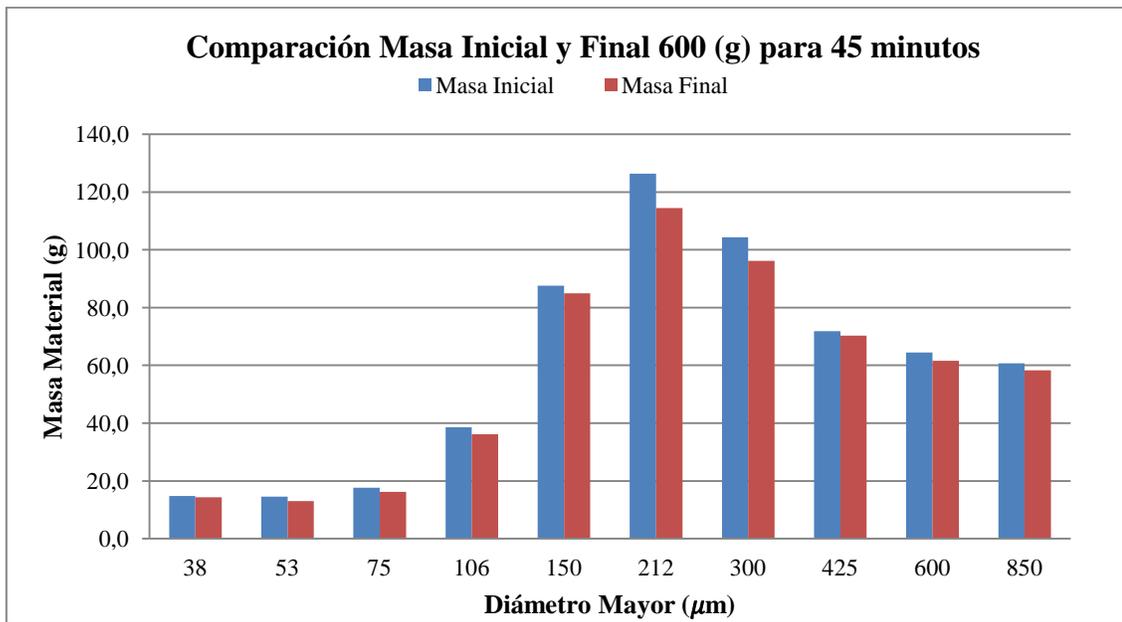


Figura 6.17: Comparación de material muestra de 600 gramos para medición de 45 minutos.

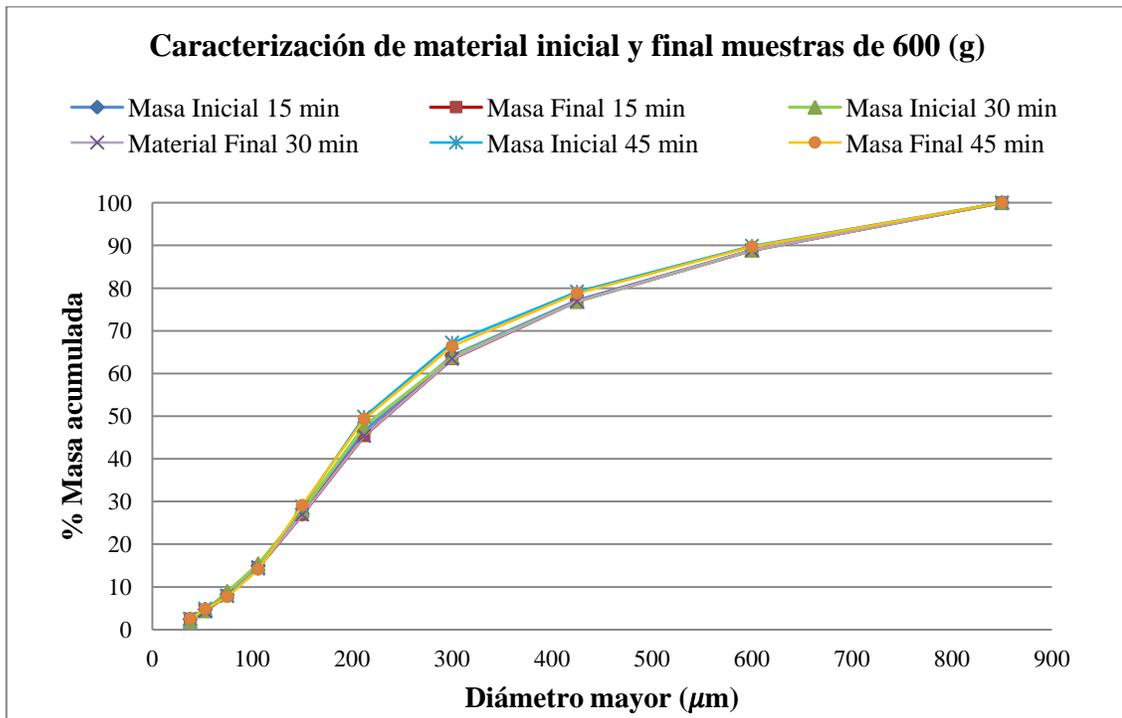


Figura 6.18: Caracterización de material inicial y final para muestra de 600 gramos.

6.1.1.3 Cálculo Efectividad

Para el cálculo de la efectividad del filtrado de material particulado se analiza la diferencia entre las masas iniciales y finales de cada una de las muestra en cada uno de los diámetros de partículas y el porcentaje de masa que retiene el agua.

Muestras de 100 gramos

En la Tabla 6.19 se muestran las diferencias de masas iniciales y finales, además del porcentaje de masa de material que retiene el agua en las muestras de 100 gramos para mediciones de 15, 30 y 45 minutos, respectivamente. De color rojo se muestran las eficiencias mínimas obtenidas en cada una de las mediciones y de color azul, las eficiencias máximas.

