



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULAS DE PLOMO EN UN  
SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL**

**Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez**

Asesorado por el Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULAS DE PLOMO EN UN  
SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ESTUARDO GARIBALDI VELÁSQUEZ MARTÍNEZ**

ASESORADO POR EL ING. GILBERTO ENRIQUE MORALES BAIZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. José Francisco Arrivillaga Ramazzini
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULAS DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 28 de febrero de 2014.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez', is written over a faint circular stamp or watermark.

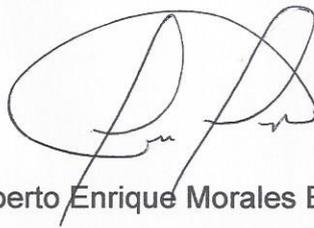
**Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez**

Guatemala, 04 de julio de 2017

Ingeniero  
Roberto Guzmán Ortiz  
Director Escuela Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero, por medio de la presente, le informo que he revisado y leído el contenido completo, del trabajo de graduación del estudiante Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez, con carne 2003-12788; el cual contienen el tema "DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTICULAS DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICION ARTESANAL".

Atentamente.



Gilberto Enrique Morales Baiza  
Ingeniero Mecánico

*Gilberto Enrique Morales Baiza*  
INGENIERO MECANICO  
COLEGIADO No. 5,190



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.059.2019

El Coordinador del Área de Diseño de Ingeniería de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULAS DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL** desarrollado por el estudiante **Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez**, CUI **1974473840101**, Registro Académico **200312788** recomienda su aprobación.

**"Id y Enseñad a Todos"**

Ing. Julio César Campos Paiz  
Coordinador Área de Diseño  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, marzo 2019



**USAC**

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.083.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULAS DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL** desarrollado por el estudiante **Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez**, CUI 1974473840101, Registro Académico 200312788 y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

Ing. Julio César Campos Paiz

Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, marzo de 2019

/aej

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.166.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTICULAS DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL** presentado por el estudiante: **Estuardo Garibaldi Velásquez Martínez** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, Marzo de 2019

/echm

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser el mejor guía en mi camino y regalarme sabiduría para culminar mi carrera.
<b>Mis padres</b>	Egberto Eduardo Velásquez (q. e. p. d.) y América Lorena Martínez de Velásquez, porque junto con Dios me dieron el don de la vida. Son los ángeles para guiar mis pasos. Gracias por todo su amor, comprensión y apoyo.
<b>Mi esposa</b>	Alba Lucía Ávila Oliva, por todo su amor, confianza y por ser mi mejor amiga. Te amo.
<b>Mis hermanos</b>	Selvyn Eduardo y Claudia Lorena Velásquez, por ser las personas que Dios me regaló para vivir los momentos más alegres y tristes de mi vida. Por ser ese pilar importante en mi vida. Los quiero.
<b>Mis tías</b>	Por su cariño y apoyo.
<b>Mis primos</b>	Con todo respeto y cariño.
<b>Mi cuñada</b>	María Fernanda Sánchez, por ser parte de esta familia.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la casa de estudios donde se forjan los hombres y mujeres del mañana.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por abrirme las puertas y adquirir todos los conocimientos como profesional con los mejores catedráticos.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por los momentos compartidos y hacer de la universidad de los momentos más agradables de mi vida.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza, por hacer posible este proyecto, por todo su apoyo, ayuda profesional y gran don de educador. Mi más sincera admiración y respeto.
<b>Ing. Julio César Campos</b>	Por todo su apoyo a lo largo de mi carrera.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN .....	XIII
1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE FUNDICIÓN .....	1
1.1. Fundición artesanal de los metales .....	1
1.2. Proceso de reciclado de chatarras .....	3
2. RECUPERACIÓN ARTESANAL DEL PLOMO .....	5
2.1. El plomo.....	5
2.2. Obtención del plomo.....	6
2.3. Fundición artesanal del plomo y su uso .....	8
2.3.1. Usos del plomo .....	9
3. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR FUNDICIÓN DE PLOMO .....	11
3.1. El efecto de la contaminación.....	11
3.2. Consecuencias ambientales.....	13
3.3. Consecuencias con el personal.....	14
3.4. Equipo de seguridad industrial .....	18

4.	DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULA DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL .....	21
4.1.	Diseño de campana de extracción .....	21
4.2.	Parámetros de referencia .....	25
5.	DISEÑO FUNCIONAL DEL DISPOSITIVO.....	31
5.1.	Boca de aspiración.....	31
5.2.	Diseño del ducto .....	34
5.3.	Diseño del ciclón .....	39
5.4.	Selección del sistema de filtros .....	52
5.5.	Selección del impulsador .....	59
6.	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	65
6.1.	Consideraciones del diseño .....	65
6.2.	Diseño de la estructura de soporte .....	66
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES .....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	APÉNDICES.....	77
	ANEXOS.....	81

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Horno para fundición artesanal .....	2
2.	Diagrama de bloques del diseño de campana .....	25
3.	Campana o boca de aspiración.....	34
4.	Diseño del ducto .....	36
5.	Detalle de acoplamiento de la campana de aspiración .....	37
6.	Ángulos de los ductos .....	38
7.	Distribución porcentual de diámetros en las partículas del humo de soldadura .....	41
8.	Eficiencia vs. diámetro de partículas captadas en ciclones.....	42
9.	Parámetros topológicos de los ciclones .....	43
10.	Dimensiones del ciclón.....	45
11.	Curva de predicción de la eficiencia para el ciclón.....	47
12.	Eficiencia de captación del ciclón.....	49
13.	Curva de alta eficiencia versus curva del ciclón diseñado .....	50
14.	Curva de eficiencias del prefiltro .....	53
15.	Caída de presión en función del caudal para el prefiltro .....	54
16.	Eficiencia del ultrafiltro .....	56
17.	Curva de caída de presión en función del caudal para el ultrafiltro .....	58
18.	Curva de simulación del sistema de filtración .....	59
19.	Curva del sistema.....	61
20.	Curva del sistema y del impulsor .....	62
21.	Curvas de potencia y eficiencia para el impulsor .....	64
22.	Disposición final de los componentes del extractor.....	66

23.	Estructura de soporte para el extractor de humos .....	67
24.	Detalles de sujeción de los elementos de extractor .....	68
25.	Extractor completo renderizado 1 .....	68
26.	Extractor completo renderizado 2 .....	69

## TABLAS

I.	Valores típicos de flujo de aire para algunos sistemas de extracción localizada.....	23
II.	Rango de velocidades de captura.....	26
III.	Coeficientes de pérdida típicos para ductos flexibles .....	27
IV.	Medidas de desempeño para dispositivos de limpieza de aire .....	29
V.	Cálculos finales del diseño de la campana o boca de aspiración de aire con partículas de plomo .....	33
VI.	Composición elemental promedio del material particulado en el humo de soldadura .....	41
VII.	Eficiencia de captación del ciclón .....	48
VIII.	Cálculos para el diseño operativo .....	51
IX.	Eficiencia global del sistema de filtración.....	57
X.	Caída de presión en función del caudal para el sistema.....	60
XI.	Datos técnicos del impulsor .....	62
XII.	Cálculos de potencia y eficiencia del impulsor.....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>dl</b>	Decilitro
<b>°C</b>	Grados centígrados, escala de temperatura
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit, escala de temperatura
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>μ</b>	Micro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>“</b>	Pulgada
<b>Q.</b>	Quetzal, unidad monetaria de Guatemala



## GLOSARIO

<b>ASHRAE</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Americana de Ingenieros de Refrigeración y Aire Acondicionado de Calefacción.
<b>AWS</b>	Siglas en inglés de la Sociedad Americana de Soldadura.
<b>Crisol</b>	Recipiente refractario usado para fundir o calcinar materiales a altas temperaturas.
<b>pH</b>	Coeficiente que indica el grado de acidez de una solución acuosa o del agua.
<b>PVC</b>	Son las siglas de <i>Polyvinyl Chloride</i> , que significa policloruro de vinilo y es un material termoplástico.
<b>Reciclado</b>	Material usado y sometido a un proceso de transformación que le devuelve sus condiciones iniciales para que pueda ser nuevamente utilizado.



## RESUMEN

Hay un gran número de fundidoras artesanales de plomo en Guatemala, ya sea que estén autorizadas o que operen clandestinamente, generalmente no cumplen con algunas especificaciones de seguridad.

El proceso de fundición genera partículas que contaminan el medio ambiente y afectan la salud de las personas que estén expuestas a la emisión de dichas partículas, aunque no intervengan directamente en el proceso. Una forma de reducir dicha contaminación es diseñando un extractor de partículas adecuado para el proceso de fundición de plomo.

El extractor de partículas está diseñado con una boca de aspiración, un ducto integrado por dos tubos, acoplamientos y ductos flexibles corrugados, un ciclón, un sistema de filtrado de doble fase y un impulsor.

De acuerdo al diseño la boca de aspiración se encarga de absorber el humo resultante del proceso de fundición de plomo, que se conecta a un ducto por medio de un acoplamiento. El ducto es el que transporta el aire a un ciclón, que es el que retiene las partículas pesadas de mayor diámetro y permite el paso del humo resultante al sistema de filtrado de doble base. Dentro de este sistema se coloca un prefiltro, que es el que retiene el porcentaje mínimo de las partículas pesadas que no haya captado el ciclón y las partículas medias; también se coloca un ultrafiltro, que se encarga de retener las partículas ultrafinas, para que finalmente el aire expulsado al ambiente esté libre de partículas contaminantes y pueda ser respirable sin dañar la salud de las personas.



# OBJETIVOS

## General

Diseñar un extractor de partículas de plomo en un sistema de fundición artesanal.

## Específicos

1. Identificar las variables que afectan en la contaminación ambiental en el proceso de la fundición de plomo.
2. Elaborar un listado de equipo de protección personal para mejorar las condiciones de trabajo de los operarios que se dedican a la fundición de plomo.
3. Diseñar un extractor de humo para purificación del mismo a la hora de ser expulsado al medio ambiente.



## INTRODUCCIÓN

En Guatemala la fundición de plomo es muy común y es realizada por las empresas que se dedican a la recolección y aprovechamiento de chatarras, utilizándolas como materia prima para la fabricación de piezas. Estas empresas deben analizar diversos factores del elemento, tales como la toxicidad del plomo y su impacto en la contaminación del medio ambiente, ya que durante la fundición suelta partículas sólidas en el humo o gas, que se expanden libremente al ambiente. Además, toda la chatarra utilizada es desechada a granel, en diferentes vertederos del país o bien es mezclada con tierra y depositada en diferentes lugares.

Las empresas que procesan este elemento desconocen las formas de prevención de la contaminación y generalmente no cuentan con sistemas de ventilación adecuados. Esto incrementa el riesgo de afectar la salud de las personas que tratan directamente con plomo, quienes pueden contraer enfermedades de la piel y de la sangre.