Tabla 6.19: Diferencia entre masas iniciales y finales, y porcentaje de material retenido en el agua para muestras de 100 gramos para cada uno de los tamaños de partículas en medición de 15, 30 y 45 minutos.

Diámetro mayor [μm]	15 minutos		30 minutos		45 minutos	
	Diferencia masas	% masa retenida	Diferencia masas [g]	% masa retenida	Diferencia masas [g]	% masa retenida
600	0,5	95,37	0,2	97,83	0,4	95,45
425	0,5	95,97	0,9	92,74	0,2	97,94
300	0,5	96,27	0,7	94,78	0,4	96,72
212	0,5	96,97	0,9	94,61	0,3	98,30
150	1,3	92,70	2,1	88,27	0,7	96,26
106	1,0	92,06	0,5	96,35	0,3	98,08
75	0,1	98,55	0,2	97,26	0,4	94,94
53	0,5	86,49	0,3	91,18	0,3	91,67
38	0,3	88,89	0,3	88,89	0,3	88,89
< 38	0,5	84,38	0,5	84,85	0,7	78,13

Muestras de 400 gramos

En la Tabla 6.20 se muestran las diferencias de masas iniciales y finales, además del porcentaje de masa de material que retiene el agua en las muestras de 400 gramos para mediciones de 15, 30 y 45 minutos, respectivamente. De color rojo se muestran las eficiencias mínimas obtenidas en cada una de las mediciones y de color azul, las eficiencias máximas.

Tabla 6.20: Diferencia entre masas iniciales y finales, y porcentaje de material retenido en el agua para muestras de 400 gramos para cada uno de los tamaños de partículas en medición de 15, 30 y 45 minutos.

Diámetro eje mayor [μm]	15 minutos		30 minutos		45 minutos	
	Diferencia masas [g]	% masa retenida	Diferencia masas [g]	% masa retenida	Diferencia masas [g]	% masa retenida
600	1,8	95,25	0,7	98,2	1,5	96,58
425	0,5	98,87	1,6	96,5	1,7	96,33
300	0,5	99,02	0,6	98,8	1,0	98,00
212	2,0	97,16	1,3	98,0	0,9	98,68
150	8,8	88,69	4,3	94,2	4,3	94,65
106	1,1	97,92	0,5	99,1	0,2	99,62
75	0,5	98,36	2,3	93,4	2,4	90,36
53	0,5	95,65	1,1	91,2	0,5	96,21
38	0,8	92,66	1,6	86,4	0,2	97,92
< 38	2,1	83,20	1,1	91,2	1,6	85,05

Muestras de 600 gramos

En la Tabla 6.21 se muestran las diferencias de masas iniciales y finales, además del porcentaje de masa de material que retiene el agua en las muestras de 600 gramos para mediciones de 15, 30 y 45 minutos, respectivamente. De color rojo se muestran las eficiencias mínimas obtenidas en cada una de las mediciones y de color azul, las eficiencias máximas.

Tabla 6.21: Diferencia entre masas iniciales y finales, y porcentaje de material retenido en el agua para muestras de 600 gramos para cada uno de los tamaños de partículas en medición de 15, 30 y 45 minutos.

Diámetro eje mayor [μm]	15 minutos		30 minutos		45 minutos	
	Diferencia masas [g]	% masa retenida	Diferencia masas [g]	% masa retenida	Diferencia masas [g]	% masa retenida
600	3,2	95,19	3,4	94,90	2,4	96,05
425	2,4	96,60	4,8	93,35	2,9	95,50
300	1,4	98,20	1,6	97,94	1,5	97,91
212	3,7	96,52	5,7	94,15	8,1	92,23
150	11,8	89,88	11,9	89,93	11,9	90,59
106	2,4	96,69	2,2	97,08	2,6	97,03
75	2,8	93,09	2,5	93,56	2,4	93,78
53	0,6	97,13	1,2	95,54	1,4	92,05
38	3,3	76,09	1,4	90,34	1,6	89,04
< 38	0,1	99,31	0,2	98,32	0,5	96,62

En las Figuras 6.19, 6.20 y 6.21 se muestran los porcentajes de eficiencia por tamaño de diámetro mayor de partículas para cada tiempo de medición.

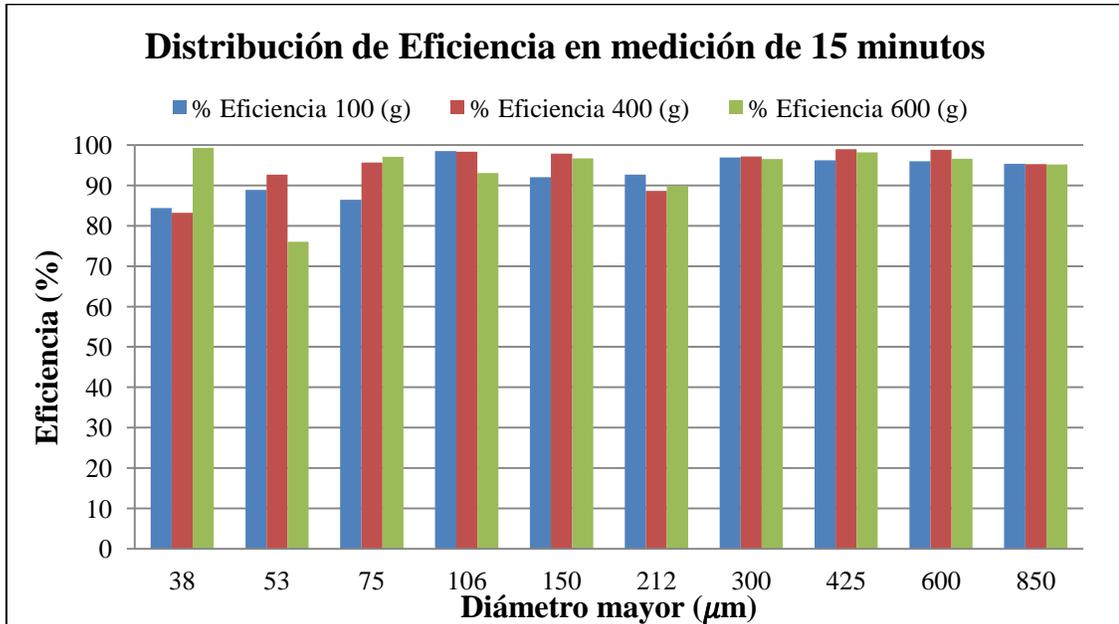


Figura 6.19: Distribución de Eficiencia por tamaño de diámetro mayor de partículas para medición de 15 minutos.