Lo anteriormente expuesto indica que es importante el mejoramiento de los procesos de fundición de plomo, para una mejora continua de la producción sin afectar tanto a operarios como al medio ambiente. En la actualidad son pocas las empresas que cuentan con un sistema de limpieza para una producción más limpia y con sistemas de seguridad industrial y de higiene para todo su personal.

En el presente trabajo se analizan los principios fundamentales de la fundición de metales, se diseña y construye un sistema de extracción de partículas de plomo durante la fundición, con base en estudios que coadyuven a la disminución de todas esas partículas que pueden ser dañinas para el medio ambiente y para las personas que trabajan cerca de los lugares de las procesadoras proporcionándose una mejor calidad de aire.

# 1. GENERALIDADES DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

La fundición de metales puede darse por medio de procesos industriales o artesanales, específicamente para el plomo en Guatemala es más común la fundición artesanal. Este proceso forma parte del sistema de reciclado de chatarras y aunque el reciclado es un proceso que surge con el fin de disminuir la contaminación del medio ambiente, si los elementos no son procesados correctamente no se puede obtener el resultado esperado.

## 1.1. Fundición artesanal de los metales

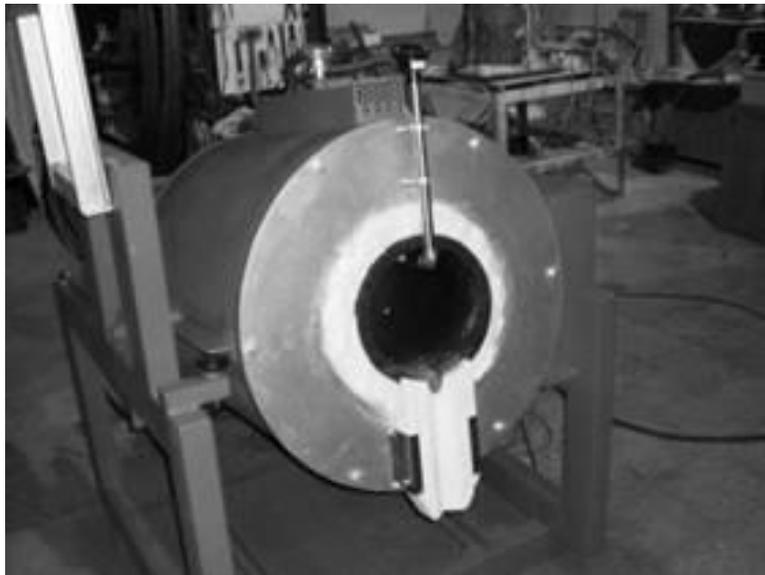
De acuerdo con Roberto Alejandro Aguilar Rivas, en su trabajo *El mecanismo de cierre de la vena fluida durante los ensayos de fluidez de aleaciones Al-Cu diluidas*, la fundición o vaciado es un proceso que se realiza muy a menudo con los metales. Este es utilizado para la realización de piezas o para uso de la industria en diversos procesos, debido a que el metal hoy en día, es parte importante en el diario vivir.

Esta es una de las grandes industrias a nivel mundial, ya que el metal reciclado es transformado en piezas de uso diario como vehículos, oficina, aviones y prensas hidráulicas, así como en las mismas fundidoras de metales. Dependiendo del uso al cual vaya a ser sometida la pieza fundida, así serán las características que el metal debe poseer.

La fundición como tal consiste en llevar un metal a cierta temperatura para volverlo a una forma líquida y que pueda ser vertida en una matriz o molde de

arena en la conformación de piezas. Para esto se utilizan hornos, ya sean de gas o eléctricos, de diferentes tamaños y con temperaturas ajustables.

Figura 1. **Horno para fundición artesanal**



Fuente: *Horno para fundición artesanal*. <https://www.google.com>. Consulta: 11 de octubre de 2018.

La fundición artesanal es uno de los trabajos que están en el día a día, porque casi todo lo que se usa lleva más de alguna pieza fundida, es por ello que existen muchos talleres pequeños, los cuales se dedican a la fundición artesanal, contando con hornos pequeños para este proceso.

El mayor problema identificado en la fundición artesanal de metales es que no se toman medidas de precaución adecuadas en la utilización de hornos. Estos hornos generalmente lanzan gases contaminantes, desechos y escorias al ambiente, que representan riesgos a la salud para el personal y para las personas que viven en los alrededores. Los extractores de partículas y el

equipo de personal individual para fundición son de las medidas que deben implementarse para reducir o incluso eliminar los riesgos asociados a la utilización de estos hornos.

## **1.2. Proceso de reciclado de chatarras**

Algunos conceptos como ecología, protección del medio ambiente, aprovechamiento de recursos y reciclado de materiales, son parte de la cultura medioambiental que se está promoviendo para alcanzar el desarrollo sostenible, no solo en Guatemala sino en el mundo entero.

El reciclado es una actividad que es implementada más comúnmente en el sector industrial porque, además de colaborar en la conservación del medio ambiente, es rentable económicamente y da una buena imagen de las empresas.

La mayoría de los metales existentes son capaces de ser fundidos y volver a ser utilizados creando metales como aluminio, plomo, hierro, acero, antimonio, cobre, bronce y un sinnúmero de aleaciones procedentes de diversos metales, estos a su vez, a la hora de ser fundidos, pueden tomar nuevas formas o retomar las formas anteriores.

Hoy en día el hierro es uno de los metales más fundidos debido a sus múltiples aplicaciones. También el aluminio ha incrementado su fundición en el proceso de reciclado de latas y ha demostrado ser mucho más rentable que su extracción, ya que los yacimientos o lugares de donde se extraen los materiales puros necesitan de una gran inversión y a su vez de explotación de tierra.

El proceso de reciclado tiene un nivel de inversión más bajo que el de extracción, colabora con el medio ambiente y es una forma más limpia de producir un metal a bajo costo.

Actualmente el reciclado de metales en Guatemala es muy rentable y cuenta con diversas recicladoras a nivel nacional. Las recicladoras son empresas que se dedican a la recolección de chatarra que es utilizada como materia prima en el proceso de reciclado.

Cada recicladora puede operar de diferente forma para recolectar la chatarra. Hay algunas que compran chatarra proveniente de vertederos del país, hay otras que compran materiales reciclables directamente de las empresas industriales que las generan, mientras que hay otras que abren sus propios centros de recolección, en donde cualquier persona o empresa puede llevar sus materiales de reciclaje y de acuerdo a su peso se da el proceso de compra / venta.

En las recicladoras, la chatarra o material reciclable es clasificada según su composición antes de que sea procesada. Se separa el metal, dependiendo de si es hierro fundido, hierro colado, aluminio, plomo, cobre, bronce, antimonio, etc., y aunque llegan a la recicladora en diferentes formas, el factor de clasificación es la composición. Al tener los metales clasificados, pueden someterse a otros procesos para librarlos de la mayor cantidad de impurezas, que puedan afectar el proceso de fundido o las propiedades del metal para el uso que se necesite.

## **2. RECUPERACIÓN ARTESANAL DEL PLOMO**

De los metales reciclables, el plomo es uno de los más fáciles de recuperar sin que pierda sus propiedades primarias, es decir, se puede reciclar infinidad de veces, sometiéndolo a procesos de fusión y afinado, obteniendo un producto con las mismas propiedades que las que se obtienen a partir del procesamiento de minerales.

### **2.1. El plomo**

Este es un elemento químico mostrado en la tabla periódica como Pb, su número atómico es 82 y su peso atómico 207,19. Este es un metal muy pesado, de color azulado, que se empaña para convertirse en un color gris mate. Este tiene un alto nivel de flexibilidad, inelástico y se funde con una gran facilidad a comparación de otros metales, a una temperatura de 327,4 °C y equivale a 621,3 °F, además hierve a 1 725 °C o bien a 3 164 °F.

El plomo tiene múltiples aplicaciones, se encuentra muy comúnmente en los acumuladores o también en las baterías que se utilizan en vehículos, aviones y otros tipos de transporte. Gracias a sus propiedades puede utilizarse como elemento de construcción de diferentes piezas, en soldaduras suaves, en municiones para armamentos, hasta en la fabricación de cables de cobre, por su baja conductividad, ayudando a que no exista fuga de energía en el cableado eléctrico. Como el plomo es resistente a la corrosión, también se utiliza en las terminales de plomo para baterías, así como en la fabricación y el manejo de ácido sulfúrico.

Al utilizar el plomo en conjunto con otros compuestos puede ampliarse su campo de aplicación, por ejemplo en catalizadores de gases de vehículos, fabricaciones de espumas de poliuretano, en pigmentaciones de pinturas y también en aceites lubricantes, el cual ayuda como un agente reductor en el desgaste de piezas de acero.

El plomo también es empleado como una pantalla protectora para máquinas de rayos x, ya que funciona como un blindaje contra la radiación al estar trabajando con este tipo de rayos.

Aunque este elemento es de gran utilidad, los compuestos del plomo son tóxicos y se ha producido una gran cantidad de envenenamiento a las personas que trabajan con este. Los casos de envenenamiento generalmente han sido por inhalación de los gases y de los polvos que suelta al momento de su fundición.

## **2.2. Obtención del plomo**

El plomo, al igual que todos los metales, se encuentra en yacimientos; por lo regular junto con el zinc, ya que los dos están asociados en los yacimientos minerales y es muy común encontrarlos mezclados uno con el otro. Aunque pueden encontrarse yacimientos con elementos los suficientemente separados como para que puedan extraerse minerales en los que predomina uno de los dos metales, es realmente raro que se encuentre exento uno del otro.

Hay varios tipos de yacimientos en los cuales se puede extraer el plomo. Están aquellos en donde los yacimientos se forman a poca profundidad en rocas sedimentarias sin ninguna relación aparente en rocas ígneas.

Los yacimientos someros, o también conocidos como de profundidad media, se caracterizan por contener minerales complejos y, por último, están los de gran profundidad, que se encuentran a altas temperaturas y presión elevada.

En la actualidad, como consecuencia de los problemas del medio ambiente anteriormente mencionados, se trata de ya no extraer el Pb por medio de excavaciones, procurando de esta manera cuidar el medio ambiente y conservar los recursos naturales. Al disminuir la extracción de este mineral se ha recurrido al reciclaje de chatarras de plomo. La recuperación de Pb en chatarras se logra separando los elementos que puedan comprometer su pureza por medio de diversos procesos, para finalmente ser fundido y elaborar nuevas piezas.

La producción de plomo se puede dividir en cuatro etapas: la sinterización, fusión, despumación y afinado pirometalúrgico. En una máquina de sinterización se introduce una carga de plomo y se somete a chorros de aire caliente que queman el azufre, el óxido de plomo que queda después de este proceso contiene aproximadamente 9 % de su peso en carbono. El producto de la sinterización, junto con algunos fundentes, se carga para su reducción en un horno de cuba, donde el carbono actúa como combustible y funde el material del plomo formando cuatro capas, las cuales deben ser drenadas para obtener un lingote de plomo.