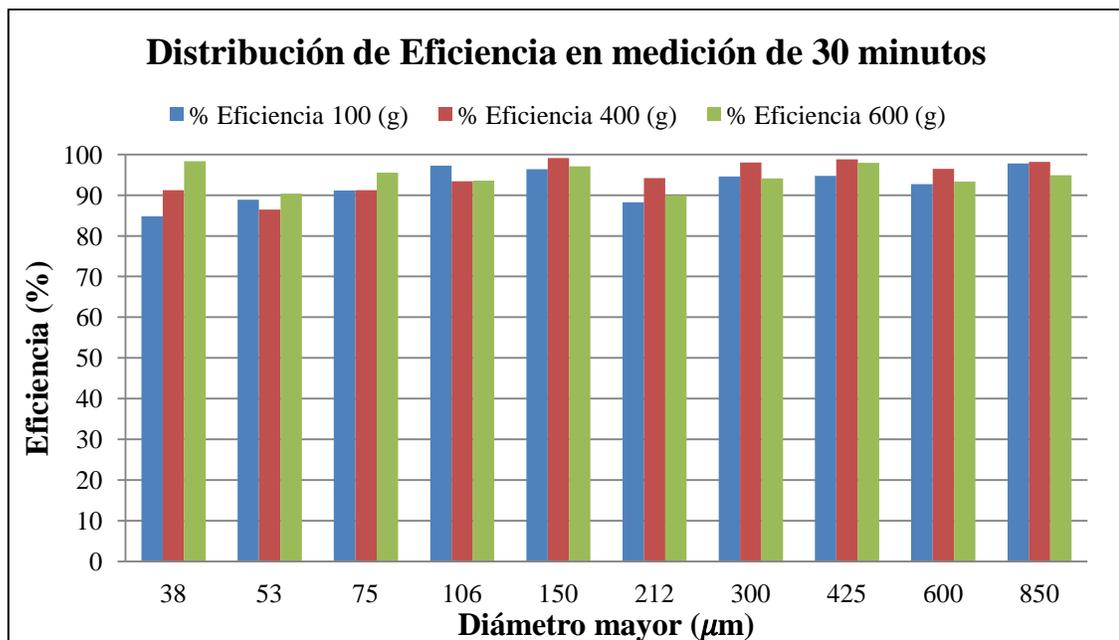


Figura 6.20: Distribución de Eficiencia por tamaño de diámetro mayor de partículas para medición de 30 minutos.

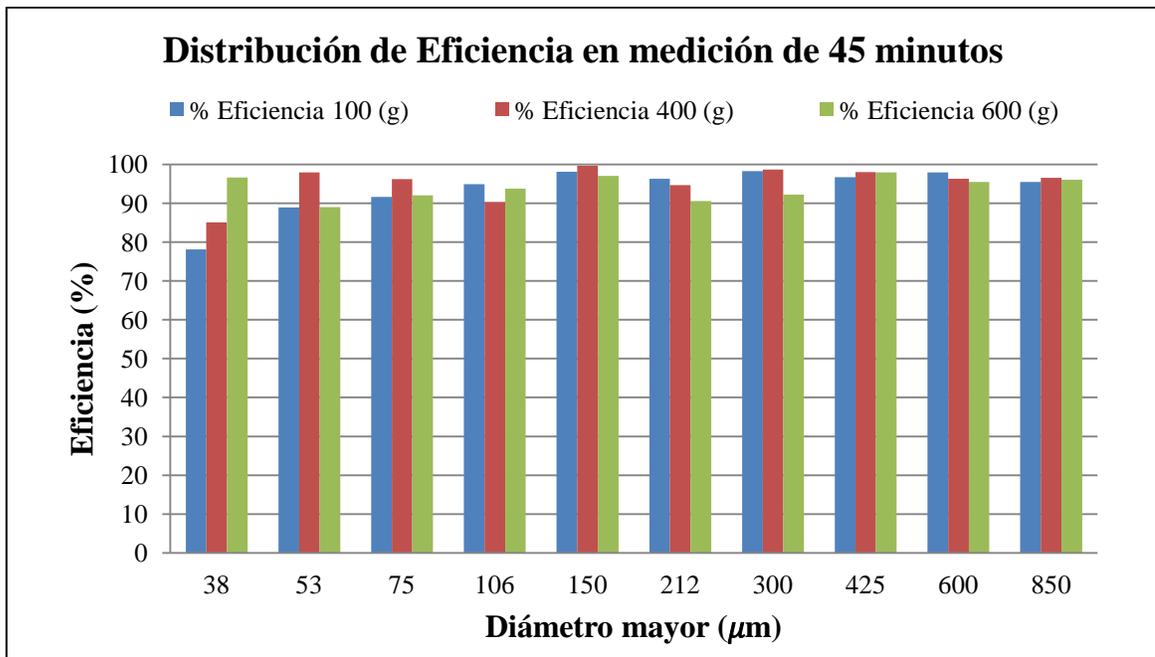


Figura 6.21: Distribución de Eficiencia por tamaño de diámetro mayor de partículas para medición de 45 minutos.