Previamente a las operaciones de afinado, el lingote de plomo obtenido en el horno cuba requiere normalmente un tratamiento preliminar en calderas. Durante la despumación el lingote se agita en una caldera especial y se enfría encima de su punto de congelación, lo cual crea una espuma que se solidifica y flota sobre la parte superior del plomo fundido para que pueda ser retirado.

### **2.3. Fundición artesanal del plomo y su uso**

En la antigüedad la fundición de los minerales del plomo se llevaba a cabo por el método de precipitación, pero ahora se aplica comúnmente el método del horno de cilindro rotatorio. Aunque se venden hornos para este fin, hay quienes elaboran sus propios hornos, puesto que para fundir el plomo artesanalmente únicamente se requiere de tres elementos básicos:

- Un crisol o recipiente adecuado para fundir y manipular el plomo
- Una cámara refractaria donde se coloca el crisol para calentarlo
- Un aparato calentador capaz de alcanzar la temperatura adecuada

Al realizar una fundición de forma artesanal, es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- Los recipientes para contener el plomo fundido deben poseer aditamentos de mangos largos que sostengan firmemente el recipiente.
- La manipulación del material fundido debe hacerse cercana al piso y distante de la persona que lo manipule.
- Verificar la temperatura y tiempo de fundición.
- El contacto del metal fundido con agua produce salpicaduras peligrosas, por lo que los recipientes o moldes donde se vierta el plomo fundido deben estar completamente secos.
- Utilizar camisas de mangas largas, pantalones largos, botas de cuero y guantes apropiados y caretas.

### **2.3.1. Usos del plomo**

El plomo se usa en muchas actividades humanas, especialmente en el sector industrial, ya que se trata de un elemento sumamente resistente a la corrosión, además de otras propiedades físicas muy interesantes. Este elemento es uno de los metales más comunes y más empleados en la industria desde la antigüedad. Incluso los antiguos romanos ya lo aplicaban en la elaboración de tuberías de plomo, conexiones de espiga y otros materiales para la construcción.

Otro uso frecuente en la historia lo une a las artes, puesto que se utilizaba como aditivo en pinturas y maquillaje. También era empleado como conservante para los alimentos y pesticidas, sin embargo, por su gran toxicidad todos estos usos resultaban mortales, siendo necesaria su eliminación con el paso del tiempo. En la actualidad, entre otras cosas, se usa en la elaboración de escudos de radiación para equipos médicos y reactores nucleares, y como absorbente de sonido o vibración en la producción de vidrio y de lentes.

También es utilizado como cubierta de cables de teléfono, de televisión, de Internet o de electricidad. La ductilidad única del plomo lo hace muy apropiado para esta aplicación, porque puede estirarse para formar un forro continuo alrededor de los conductos internos.

El uso del plomo en pigmentos sintéticos o artificiales ha sido muy importante, pero está decreciendo en volumen. Los pigmentos que se utilizan con más frecuencia e intervienen en este elemento son:

- El blanco de plomo, que se conoce también como albayalde
- Sulfato básico de plomo

- El tetróxido de plomo, también conocido como minio
- Cromatos de plomo
- Silicatoeno de plomo, muy conocido en la industria de aceros blandos

Se utiliza una amplia variedad de compuestos de plomo, como silicatos, los carbonatos y sales de ácidos orgánicos, como estabilizadores contra el calor y la luz para los plásticos de cloruro de polivinilo. Se usan silicatos de plomo para la fabricación de frituras o esmaltes de vidrio o cerámica, las que resultan útiles para introducir plomo en los acabados del vidrio y de la cerámica.

La azida de plomo es el detonador estándar para los explosivos plásticos. Los arseniatos de plomo se emplean en grandes cantidades como insecticidas para la protección de los cultivos y para ahuyentar insectos molestos como cucarachas, mosquitos y otros animales que posean un exoesqueleto. El litargirio se emplea mucho para mejorar las propiedades magnéticas de los imanes de cerámica de ferrita de bario. Además, una mezcla calcinada de zirconato de plomo y de titanio de plomo está ampliando su mercado como un material piezoeléctrico.

### **3. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR FUNDICIÓN DE PLOMO**

Durante el proceso de fundición del plomo se generan emisiones a la atmósfera que resultan contaminantes, tales como el dióxido de azufre y materia particulada que contiene cadmio y plomo. Otros contaminantes son las aguas residuales del lavado del área de procesamiento; agua de granulación de escoria; escoria conteniendo impurezas de zinc, hierro, sílice, cobre y cal, y sólidos de bolsas de superficie. Considerando la importancia de la conservación del medio ambiente, es vital que se tomen las medidas adecuadas para reducir al máximo estas emisiones o para procesarlas disminuyendo su impacto.

#### **3.1. El efecto de la contaminación**

El plomo ha llegado a la atmósfera como resultado del proceso de fundición, pero también por el uso de gasolina con plomo, el cual se ha prohibido debido precisamente a este efecto. En el caso de la contaminación del agua potable, es común que suceda a través de la corrosión de las tuberías cuando el agua es ligeramente ácida, esta es la razón por la que los sistemas de tratamiento de aguas públicas ajustan el pH del agua potable.

La toxicidad del plomo afecta al ser humano, al ser ingerido en la comida o en el agua, al aspirarlo y al estar expuesto constantemente en instalaciones cerradas por tiempos prolongados. Sus efectos suelen sentirse después de haberse acumulado en el organismo durante un período de tiempo.

Los síntomas de envenenamiento son anemia, debilidad, estreñimiento y parálisis de muñecas y tobillos. Las escamas de pinturas con base de plomo, así como los juguetes fabricados con compuestos de plomo, son considerados como muy peligrosos para los niños, para los que el plomo resulta especialmente dañino, incluso a niveles que antes se consideraban inocuos.

En los niños el plomo puede producir disminución de la inteligencia, retraso en el desarrollo motor, deterioro de la memoria, problemas de audición y de equilibrio. Para tratar los casos de envenenamientos por plomo se puede administrar una sal de sodio o calcio del ácido etilendiaminotetraacético. El plomo se elimina del organismo desplazando el calcio o el sodio y formando un complejo estable que se evacúa por medio de la orina.

En general, tras la exposición constante al plomo, algunos de los efectos que se han observado son los siguientes:

- Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia
- Incremento de la presión sanguínea
- Daño a los riñones
- Aborto espontáneo
- Perturbación del sistema nervioso
- Daño cerebral
- Disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma
- Perturbación en el comportamiento como agresión e hipersensibilidad
- Alteraciones varias en ciertos animales
- Formación de depósitos plúmbicos en las encillas
- Parálisis

El plomo puede entrar en el feto a través de la placenta de la madre, causar serios daños al sistema nervioso y al cerebro de los niños por nacer, debido a esto, las mujeres embarazadas deben evitar todo contacto con el plomo para no aspirarlo o ingerirlo.

### **3.2. Consecuencias ambientales**

Respecto a su incidencia en la naturaleza, el plomo se encuentra de forma natural en el ambiente, pero las mayores concentraciones encontradas son el resultado de las actividades humanas. La concentración de plomo en el aire, establecida como valor límite permisible para ambiente general por la Agencia de Protección Ambiental, es de 1,5 microgramos/m<sup>3</sup>, además considera como nivel umbral de plomo en sangre para la población en general unos 15 microgramos/dl.

Las sales de plomo entran en el medio ambiente a través de los tubos de escape, principalmente defectuosos, de los carros, camiones, motocicletas, aviones, barcos, aerodeslizadores, fundiciones y casi todos los tipos de vehículos motorizados que utilicen derivados de petróleo como combustible, siendo las partículas de mayor tamaño las que quedan retenidas en el suelo y en las aguas superficiales que provocan su acumulación en organismos acuáticos y terrestres, incrementando la posibilidad de llegar hasta el hombre a través de la cadena alimenticia. Además, las pequeñas partículas quedan suspendidas en la atmósfera, pudiendo llegar al suelo y al agua a través de la lluvia ácida.

La acumulación de plomo en los animales puede causar graves efectos en su salud por envenenamiento, incluso provoca la muerte por paro cardiorespiratorio.

Los crustáceos u otros invertebrados son muy sensibles al plomo, debido a que este elemento se deposita en los huesos y, al no poseerlos, queda retenido en su organismo. Aún en muy pequeñas concentraciones estos organismos sufren graves mutaciones. Hay casos en donde las crías de crustáceos han presentado extremidades más largas, deformidades en otras partes y un comportamiento agresivo y poco coordinado, llegando a producirse automutilaciones y autolaceraciones múltiples, atribuidas a las alteraciones genéticas generadas por la contaminación con plomo.

Otro efecto significativo del plomo en las aguas superficiales es que provoca perturbaciones en el fitoplancton, que es una fuente importante de producción de oxígeno en los océanos y de alimento para algunos organismos acuáticos de variado tamaño.

Las fuentes más comunes de emisión de plomo que contaminan la atmósfera, el suelo y los cursos de agua, son aquellas que involucran a los procesos industriales que utilizan plomo o productos que lo contienen. La principal contaminación ambiental se debe a compuestos inorgánicos de plomo y en las áreas contaminadas, aumenta el nivel de residuos en los alimentos y bebidas, así como su contenido en suelo y ambientes interiores.

### **3.3. Consecuencias con el personal**

En cuanto a la población laboral, los niveles de plomo en sangre establecidos como permisibles por la Organización Mundial de la Salud en 1980, no han de ser superiores a 40 microgramos/dl en adultos masculinos y 30 microgramos/dl en mujeres en edad fértil.

Se indica que una población en riesgo es aquel grupo o segmento de una población definida que tiene características asociadas con una probabilidad significativamente mayor de desarrollar una enfermedad o algún estado o condición anormal. Por tanto, las poblaciones de alto riesgo son aquellas donde existe exposición a niveles de concentración peligrosos, o donde los efectos producidos por el plomo son más graves que en el resto de la población. Entre ellas se pueden señalar las siguientes:

- Trabajadores de industrias donde haya plomo.
- Personas oriundas de regiones donde haya contaminación elevada del ambiente por plomo.
- Personas con deficiencias nutricionales, principalmente de hierro, calcio, fósforo y proteínas.
- Residentes vecinos a vías o carreteras con alto tránsito vehicular.
- Familiares de trabajadores de industrias que utilizan plomo.
- Mujeres embarazadas y niños menores de 5 años.
- Personas con enfermedades neurológicas, o con enfermedades de la sangre, principalmente anemias.
- Personas residentes en zonas cercanas a fuentes minerales o industriales emisoras de plomo.
- Alcohólicos y fumadores.

Los problemas de salud derivados de la exposición al plomo se han reconocido y estudiado en el ambiente laboral, constituyéndose para el trabajador adulto del plomo, especialmente hombre, como el prototipo del ocupacionalmente expuesto.

No obstante, la información más actualizada sobre el comportamiento del plomo en el ambiente laboral, los niveles de contaminación habituales en los grandes conglomerados urbano-industriales y la toxicocinética del plomo en el organismo humano, han llevado a concluir que los niños, especialmente los menores de 6 años, se han constituido en uno de los más importantes grupos con condiciones de exposición de alto riesgo.

Debido a las malas condiciones de trabajo, la exposición crónica al plomo inorgánico es una enfermedad insidiosa, lenta, con manifestaciones varias. La fatiga, apatía, irritabilidad y síntomas gastrointestinales vagos, son algunos signos tempranos de intoxicación crónica por plomo. Los síntomas de intoxicación moderada son: fatiga general, dificultad para concentrarse, agotamiento muscular, temblor, cefalea, dolor abdominal difuso, vómitos, pérdida de peso y estreñimiento.

La continua exposición aumenta los síntomas en el sistema nervioso central causando insomnio, confusión, deterioro de la concentración y problemas de memoria, polineuropatía distal, depresión, manía y psicosis tóxica. La evolución a encefalopatía franca con convulsiones es verdaderamente rara.

Los niños captan más plomo en relación con los adultos, sobre una base de unidad de peso corporal, una mayor absorción tanto a nivel digestivo como respiratorio, y también retienen una mayor proporción del plomo absorbido.

Por otro lado, el niño representa la etapa del desarrollo metabólicamente más vulnerable del ciclo vital ante los efectos del plomo, especialmente respecto a los sistemas nervioso y óseo. Por último, las condiciones de insuficiencias nutricionales, tan frecuentes y extendidas en las poblaciones infantiles de bajo nivel socioeconómico en los países en desarrollo, son elementos favorecedores en tales grupos de una absorción digestiva aumentada de plomo, así como de una mayor retención de este por el organismo.

Los compuestos orgánicos como el tetrametilo y tetraetilo de plomo tienden a acumularse en el hígado. La eliminación del plomo ingerido se hace principalmente por las heces. En cambio, la eliminación del plomo absorbido se hace principalmente por la orina en un 75 %, por las secreciones gastrointestinales en un 16 % y por el cabello, uñas y sudor en un 8 %. También es excretado a través de la leche, en una concentración similar a la de la sangre.

La vida media del plomo en el organismo es en general larga y variable según los tejidos y las condiciones físicas de las personas que sean expuestas. La eliminación de la mitad de la carga corporal de plomo llevaría años, no obstante, se conocen valores de vida del plomo en la sangre que varía entre 3 y 4 semanas; en tejidos blandos, 4 semanas; y en los huesos 27 años aproximadamente.

El plomo es el gran contaminante químico de los lugares de trabajo y, por lo tanto, un grave e importante riesgo para la salud de los trabajadores. Los recuperadores de plomo de fuentes secundarias y fundiciones están expuestos al plomo y a otros metales contaminantes.

Los fabricantes de baterías de almacenamiento están permanentemente expuestos a la contaminación por plomo. Los de pinturas y pigmentos están expuestos a los aditivos de plomo; también los soldadores, los que trabajan con municiones, en los campos de tiro por el polvo de plomo, los fabricantes de vidrios y los ceramistas que trabajan con pigmentos y barnices.

En la industria de la construcción, si bien han existido profundos cambios tecnológicos, los sanitarios aún presentan exposición al plomo. También lo están los que realizan tareas de demolición de estructuras de acero pintadas con pinturas a base de plomo. En actividades de pulverización, aglutinado y recubrimiento de metales con plomo, se producen altas concentraciones de polvo y vapores de plomo.

El plomo inhalado y depositado en la vía respiratoria baja se absorbe por completo. Al llegar a la sangre, el plomo se distribuye en tres compartimientos: la sangre; los tejidos blandos como el riñón, médula ósea, hígado y cerebro; y el tejido mineralizado como huesos y dientes. El tejido mineralizado contiene el 95 % de la carga corporal de plomo en los adultos y 70 % en niños. El 99 % del plomo en sangre está asociado a los eritrocitos.

### **3.4. Equipo de seguridad industrial**

Los trabajadores que estén expuestos al plomo, en cualquiera de sus formas, deben contar con un equipo de protección personal adecuado.

El EPP adecuado para el proceso de fundición está compuesto por zapatos industriales con punta de acero, pantalón de lona, camisa manga larga, gabacha, lentes transparentes o careta con filtros de carbón activado, guantes de cuero y casco. Preferiblemente el equipo de protección personal debe:

- Adecuarse al proceso expuesto, en el caso de la ropa protectora pueden utilizarse trajes de algodón aluminizado que refracta el calor, pero será de acuerdo a las posibilidades de la empresa o del empleado.
- Mantenerse limpio, por lo que hay que lavarlo y cambiarlo regularmente.
- Guardarse en compartimientos separados de los de la ropa de calle, para que estos últimos no sean contaminados.
- Mantenerlos en buen estado, si presenta daños hay que reportarlos para el cambio correspondiente.

En cuanto a las ropas de trabajo, deben utilizarse siempre que las condiciones de trabajo lo permitan, evitar que tengan vueltas, pliegues y bolsillos en los que pueda acumularse el polvo.

Otras medidas de seguridad e higiene a tomar en cuenta son: proporcionar instalaciones sanitarias con ducha de agua caliente, se le debe dar a los trabajadores el tiempo necesario para lavarse antes de comer. Se debe prohibir comer y fumar en la proximidad de las áreas en que se procesa el plomo, deben existir zonas adecuadas para comer. La limpieza del lugar de trabajo es esencial, ya sea por un proceso húmedo o con aspiradores.



## **4. DISEÑO DE UN EXTRACTOR DE PARTÍCULA DE PLOMO EN UN SISTEMA DE FUNDICIÓN ARTESANAL**

En este trabajo se propone el diseño de un dispositivo que permita extraer el humo con partículas de plomo en espacios confinados a la fundición, que permita garantizar las propiedades del aire requeridas para el consumo humano y filtrar la cantidad de partículas que se expongan al medio ambiente.

### **4.1. Diseño de campana de extracción**

El diseño de una campana de extracción busca reducir el impacto negativo del plomo en la salud de los empleados y en el ambiente. Porque, aunque se pueda garantizar un suministro de aire adecuado para los empleados con equipos de respiración autónoma, esto no evita que la atmósfera se contamine con el humo y partículas de plomo en suspensión provenientes de los procesos de fundición de plomo. Esto incrementa el interés por implementar equipos de extracción que permitan reducir el contacto de los gases, vapores y humos contaminantes, con el aire del espacio, creando un filtro que atrapa los contaminantes para liberar aire en mejores condiciones.

Son pocas las empresas que sí se preocupan por diseñar dispositivos que mejoren las condiciones de operación en espacios confinados a las fundiciones de plomo, ya sean en eficiencia, costo o simplicidad. Hay un gran número de fundidoras artesanales de plomo, que están ubicadas en locales reducidos, con características de ventilación propias de los espacios confinados que aumentan la toxicidad de la atmósfera y por ende los riesgos para la salud.

En cuanto a la ubicación de estas fundidoras, según la empresa Cosmos, el 17 % se encuentra en sectores residenciales, en los cuales normalmente es inapropiada la instalación de redes de extracción para los humos de fundición, si en algún caso existieran.

Tomando en cuenta todos los elementos anteriormente mencionados y que el precio de los extractores de humos portátiles en el mercado oscila entre los Q. 3 800,00, Q. 11 400,00 y Q. 22 800,00 dependiendo de sus dimensiones, se hace necesario hacer un diseño que pueda construirse en las mismas fundidoras de plomo y que permita tener a los operarios en condiciones de trabajo menos lesivas.

Los sistemas de extracción localizada, sean fijos o portátiles, permiten maximizar la efectividad del flujo del aire, capturando los contaminantes muy cerca de la fuente. Sin embargo, estos sistemas son efectivos siempre y cuando su diseño, instalación, operación y mantenimiento sean correctos.

Antes de iniciar el diseño hay que conocer los elementos que han de formar parte del sistema de extracción. Los elementos básicos son:

- Campana extractora
- Sistemas de ductos
- Dispositivos de limpieza de aire
- Ventilador
- Ductos de descarga

Estos elementos deben diseñarse específicamente para cada aplicación y extraer el humo sin perturbar el proceso de fundición, es decir, la velocidad de captación de humos no debe afectar la atmósfera ideal para fundir plomo.

Existen diversas configuraciones para los sistemas de extracción localizada, los cuales presentan diversas características operativas, ventajas y desventajas. A continuación se listan algunos de ellos:

- Campana de extracción fija
- Brazos de extracción flexibles
- Captador por tobera de alto vacío

Aunque el objetivo general del sistema es extraer el aire, al realizar el diseño se debe especificar el tipo de proceso que requiere esta extracción, porque no es lo mismo la extracción de aire para una cocina comercial que para el proceso de fundición. Es por esto que en el diseño se toman en cuenta algunos valores de referencia en cuanto al flujo del aire requerido, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla I. **Valores típicos de flujo de aire para algunos sistemas de extracción localizada**

Sistema	Flujo de Aire Típico (m <sup>3</sup> /h)	Comentario
Captador por tobera de alto vacío	150-300	Permite posicionamiento
Brazos de extracción flexible	900-1400	Mueven un volumen de aire mayor, permiten la ubicación y reubicación
Campana de extracción fija	2500-3000	Usada para la captura sobre cabeza en locaciones fijas.

Fuente: elaboración propia, según AWS F3.2M-3.2.

El confinamiento de espacios implica ventilación pobre; como resultado de las dimensiones, forma o características constructivas, además de la restricción para la entrada y salida del aire, así como del personal. Los requerimientos particulares que deben tenerse en cuenta en los espacios confinados se presentan a continuación:

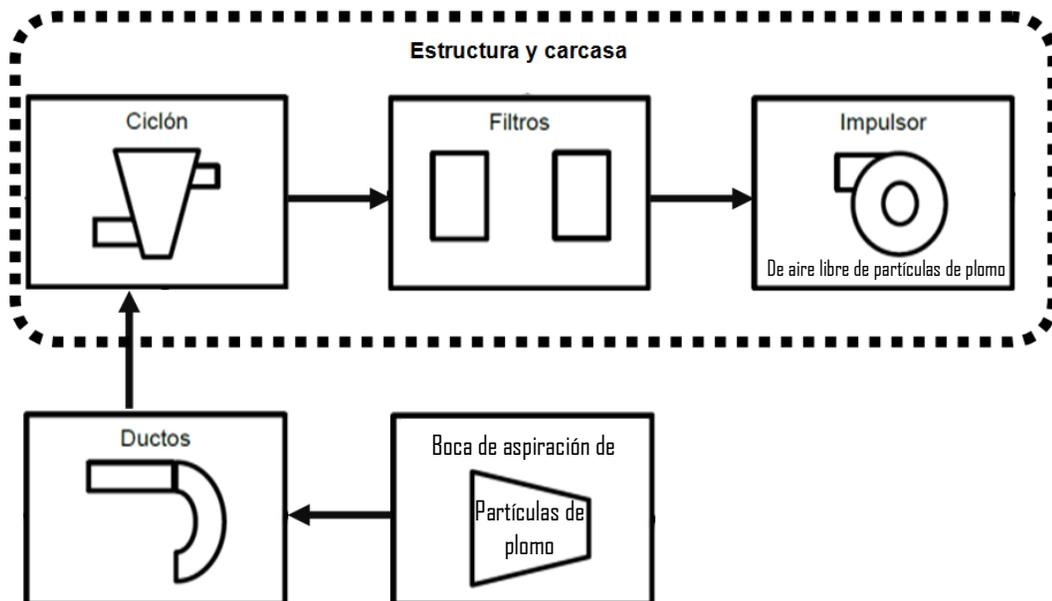
- Garantizar condiciones de respiración adecuada para el personal expuesto, que puede ser a través de ventilación o equipo de respiración autónoma.
- Evitar la acumulación de gases tóxicos, asfixiantes, inflamables o explosivos, por lo que se debe implementar un sistema de ventilación o extracción que contrarreste estos efectos.
- Evitar atmósferas enriquecidas de oxígeno, dado que los contenidos elevados de este elemento son propensos a la ignición espontánea de ácidos u otras sustancias.