Como se puede ver en las Figuras 6.19, 6.20 y 6.21, el porcentaje de eficiencia para un diámetro de partículas de 38 [μm] aumenta en las muestras de 600 [g]. Esto se debe a que durante el tiempo de medición o durante el proceso de tamizado para la medición de masa final de la muestra, se genera una desintegración por roce de las partículas de material mayores a 38 [μm], por lo que se agregan a la masa de partículas de diámetro menor.

6.1.2 Efectividad del Filtrado de Gases

Para analizar la efectividad del filtrado de gases del flujo de aire que ingresa a la aspiradora, que contiene un estanque con un litro de agua, se realiza una gráfica agrupada para cada uno de los gases respecto al tiempo de medición, para así observar el comportamiento del gas en su paso por el agua del estanque durante el tiempo de medición.

La Figura 6.22 muestra la concentración del gas O_2 , para las mediciones sin ningún tipo de filtro y con filtro de agua (mediciones de 15, 30 y 45 minutos) con los datos obtenidos en las mediciones mostrados en el ítem 5.3.

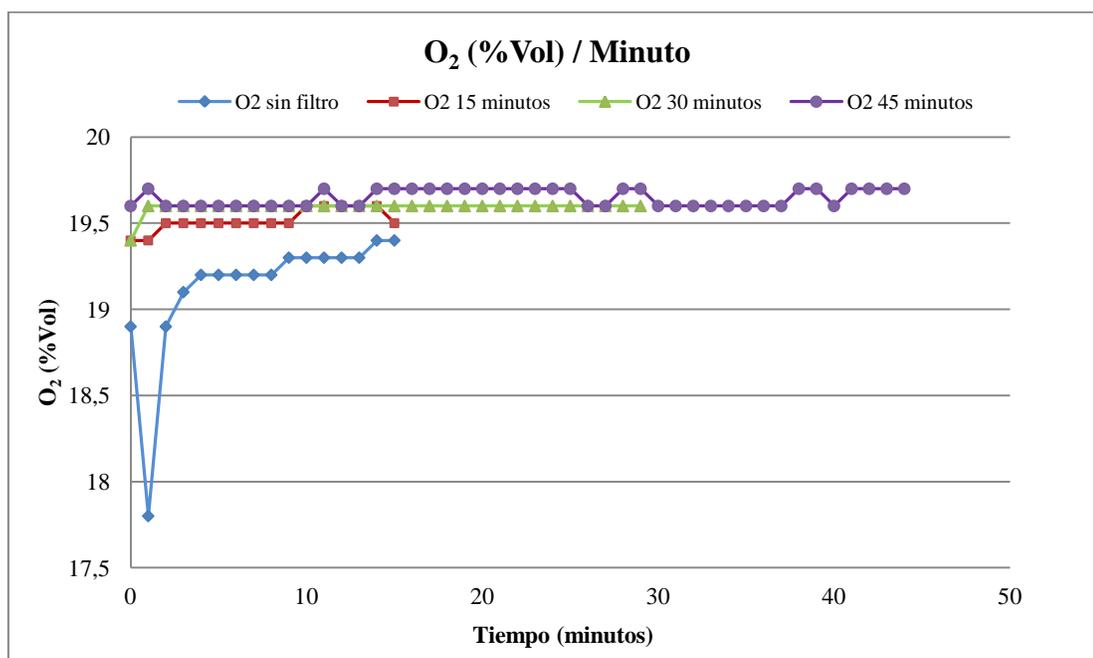


Figura 6.22: concentración del gas O_2 , para las mediciones sin y con filtro de agua (mediciones de 15, 30 y 45 minutos).

Como se puede ver en la Figura 6.22, la concentración de oxígeno tiene un aumento en la concentración en su paso por el agua del estanque en comparación a la curva obtenida sin filtro de agua durante 15 minutos.

En la Figura 6.23 se puede apreciar las concentraciones de monóxido de carbono de cada una de las mediciones en función del tiempo.

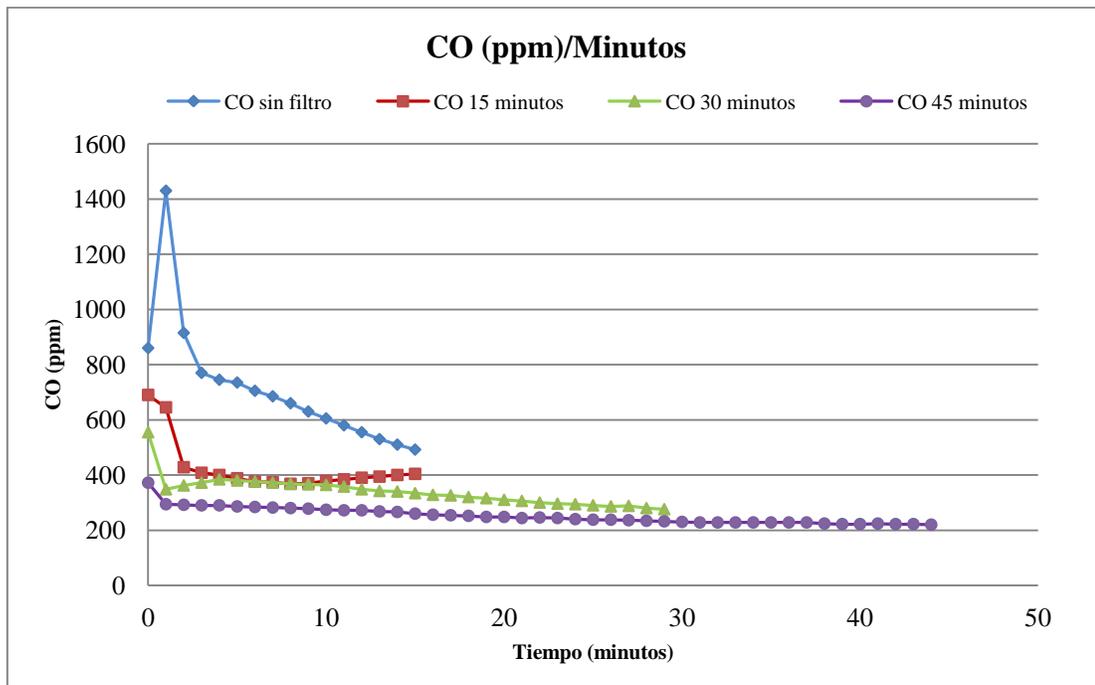


Figura 6.23: concentración del gas CO para las mediciones sin y con filtro de agua (mediciones de 15, 30 y 45 minutos).