En el cumplimiento de las exigencias anteriores la mejor opción es diseñar un equipo de extracción, porque al proporcionar equipo de respiración autónoma únicamente se protege al personal de los gases tóxicos, pero no de los riesgos asociados a los gases inflamables y explosivos, además de que no se logra contener la cantidad de emisiones dañinas al medio ambiente. Algunas ventajas del diseño de una campana de extracción son:

- Es un dispositivo portátil, de fácil instalación y operación.
- Su uso no está restringido únicamente a los espacios confinados y puede ser utilizado en espacio abierto, lo cual lo hace un equipo multifuncional.

- Gracias a que la expulsión de los gases se da fuera del espacio confinado, no se afecta la atmósfera del mismo, evitando la concentración de gases y la escasez de oxígeno.

Figura 2. Diagrama de bloques del diseño de campana



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Parámetros de referencia

El dimensionamiento previo de los componentes descritos en el esquema anterior se hace con base en las recomendaciones técnicas provistas por los estándares de la ASHRAE, que son las siglas en inglés de la Asociación Americana de Ingenieros de Refrigeración y Aire Acondicionado de Calefacción. Esta asociación establece rangos de velocidades de captura de aire, medidas de desempeño para dispositivos de limpieza de aire y otros aspectos necesarios para una ventilación óptima.

Para el primer elemento del diseño, que es la boca de aspiración de aire con partículas de plomo, es necesario establecer los parámetros de velocidad de captación de humos resultantes del proceso de fundición, los cuales se establecen con la siguiente tabla:

Tabla II. **Rango de velocidades de captura**

<b>Estado de dispersión de contaminantes</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Velocidad de captura, m/s</b>
Liberado esencialmente sin velocidad al aire estancado	Evaporación de tanques, desengrasado, enchapado	0,25 a 0,5
Liberado a velocidad baja al aire moderadamente estancado	Relleno de contenedores, transferencias de cintas transportadoras a baja velocidad, soldaduras	0,5 a 1,0
Generación activa en la zona de movimiento de aire rápido	Relleno de barriles, carga de los transportadores, trituración, sacudido en frío	1,0 a 2,5
Liberado a alta velocidad en zonas de movimiento de aire muy rápido	Molido, limpieza abrasiva, volteo, sacudido en caliente	2,5 a 10

Fuente: ASHRAE. *Application*. p. 32.

La información que se obtiene de la tabla anterior es un referente que permite inferir el caudal de manera indirecta. Esto se debe a que el caudal del equipo es el producto de la velocidad de entrada de la boca de aspiración por el área misma, igualmente, el caudal de aspiración depende de las velocidades que se deseen a las diferentes distancias de la boca.

Como valor de referencia se toman 100 cm equivalentes a 1m, que es una distancia cómoda de trabajo. Esto implica que el caudal de aire es satisfactorio si a los 100 cm de distancia de la boca de aspiración se alcanza un valor de velocidad entre 1 y 2,5 m/s.

El segundo elemento del diseño son los ductos. Los materiales y componentes deben proporcionar la capacidad para posicionar la boca de aspiración en donde se desee, de preferencia se pueden tener codos elásticos para este fin. Los valores de las pérdidas de estos elementos deben ser adecuados y se estiman tomando como referencia la siguiente tabla proporcionada por el estándar AWS F3.2M:

Tabla III. **Coefficientes de pérdida típicos para ductos flexibles**

<b>Coefficientes de pérdida de presión para brazos estándar de extracción de humo de soldadura flexible</b>			
(Los experimentos fueron realizados en 1994 en el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Bioambiental de la Universidad de Illinois en Urbana, a solicitud de AWS)			
Núm.	Tipo de Brazo de Extracción	Coefficiente de pérdida de presión promedio $\xi$ (?)	Flujo de Aire m <sup>3</sup> /h [cfm]
1	Brazo de extracción de 150 mm ID [6 in.] con manguera flexible de longitud completa de 3 m [10 ft.]	25,5	425-680 [250-400]
2	Brazo de extracción de 160 mm ID [6.3 in.] con manguera flexible de longitud completa	12,5-18	680-850 [400-500]
3	Brazo de extracción de 160 mm ID [6,3 in.] con manguera flexible de longitud completa de 3-4 m [10-14 ft.]	4,7	680-1530 [400-900]
4	Brazo de extracción de 160 mm ID [6.3 in.] con brazo rígido de una sección de 3-5 m [10-16 ft.] y manguera flexible de una sección de 2 m [8 ft.]	12,3	680-1190 [400-700]
5	Brazo de extracción de 180 mm ID [7 in.] con manguera flexible de longitud completa de 3 m [10 ft.]	13,8	680-1190 [400-700]
6	Brazo de extracción de 200 mm ID [8 in.] con manguera flexible de longitud completa de 3 m [10 ft.]	9	850-1530 [500-900]
7	Brazo de extracción de 200 mm ID [8 in.] con dos secciones de ductos rígidos de 3 m [10 ft.]	11,1	850-1530 [500-900]

Fuente: Standard AWS F3.2.

La tabla III contiene las medidas y características de los diferentes tipos de brazos de extracción. El estándar para obtener un flujo de aire que oscile entre 680 y 1 530 metros cúbicos por hora posee las características resaltadas en la

fila núm. 3, que son 160 mm de diámetro, con manguera flexible cuya longitud completa esté entre 3 a 4 metros.

Tomando en cuenta que el propósito del sistema de ventilación es crear una solución accesible para las fundidoras artesanales, se tiene que cuidar que el diseño implemente métodos eficaces, simples y económicos, para que pueda ser construido por cualquier fundidora de plomo artesanal, de tal forma que los elementos que integren el diseño también deben cumplir las características de eficacia, simpleza, economía y, por tanto, accesibilidad.

El tercer elemento de diseño es el sistema de filtración integrado por el ciclón y los filtros, por lo que el siguiente paso es la selección adecuada de sus componentes. Dicha selección es más efectiva al consultar bibliografía técnica con información referente al filtrado de la polución industrial del aire.

Los ciclones son de fácil construcción, permiten atrapar contaminantes de granulometría alta y baja conforme a su densidad y su mantenimiento es mínimo. Por eso, antes de colocar los filtros, se puede colocar un ciclón que reduzca la carga de contaminantes que pasen por los filtros para alargar su vida útil, disminuir costos operativos y reducir el mantenimiento del sistema de filtrado. Para la selección de filtros y del ciclón se toman en cuenta especificaciones técnicas generales y la disposición económica para la inversión. Por último, dependiendo de las dimensiones de los componentes del sistema, se hace el diseño estructural para contener y agrupar cada uno de los dispositivos.

El manual ASHRAE para sistemas de calefacción, ventilación y enfriamiento, proporciona directrices para la selección y construcción de sistemas de filtrado, así como para la remoción de la polución del aire. El

resumen con las medidas de desempeño para dispositivos de limpieza del aire es un parámetro que se toma en cuenta, siendo presentado en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Medidas de desempeño para dispositivos de limpieza de aire**

Tipo de recolector de partículas	Diámetro de partículas, $\mu\text{m}$	Carga máxima, g/m <sup>3</sup>	Eficiencia de recolección	Pérdida de presión		Utilidades por m <sup>3</sup> /s (gas)	Requerimiento de energía comparativa	Velocidad superficial, b m/s	Límites de capacidad m <sup>3</sup> /s	Espacio requerido (relativo)
				Gas, Pa	Líquida, kPa					
<b>Recolectores inerciales secos</b>										
Cámara de sedimentación	>40	>10	50	25 a 125	-	-	1	1.5 a 3.0	Ninguno	Grande
Cámara deflectora	>20	>10	50	125 a 625	-	-	1,5	5,0 a 10	Ninguno	Mediano
Cámara removedora	>20	>2	70	<250	-	-	3	10 a 20	25	Pequeño
Persiana	>10	>2	80	75 a 500	-	-	1,5 a 6,0	10 a 20	15	Mediano
Ciclón	>15	>2	85	125 a 750	-	-	1,5 a 9,0	10 a 20	25	Mediano
Multiciclón	>5	>2	>95	500 a 2 500	-	-	6,0 a 20	10 a 20	95	Pequeño
Impacto	>10	>2	90	250 a 500	-	-	3,0 a 6,0	10 a 20	Ninguno	Pequeño
Dinámico	>10	>2	90	Proporciona presión	-	0,75 a 1,5 kW	10 a 20	-	25	-
<b>Precipitadores electrostáticos</b>										
Alto voltaje	>0.01	>0.2	99	50 a 250	-	0,1 a 0,6 kW	0,8 a 2,0	0,3 a 2,0	0,5 a 940	Grande
Baja tensión	>0.001	1	90 a 99	50 a 125	-	0,03 a 0,06 kW	0,5 a 1,0	1,0 a 3,5	0,5 a 50	Mediano
<b>Filtros de tela</b>										
Baghouses	>0.08	>1	99	500 a 1 500	-	-	6,0 a 20	0,005 a 0,10	95	Grande
Filtros de cartucho	>0.05	>0.2	99+	500 a 2 000	-	-	-	0,0025 a 0,025	20 a 25	Mediano
<b>Depuradores húmedos</b>										
Spray de gravedad	>10	>2	70	25 a 250	140 a 690	70 a 270 L/s	5	0,5 a 1	50	Mediano
Centrífugo	>5	>2	90	500 a 2 000	140 a 690	0,14 a 1,4 L/s	12 a 26	10 a 20	50	Mediano
Impacto	>5	>2	95	500 to 2 000	140 a 690	0,14 a 0,7 L/s	9,0 a 31	15 a 30	50	Mediano
Packedbed	>5	>0.2	90	125 a 2 500	35 a 210	0,7 a 70 L/s	4,0 a 34	0,5 a 1,5	25	Mediano
Dinámico	>2	>0.2	95	Proporciona presión	35 a 210	0,14 a 0,7 L/s, 2,25 a 15 kW	300 a 200	15 a 20	25	Pequeño
Orificio sumergido	>2	>0.2	90	500 a 1500	Ninguno	Sin bombeo	9,0 to 21	15	25	Mediano
Chorro	>2	>0.2	90	Proporciona presión	345 a 610	7 a 14 L/s	15 a 30	10 a 100	50	Pequeño
Venturi	>0.1	>0.2	95 a 99	2 500 a 15 000	70 a 210	0,4 a 1,4 L/s	30 a 300	60 a 210	50	Pequeño

Fuente: ASHRAE. *handbook HVAC systems and equipment*. p. 25.