Como se puede ver en la Figura 6.23, la concentración de monóxido de carbono disminuye al pasar por el agua del estanque en comparación con la curva obtenida sin el filtro de agua. Por lo tanto, se puede decir que el agua del estanque absorbe dicho gas.

La Figura 6.24, se observan las concentraciones de dióxido de carbono de cada una de las mediciones realizadas.

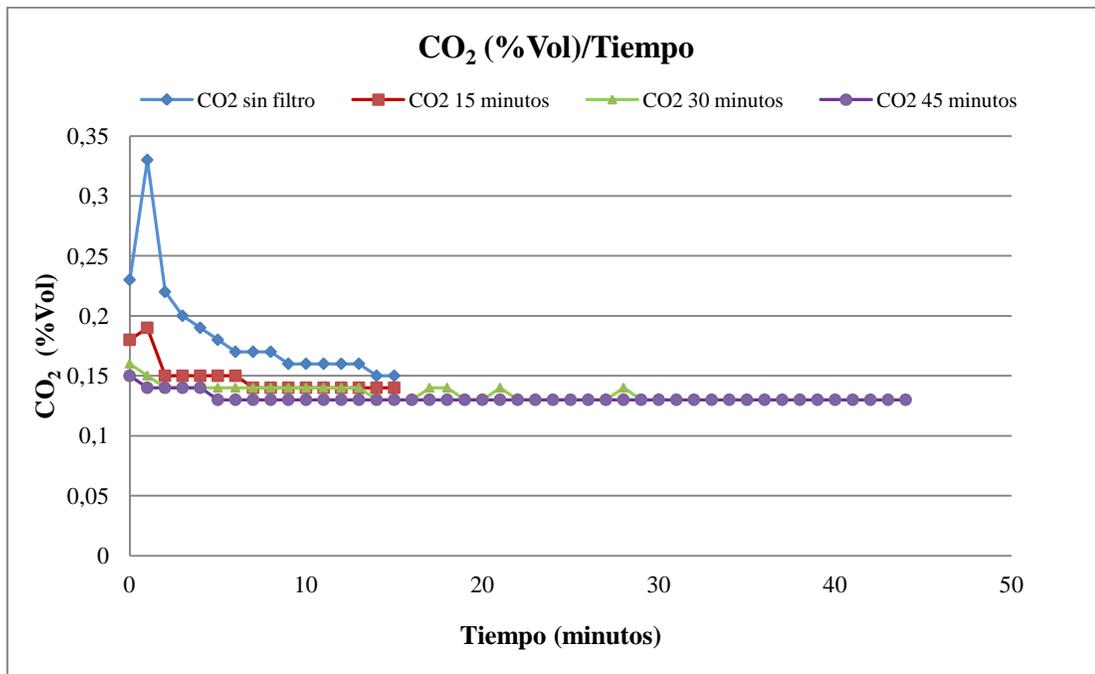


Figura 6.24: concentración del gas CO_2 , para las mediciones sin y con filtro de agua (mediciones de 15, 30 y 45 minutos).

Como se puede ver en la Figura 6.24, la concentración de dióxido de carbono disminuye en las mediciones con filtro de agua en comparación a la curva obtenida sin el filtro, por lo que se puede decir que el agua absorbe dióxido de carbono. En la curva correspondiente a la medición de 45 minutos, la concentración del dióxido de carbono se mantiene constante.

En la Figura 6.25, se muestran las concentraciones de dióxido nitroso en función del tiempo de medición.

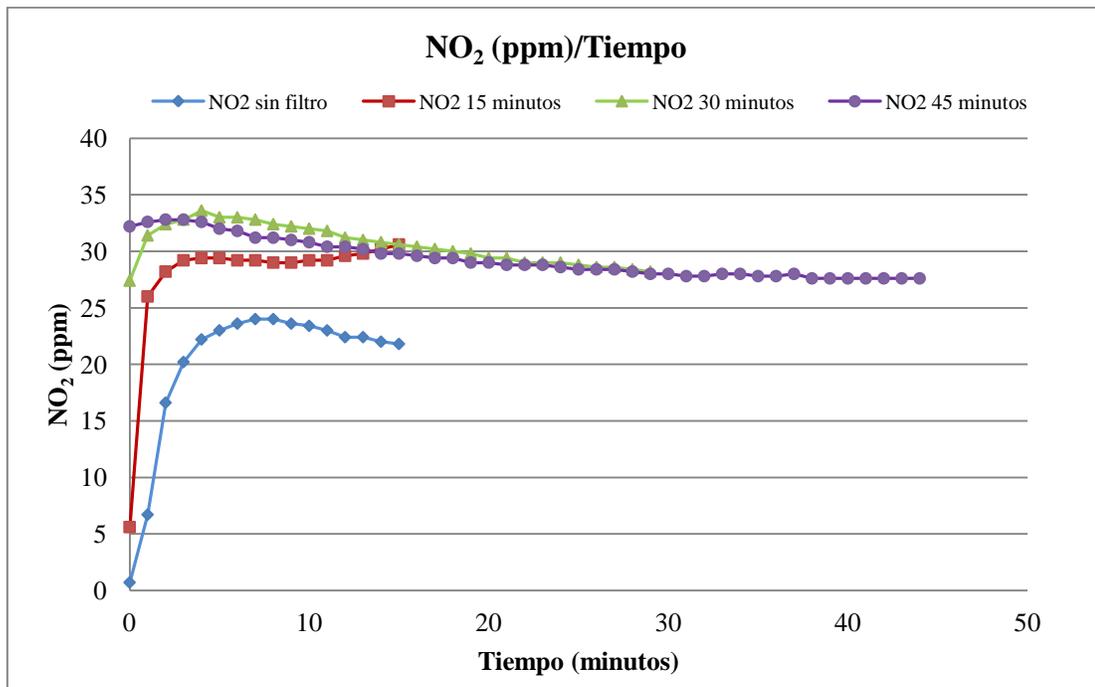


Figura 6.25: concentración del gas NO_2 para las mediciones sin y con filtro de agua (mediciones de 15, 30 y 45 minutos).