## 5. DISEÑO FUNCIONAL DEL DISPOSITIVO

Cada uno de los elementos del extractor de partículas de plomo, que puede instalarse en un sistema de fundición artesanal, cumple una función específica que es descrita detalladamente en este capítulo.

### 5.1. Boca de aspiración

Este es el elemento encargado de captar los humos provenientes del proceso de fundición. Para el diseño de la boca de aspiración se toman en cuenta diferentes parámetros, tales como la facilidad de construcción, los materiales, dimensiones, costos, resistencia, etc. Se puede construir de lámina de acero galvanizado, acero inoxidable o cualquier otro material de fácil configuración resistente a la exposición diaria de partículas; aunque también se puede utilizar plástico, solo se usa este material cuando se fabrica en masa para que el costo no sea tan elevado.

Para que sea funcional, es necesario que cumpla con los requerimientos de velocidad de captación establecidos en la tabla II del capítulo anterior, los cuales oscilan entre 1 y 2,5 m/s según la Asociación Americana de Ingenieros de Refrigeración y Aire Acondicionado de Calefacción. También se toma en cuenta el caudal de referencia que se mantiene entre 680 y 1 530 m<sup>3</sup>/h de acuerdo con la tabla III. Con los datos anteriores se puede estimar el área de captación que debe poseer la campana, despejándola de la siguiente fórmula:

$$Q (m^3/h) = Vc (m/h) * Ac (m^2)$$

En donde Q es el caudal en metros cúbicos por hora, Vc es la velocidad de captura en metros por hora y Ac es el área de entrada al sistema en metros cuadrados. Despejando queda la siguiente ecuación:

$$Ac = \frac{Q}{Vc}$$

Tomando como referencia el máximo caudal y la velocidad mínima se calcula un área de captación de 0,43 m<sup>2</sup>, tal como observa en esta ecuación:

$$Ac = \frac{1\,530\text{ m}^3/h}{3\,600\text{ m/h}} = 0,43\text{ m}^2$$

Tomando como referencia el mínimo caudal y la velocidad máxima se calcula un área de captación de 0,076 m<sup>2</sup> como se muestra a continuación:

$$Ac = \frac{680\text{ m}^3/h}{9\,000\text{ m/h}} = 0,076\text{ m}^2$$

Para determinar los diámetros de la campana se puede despejar el radio de la siguiente ecuación:

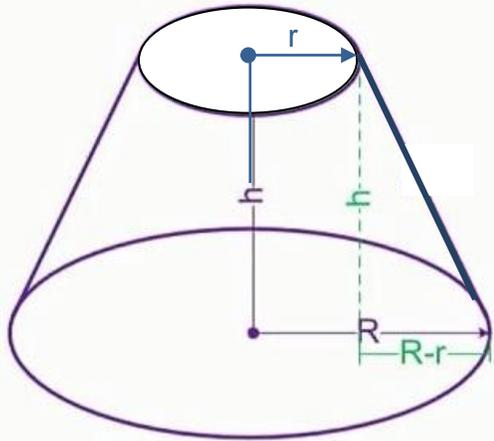
$$Ac = \pi r^2$$

La ecuación que se muestra a continuación es la que resulta al despejar el radio y es en donde se utilizan las áreas encontradas anteriormente:

$$r = \sqrt{Ac/\pi}$$

Sabiendo que la forma de la campana queda como un cono truncado se encuentra la altura tomando en cuenta los datos de la siguiente tabla:

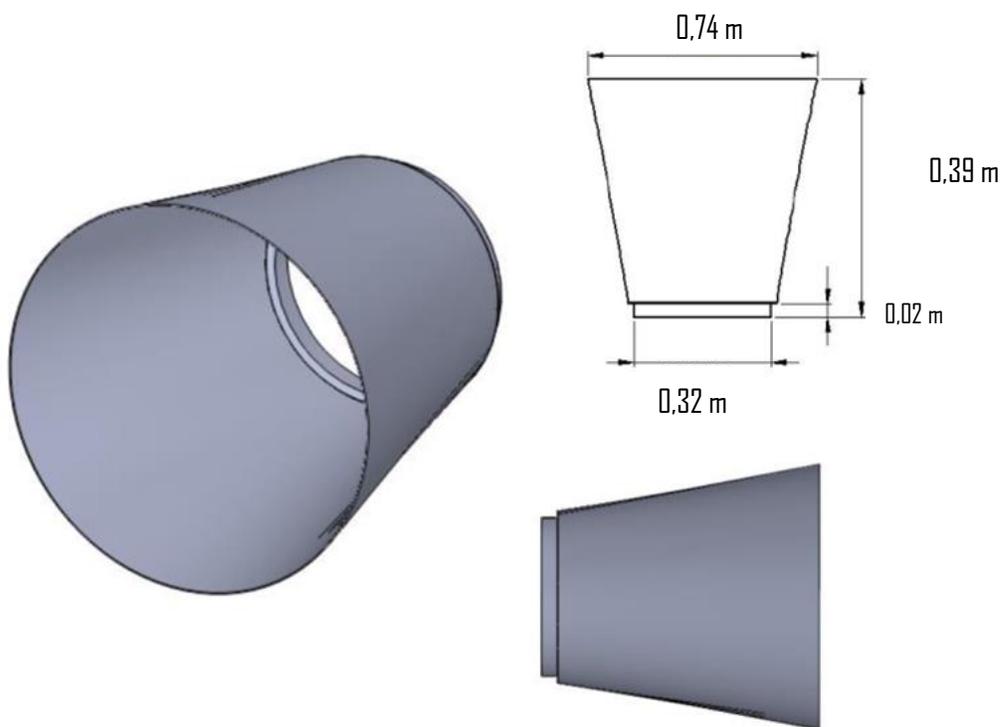
Tabla V. **Cálculos finales del diseño de la campana o boca de aspiración de aire con partículas de plomo**

Visualización gráfica de los cálculos	Fórmulas y cálculos
 <p style="text-align: center;"> <math>R = 0,37 \text{ m}</math>  <math>r = 0,16 \text{ m}</math>  <math>h = 0,37 \text{ m}</math> </p>	<p>Con:  <math>r = \sqrt{Ac/\pi}</math>      Donde:  <math>Ac = \text{área de captación}</math></p> <p>Sustituyendo</p> $R = \sqrt{0,43\text{m}^2/\pi} = 0,37 \text{ m}$ $r = \sqrt{0,076\text{m}^2/\pi} = 0,16 \text{ m}$ <p>Con:  <math>h = \frac{a\sqrt{3}}{2}</math>      donde:  <math>h = \text{es la altura del cono}</math>  <math>a = 2 (R-r)</math></p> <p>Sustituyendo</p> $h = \frac{(2(0,37 - 0,16))\sqrt{3}}{2} = 0,37\text{m}$

Fuente: elaboración propia.

Ya con esta información, es útil ver la figura 3. Se hace en lámina metálica calibre 18, con 0,74 m de diámetro en la boquilla de extracción, 0,32 m de diámetro en la boquilla de acoplamiento y una altura total de 0,39 m que incluye 0,02 m para el acoplamiento.

Figura 3. **Campana o boca de aspiración**



Fuente: elaboración propia.

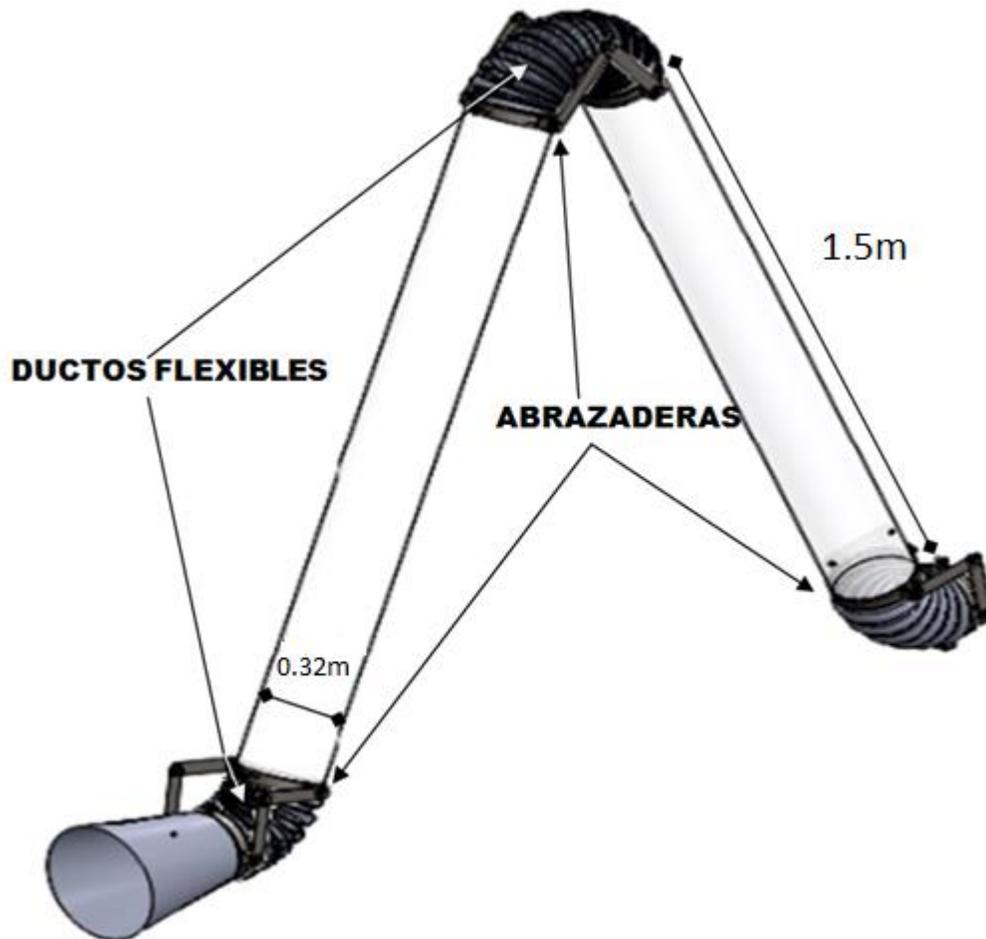
## 5.2. **Diseño del ducto**

El ducto es el elemento que se acopla a la campana de aspiración para conectarlo con el resto del sistema. Se puede ver como un conjunto conformado por dos ductos rígidos de 0,16 m equivalente a 6,3" de radio nominal y 1,5 m de longitud cada uno, para que se complementen mutuamente para formar un

brazo con una sección que mida entre 3 y 4 metros. Estas medidas se establecen tomando como base las características presentadas en la tabla III del capítulo anterior, que corresponden al tipo de brazo que se desea armar para que cumpla con la extracción de partículas de plomo.