Como se puede observar en la Figura 6.25, la concentración del dióxido de nitrógeno aumenta en las mediciones con filtro de agua en comparación a la concentración de la curva obtenida sin dicho filtro. Dicho aumento se puede deber a que el tiempo de espera entre cada una de las mediciones fue el tiempo que tomo masar y limpiar el estanque de agua de la aspiradora y no se utilizó un instrumento que permitiera ventilar el ducto por el que circulan los gases al momento de la medición, por lo que las mediciones futuras se pudieron ver afectadas por la cantidad de gases que existen dentro del ducto. Además, las mediciones de gases fueron llevadas a cabo al aire libre, y no en un ambiente libre de agentes contaminantes, por lo que pueden existir alteraciones, pues el dióxido de nitrógeno es un gas de efecto invernadero, por lo que se encuentra presente en altas concentraciones en la atmosfera, especialmente en Santiago. Por último, cabe destacar que el dióxido de nitrógeno presenta una buena solubilidad en agua y además, como estipula la norma de calidad de agua potable NCH 409/1 [16], el agua potable debe contener como máximo 3[mg/L] de dicho gas, como consecuencia la solubilidad del NO_2 saliente del tubo de

escape en el agua utilizada se ve limitada pues ya existe una porción de este gas que ha reaccionado con el agua. Por consiguiente, la concentración del NO_2 es mayor a la obtenida en la medición de 15 minutos sin el filtro de agua.

De la curva correspondiente a la medición de 45 minutos, se puede apreciar que la concentración de dicho gas se mantiene constante por los últimos 7 minutos de la medición, por lo que el gas estaría estable.

Como conclusión de lo mostrado en las Figuras 6.23 y 6.24 se puede inferir que el agua utilizada como filtro en la aspiradora (1 [L]) absorbe monóxido y dióxido de carbono y no así, como lo muestra la Figura 6.25 el dióxido de nitrógeno, el que tiene un aumento en su concentración a través del paso del agua.

Para poder obtener concentraciones de gases fidedignas es necesario realizar un estudio sobre la influencia del tiempo de funcionamiento del vehículo y con ello obtener las concentraciones de gases del tubo de escape una vez estabilizado el motor, y con ello, realizar las mediciones ya descritas.

6.2 Dimensionamiento

En este ítem se revisa si el sistema de filtrado de la aspiradora puede ser llevado a nivel industrial. Para ello, se debe diseñar un esquema y analizar las relaciones de tamaños del estanque que contiene el agua respecto al volumen de agua contenido en el estanque y con el caudal que ingresa al sistema.

6.2.1 Diseño de estanque de agua

El esquema diseñado del sistema de filtrado en base al diseño del sistema de filtrado con el cual funciona la aspiradora se muestra en la Figura 6.26.

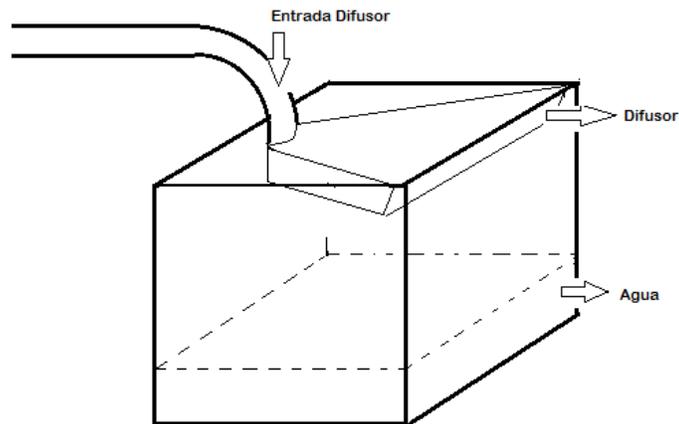


Figura 6.26: Diseño del sistema de filtrado para polvo y gases.

6.2.2 Relación de ancho, largo y altura de estanque respecto a volumen de agua

En base a las dimensiones del estanque de agua que contiene la aspiradora y al volumen de agua que contiene, se puede obtener una relación del ancho, largo y altura para nuevos estanques que contengan nuevos volúmenes de agua. Los volúmenes de agua de interés son de 10, 100 y 1000 litros.

Para encontrar las relaciones ya mencionadas, se utiliza el esquema de la Figura 6.27.

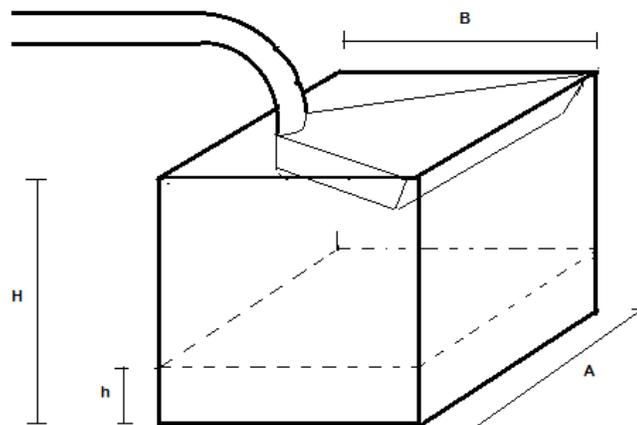


Figura 6.27: Esquema de estanque de agua utilizado para relaciones de tamaño respecto a volumen de agua.

Las dimensiones de estanque son las siguientes:

Ancho "A" = 22,3 [cm] = 0,223 [m]

Largo "B" = 18 [cm] = 0,18 [m]

Altura "H" = 14,5 [cm] = 0,145 [m]

En base a estas dimensiones y de que el volumen de agua que contiene el estanque original es de $V_{agua} = 1 \text{ [L]} = 0,001 \text{ [m}^3\text{]}$, se requiere encontrar la altura que ocupa el agua dentro del estanque.

De la relación $V_{agua} = A * B * h$, se obtiene que dicha altura es: $h = 0,025 \text{ [m]}$

Conociendo el valor de la altura "h", se puede establecer una relación con el ancho, el largo y la altura del estanque

- $\frac{A}{h} = \frac{0,223}{0,025} = 8,92$ entonces se tiene que, $A = 9h$
- $\frac{B}{h} = \frac{0,18}{0,025} = 7,2$ entonces se tiene que, $B = 7,2h$
- $\frac{H}{h} = \frac{0,145}{0,025} = 5,8$, entonces, $H = 5,8h$

Dado lo anterior y sabiendo que $V_{agua} = a * b * h$, el volumen de agua en función de la altura utilizada por el agua dentro del estanque es

$$V_{agua} = 64,8h^3 \quad (6.1)$$

En base a las relaciones encontradas se puede obtener una relación entre las dimensiones del estanque de agua total y la porción que ocupa el agua dentro del estanque, para los volúmenes de agua de interés (Ver Tabla 6.22).

Tabla 6.22: Dimensiones de estanque de agua y de porción de agua que ocupa el agua dentro del estanque para distintos volúmenes de agua.

$V_{agua} [L]$	$V_{agua} [m^3]$	$h [m]$	$A [m]$	$B [m]$	$H [m]$
1	0,001	0,025	0,223	0,18	0,145
10	0,01	0,054	0,483	0,39	0,311
100	0,1	0,116	1,040	0,83	0,670
1000	1	0,249	2,241	1,79	1,444

6.2.3 Relación de caudal respecto a volumen de agua

Se sabe que el caudal que ingresa a la aspiradora tiene un valor de $Q = 0,1097 [m^3/s]$, para un volumen de $V_{agua} = 0,001 [m^3]$, por lo que se puede establecer una relación para encontrar los volúmenes de agua para distintos caudales por una simple regla de 3. Los caudales de interés son de 1, 10 y 100 $[m^3/s]$ y los volúmenes de agua encontrados se muestran en la Tabla 6.23.

Tabla 6.23: Relación entre Caudal Q y volumen de agua utilizada en sistema.

$Q [\frac{m^3}{s}]$	$V_{agua} [m^3]$	$V_{agua} [L]$
0,1	0,001	1
1	0,009 = 0,01	10
10	0,09 = 0,1	100
100	0,9 = 1	1000

6.2.4 Relación dimensiones difusor con dimensiones de estanque de agua

Las dimensiones del difusor medidas son las siguientes:

- $a_1 = 0,213 [m]$
- $a_2 = 0,195 [m]$
- $h_2 = 0,03 [m]$

- $b = 0,094 [m]$
- $R = 0,01 [m]$

Conociendo los valores de A , B y H se pueden obtener relaciones con el largo, los anchos del difusor y la altura que éste debe tener, expresadas en relaciones porcentuales del tamaño total del estanque de agua. Dichas relaciones se muestran a continuación.

- $b = 0,5B$
- $a_1 = 0,96A$
- $a_2 = 0,87A$
- $h_2 = 0,21H$

Conociendo los valores de los anchos y la altura del difusor, se puede encontrar el área de la sección transversal de salida de éste. El área de la sección transversal de salida del difusor se encuentra con la suma de las áreas del rectángulo y del triángulo, que se muestra en la Figura 6.28 en función de los parámetros ya mencionados.

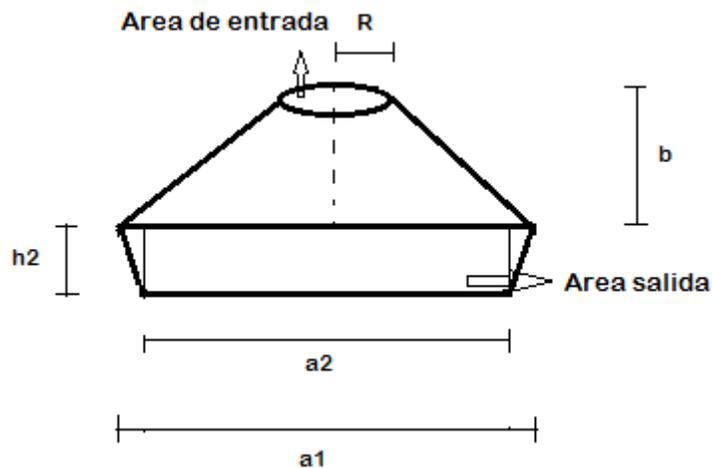


Figura 6.28: Esquema de las dimensiones consideradas para cálculo de la sección transversal de la salida del difusor.

Reduciendo los términos de la suma de las aéreas, la expresión para el cálculo del área de la sección transversal es

$$A_{salida} = h_2(a_1 + a_2)/2 \quad (6.2)$$

Como el caudal de entrada a la aspiradora es conocido, y también se conocen las dimensiones del difusor, se puede establecer una relación entre las aéreas de sección transversal de entrada y de salida del difusor, como se muestra a continuación.

- $\frac{A_{entrada}}{A_{salida}} = \frac{0,0003}{0,0064} = 0,05$, entonces $A_{entrada} = 0,05A_{salida}$

Conociendo el valor del área transversal de entrada del difusor se puede calcular el radio de entrada al difusor, mediante la siguiente expresión:

$$A_{entrada} = \pi R^2 \quad (6.3)$$

En la Tabla 6.24 se muestran los valores obtenidos mediante los cálculos para cada uno de los volúmenes de agua de interés.