La boca de la campana de aspiración se sujeta al sistema a través de un ducto flexible corrugado, del mismo modo que los dos tubos entre sí; las uniones de los elementos se ajustan por medio de abrazaderas hechas en platina de acero estructural de 1,59 mm de espesor, de acuerdo a los calibres estandarizados; y se cuenta con un acople de 0,32 m de diámetro. Con las especificaciones anteriores se realiza el diseño del ducto que se presenta en la siguiente figura:

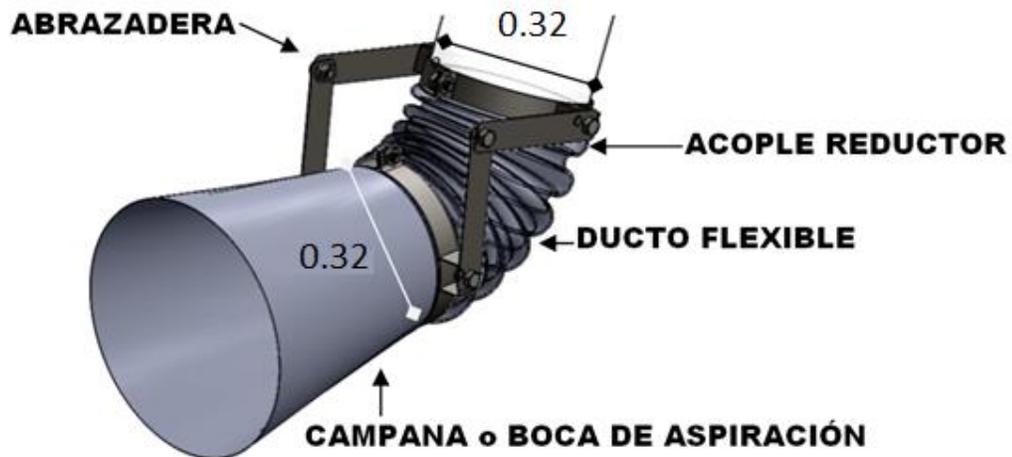
Figura 4. **Diseño del ducto**



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura, las abrazaderas y los ductos corrugados flexibles son parte importante del diseño del ducto. El detalle del acople con las abrazaderas y la boca de aspiración se puede observar en la siguiente figura:

Figura 5. **Detalle de acoplamiento de la campana de aspiración**



Fuente: elaboración propia.

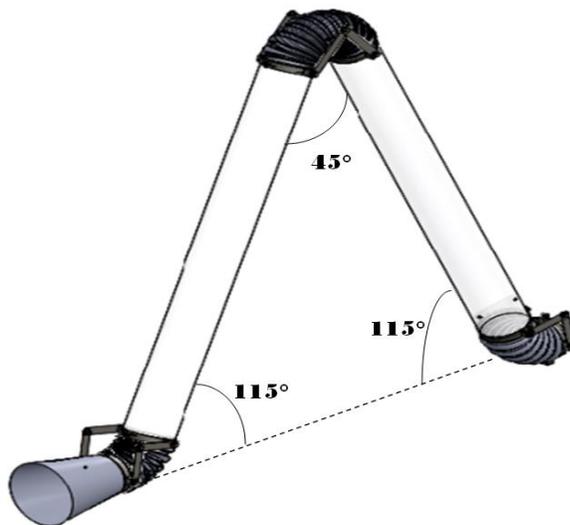
Las abrazaderas son el punto de apoyo para las placas laterales, que ayudan a darle rigidez al ensamble; además permiten que la campana de aspiración y el ducto flexible conserven su posición relativa con respecto al ducto.

Independientemente del diseño estructural se tiene que determinar la pérdida de presión que se da a lo largo del ducto, por ser un factor elemental en el diseño funcional. La pérdida de presión en este elemento depende principalmente de: la longitud de los ductos rectos, los cuales son fijos; y de los ángulos, los cuales pueden variar de posición según la necesidad de instalación dentro del área a utilizar y la boca de la campana entre sí.

Aunque hay infinidad de combinaciones de ángulos para los elementos anteriormente mencionados, es la combinación de ángulos más cerrada la que origina una pérdida de presión más alta. Si lo que se necesita es evitar

pérdidas, es lógico que el diseño deba evitar combinaciones de ángulos muy cerrados, para no provocar choque entre elementos.

Figura 6. **Ángulos de los ductos**



Fuente: elaboración propia.

Otro factor que contribuye a la selección de esta configuración es el acomodo de los elementos de rigidez que están presentes en las conexiones, ya que generan un mecanismo plano que debe ser bien acomodado para darle la estabilidad y firmeza a la estructura general.

Es importante mencionar que las pérdidas de todo el sistema, que incluye la boca de la campana de aspiración, los ductos, el ciclón y los filtros, deben ser tomadas en cuenta previamente a la selección del impulsor, por ser un factor importante para la correcta operación del mismo.

### 5.3. Diseño del ciclón

El ciclón es el elemento que se encarga de minimizar la carga de contaminantes que pasan a los filtros, colocándose entre estos y los ductos. El principio de su diseño está relacionado con los diámetros aerodinámicos de las partículas que desean captarse, debido a que las dimensiones del ciclón generan el cambio de velocidad y trayectoria en el aire para desacelerarlas hasta su estancamiento.

Por otro lado, hay que realizar un análisis de cómo se forman las partículas sólidas en el humo de la fundición de plomo, los cuales a diversas temperaturas van formando núcleos de solidificación que generan diversidad de espectros de diámetros aerodinámicos de las partículas. Todo esto depende de los componentes de la fundición, el flujo de calor en la fundición, la pérdida energética de los humos a lo largo del trayecto y el patrón del flujo entre otros.

En realidad, el estudio de la formación de partículas es sumamente complejo, complicando el desarrollo de un modelo analítico para este fenómeno. Esta es una de las razones por las que resulta más simple y conveniente el uso de resultados obtenidos a partir de experimentos, ya que facilitan la visualización de la relación entre variables que intervienen en la formación del material particulado que forma parte de los humos de la fundición.

Se sabe que la distribución del diámetro de las partículas es en función de la composición química del material fundido, que para este caso es el plomo. Las partículas pueden clasificarse de acuerdo a su tamaño; las ultrasfinas son las que tienen menos de  $0,1 \mu\text{m}$  de diámetro; las de diámetro medio, que son las que están arriba de  $0,1 \mu\text{m}$  hasta  $0,2 \mu\text{m}$  de diámetro; y por último están las partículas gruesas, que son las que superan el diámetro de  $0,2 \mu\text{m}$  de diámetro.

Estas partículas se forman por coagulación de las partículas ultrafinas y, por lo mismo, es muy raro que estas superen los 3  $\mu\text{m}$  de diámetro.

En la determinación de un método de contención, disminución o eliminación de partículas que se generan en un proceso, sin importar cuál sea, normalmente son importantes el tamaño, forma y composición. Con estas características es posible realizar estudios para calcular la densidad promedio para el material particulado que el ciclón debe procesar, que a su vez influye en la elaboración de su diseño.

Los datos experimentales de las partículas generadas en el proceso de soldadura que se presentan a continuación son referencia para la elaboración del diseño del ciclón, debido a la similitud en cuanto a composición, tamaño y forma:

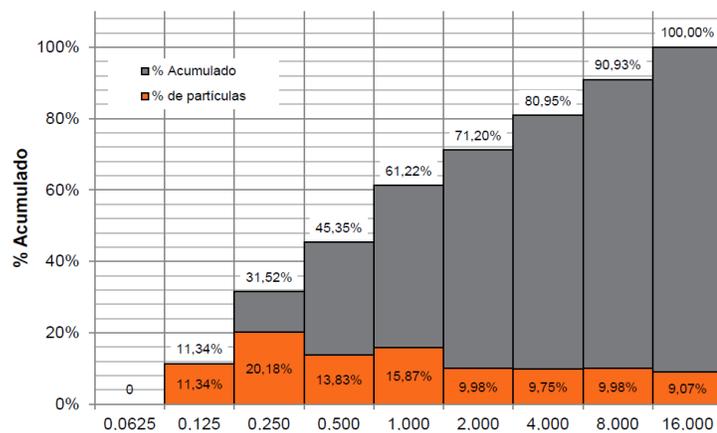
- La concentración de material particulado en los gases de extracción de soldadura se ubica entre los 110 a 223  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Con estos valores se tiene una referencia sensata de los tipos de partículas y las tasas de generación de humo.
- Con la composición porcentual promedio de las partículas de humo emitidas se puede estimar la densidad media para el material particulado, el cual se estima en 6,11  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Tabla VI. **Composición elemental promedio del material particulado en el humo de soldadura**

Elemento	% (masa)	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Ponderado
Fe	43,8	7,87	3,45
Mn	19,6	7,39	1,45
Ti	2,1	4,50	0,09
Ca	1,8	1,54	0,03
K	1,8	0,86	0,02
C	10,5	2,27	0,24
Si	8,6	2,33	0,20
Al	1,6	2,70	0,04
Mg	2,1	1,74	0,04
Na	1,3	0,97	0,01
F	0,3	1,70	0,01
Otros	6,5	8,38	0,54
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>Total</b>	<b>6,11</b>

Fuente: ENNAN, A; KIRO, S; OPRYA, M; VISHNIAKOV, V. *Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding.* p. 107.

Figura 7. **Distribución porcentual de diámetros en las partículas del humo de soldadura**



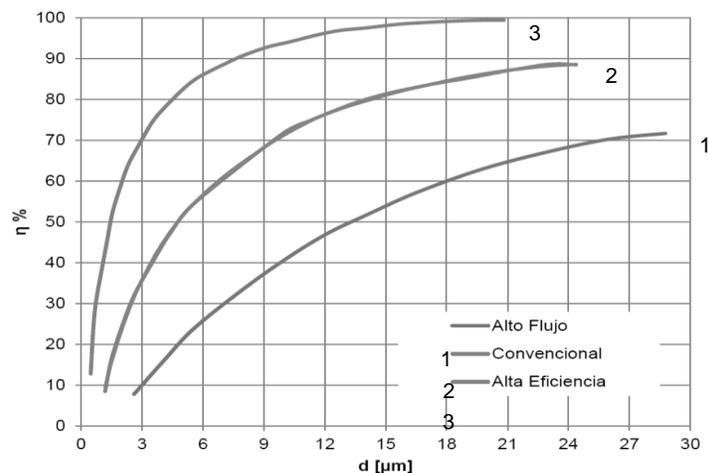
Fuente: ENNAN, A; KIRO, S; OPRYA, M; VISHNIAKOV, V. *Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding.* p. 107.