Tabla 6.24: Dimensiones del difusor por el que circula el flujo de aire que ingresa al sistema, antes de ingresar al agua del estanque.

$V_{agua} [m^3/s]$	$b [m]$	$a_1 [m]$	$a_2 [m]$	$h_2 [m]$	$Area_{salida} [m]$	$Area_{entrada} [m]$	$R [m]$
0,001	0,094	0,213	0,193	0,03	0,006	0,0003	0,01
0,01	0,195	0,464	0,420	0,07	0,029	0,0014	0,02
0,1	0,415	0,998	0,905	0,14	0,134	0,0067	0,05
1	0,895	2,151	1,950	0,30	0,622	0,0311	0,10

Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones

Se realizó un estudio de una aspiradora comercial que posee un filtro de agua (un litro de agua) para analizar su funcionamiento. En el estudio, se realizaron mediciones de caudal en tres sistemas: sin filtro de agua ni filtros de esponjas, solo con filtro de agua y con todos los filtros disponibles. Utilizando la aspiradora comercial como sistema de filtrado, se construyó un montaje que permitiera cuantificar y filtrar material particulado y otro para la cuantificación y filtrado de gases. En el caso del montaje para el filtrado de material, se incorporó un sistema automatizado de ingreso de material, y en el caso del montaje para el filtrado de gases se utilizó un automóvil como fuente emisora de gases.

Con la mediciones realizadas en el sistema de filtrado de material particulado, se obtuvo como resultado que el litro de agua utilizado es capaz de capturar grandes cantidades del material ingresado. La eficiencia mínima obtenida en las mediciones es de 76,09% para partículas entre 38 y 53 $[\mu\text{m}]$ de diámetro en la medición de 15 minutos con una muestra de 600 [g] y la eficiencia máxima es de 99,6% para partículas entre 150 y 106 $[\mu\text{m}]$ de diámetro en la medición de 45 minutos con una muestra de 400 [g].

En el caso del sistema de filtrado de gases, se puede inferir como resultado que el litro de agua utilizado absorbe monóxido y dióxido de carbono, observándose que la concentración de dióxido de carbono se mantiene estable en 0,13[% Vol] en la medición de 45 minutos. También en la medición de 45 minutos, se pudo observar que el gas dióxido de nitrógeno tiene un aumento en su concentración al comparar la concentración inicial (sin filtro e agua) con la concentración final, sin embargo, se observó que la concentración de este gas se mantiene estable a los 27,6 [ppm].

Como recomendación para el estudio del filtrado por agua de material particulado, se debe realizar las mediciones con muestras de material con la misma masa por diámetro de partículas en cada una de las tres muestras de 100 [g], 400 [g] y 600 [g], para analizar que ocurre con la eficiencia en los tiempos de medición. Además, se debe incluir una muestra mayor a los 600 [g] de material para observar la saturación del litro de agua que utiliza la aspiradora para realizar el filtrado.

Para el caso del sistema de filtrado de gases, se debe realizar un estudio sobre la influencia del tiempo de funcionamiento del vehículo antes de realizar las mediciones. Además, se debe realizar un estudio más profundo que considere los componentes que contiene el agua potable antes y después de la medición, para poder comparar las concentraciones de gases iniciales y las que absorbe el agua después de las mediciones. Otra recomendación es realizar el estudio con aguas utilizadas en mineras debido a la dureza del agua es distinta a la utilizada en este trabajo, para ver cómo influye la absorción de gases en dichas aguas.

Referencias

- [1] Instituto de Salud Pública, Ministerio de Salud, Gobierno de Chile. Definición de Contaminación Ambiental (En Línea). [Fecha de Consulta: 02 de Octubre 2014]. Disponible en: <<http://www.ispch.cl/contaminacion-ambiental>>.
- [2] Ubilla Thompson, Patricio. Ingeniería en Ventilación y Filtración de Aire. Segunda Edición. 2012.
- [3] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Origen y daños que causa monóxido de carbono (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43796.html>>.
- [4] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Origen de ozono (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43792.html>>.
- [5] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Actividades que generan ozono (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43794.html>>.
- [6] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Como contamina el plomo el aire (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43806.html>>.
- [7] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Efecto del plomo en la salud humana (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43788.html>>.
- [8] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Definición de PM10 (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43790.html>>.
- [9] Registro de Emisiones y Transferencias de contaminantes, Ministerio de Medio Ambiente. Como Origen PM10 (En línea). [Fecha de consulta: 02 octubre 2014]. Disponible en <<http://www.mma.gob.cl/retc/1279/article-43791.html>>.
- [10] Manual “Modo de empleo” Aspiradora Thomas GENIUS S1 Aquafilter.
- [11] Norma ANSI/ASHRAE STANDARD 51-1985. Laboratory Methods of Testing Fans for Rating. Air Movement and Control Association, Inc. y American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1986
- [12] PAGE. C.H. and VIGOUREUX. P. The International System of Units (SI), National Bureau of Standards. NBS Special Publication 330. 1972.

[13] HELANDER L., Viscosity of Air, Memorandum Report to AMCA 210/ASHRAE 51P Committee, January 11, 1973.

[14] WebSite ARDUINO (En Línea). [Fecha de consulta: 11 diciembre 2014]. Disponible en <<http://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560.html>>.

[15] Manual técnico Analizador de Gases Dräger X-am 5600.

[16] Norma Calidad de Agua Potable NCH 409/1 (En Línea). Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas. [Fecha de consulta: 30 de marzo 2015]. Disponible en: <<http://www.doh.gob.cl/APR/documentos/Documents/Normas%20NCh%20409%20Calidad%20y%20Muestreo%20del%20Agua%20Potable%20EEO.pdf>>