Tanto la información de la tabla como de la figura anterior proporcionan información que permite obtener los parámetros necesarios para el diseño del ciclón, que son el espectro del material particulado y la densidad del mismo.

Los ciclones son adecuados para la captación de partículas de un diámetro mayor o igual a  $0,1 \mu\text{m}$ , lo cual, según el histograma anterior (ver tabla VI) y otros elementos, representa el 54,65 % de la totalidad de las partículas presentes en el humo. Como el ciclón se va a colocar antes de los filtros, se logra reducir la carga que pasará por ellos en ese mismo porcentaje y ampliar la vida útil de los mismos.

Aunque se tiene un referente del porcentaje de captación de partículas que tiene el ciclón, es necesario tener en cuenta la eficiencia propia de los ciclones en función de sus dimensiones y sus parámetros operacionales. En ese contexto se presentan las curvas típicas de comportamiento de ciclones de alto flujo, convencionales y de alta eficiencia.

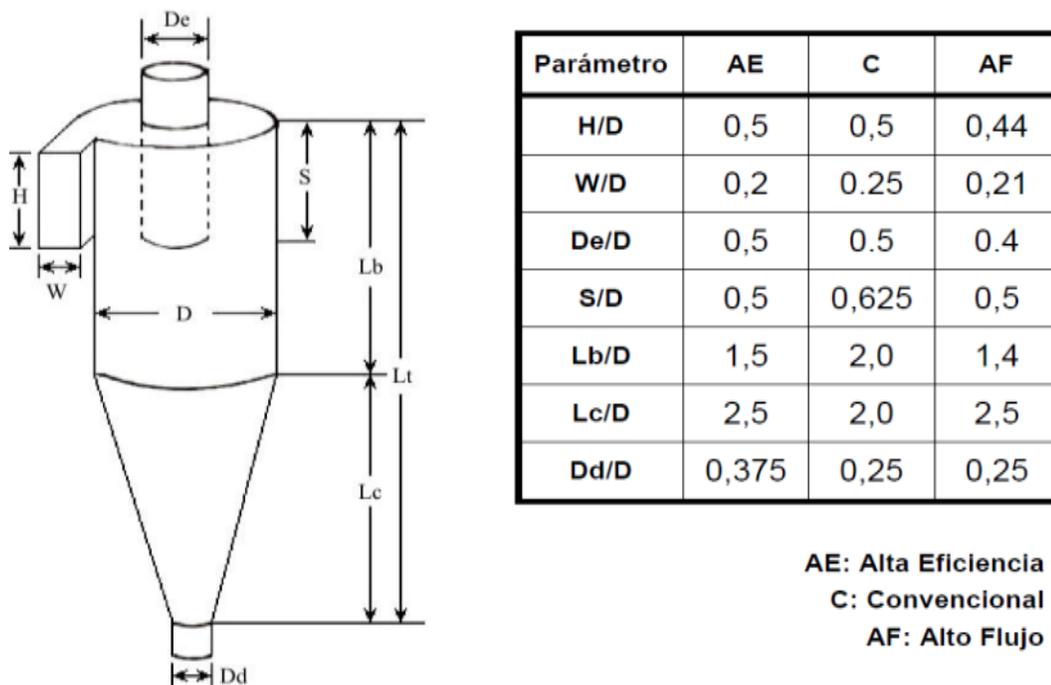
Figura 8. **Eficiencia vs. diámetro de partículas captadas en ciclones**



Fuente: NAZAROFF, R; ÁLVAREZ, D. *Gaseous emission-control technologies*. p. 420.

La información que proporciona la figura anterior es una aproximación del comportamiento real de los ciclones y la capacidad de captación de los mismos en función principalmente de sus dimensiones, así como de sus condiciones de operación. En la siguiente figura se presentan las variables topológicas y las relaciones establecidas para cada tipo de ciclón, según la clasificación otorgada en la figura 8.

Figura 9. **Parámetros topológicos de los ciclones**



Fuente: LAPPLE, C. *Processes use many collector types*. p. 147.

Para captar la mayor parte de las partículas a través del ciclón y tomando en cuenta que este no es el único elemento de retención del material particulado, se procede a diseñar un ciclón de alta eficiencia con el cual se pueda reducir la carga sobre los filtros de aire, que actuarán en la retención del material particulado de menor dimensión.

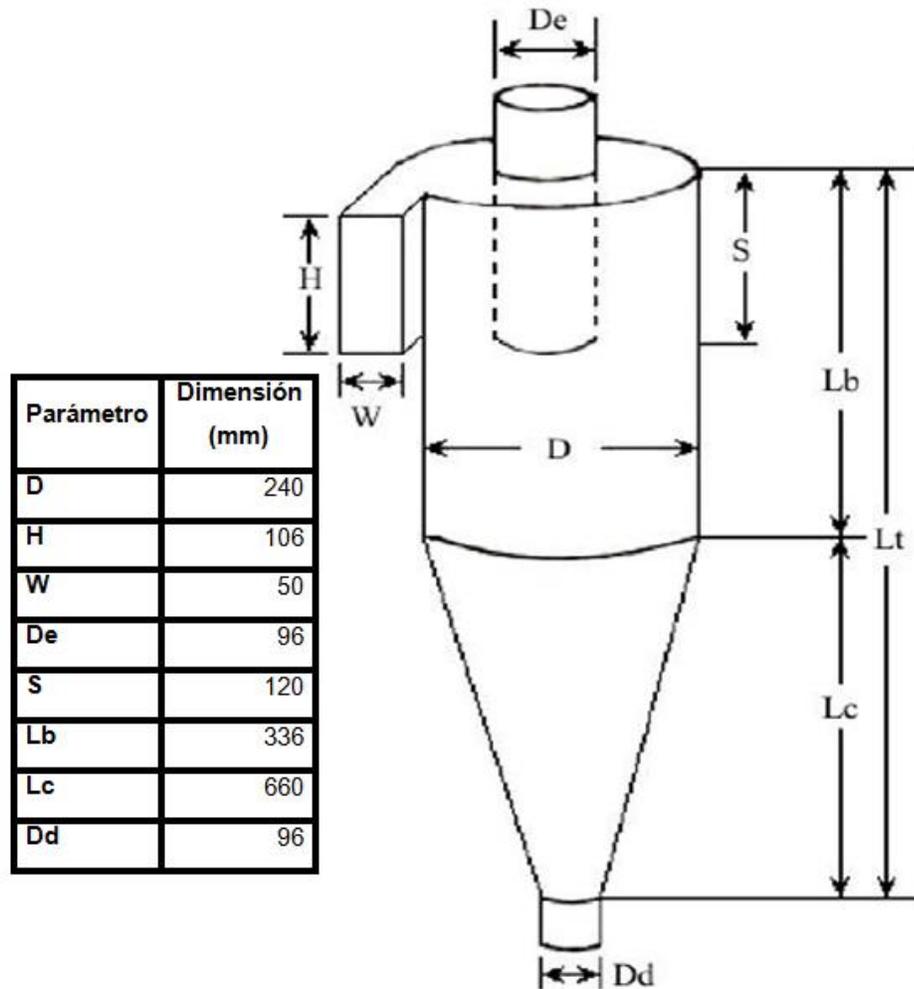
En el diseño del ciclón se utilizaron ecuaciones con las diferentes variables dimensionales hasta llegar a un resultado que fuera deseable respecto a las dimensiones, captación de partículas y pérdidas de presión a través del dispositivo. Algunas consideraciones en este aspecto son:

De acuerdo al estándar AWS F3,2M se indica que el diámetro del ciclón (D) debe ser 150 % más que el diámetro de entrada de las partículas ( $D_e$ ) (ver figura 10), siendo este de 240 mm.

- A mayor eficiencia en la captación, mayores pérdidas de presión, lo que incrementa el consumo energético del extractor de humos.
- El incremento de eficiencia implica una mayor altura del cuerpo del ciclón, debido a que se aumentan los giros efectivos de las partículas dentro de este.
- Se espera una eficiencia global superior al 50 % y una eficiencia interna aproximada del 90 %, que permita capturar las partículas más grandes que entren al sistema y que conforman más del 50 % de la totalidad de partículas en el humo de fundición.

De acuerdo a las especificaciones y consideraciones anteriores, se determinan las dimensiones del ciclón, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 10. Dimensiones del ciclón



Fuente: elaboración propia.

El diseño operativo del ciclón se realiza con base en las dimensiones que se establecen en la figura 10. La capacidad de retención del ciclón y la eficiencia de captación que se tiene para cada rango de diámetros, deben ser calculados iniciando con el número de vueltas efectivas de las partículas en el ciclón.

Para retener partículas en el fondo del ciclón tienen que conocerse la cantidad de vueltas efectivas que dan las partículas para desacelerarse y perder velocidad. Matemáticamente esto puede representarse con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{1}{H} (Lb + Lc/2)$$

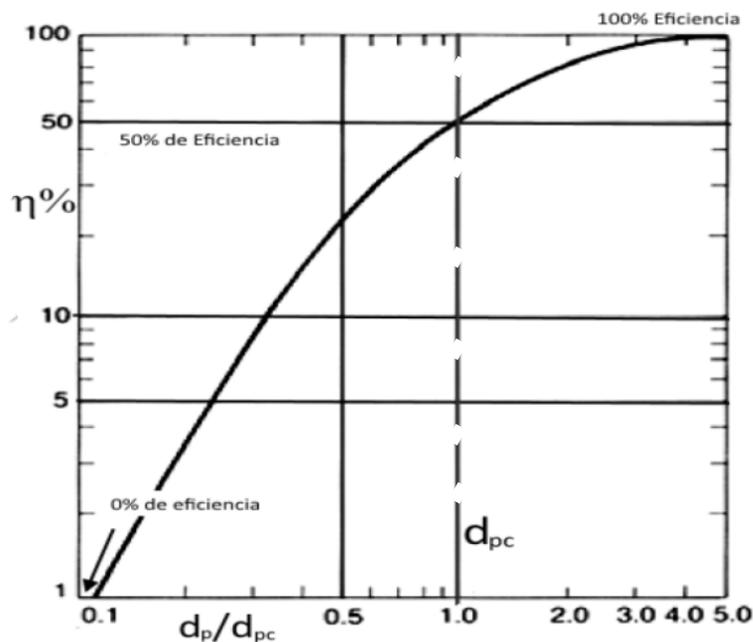
Para retener partículas en el fondo del ciclón tienen que conocerse la cantidad de vueltas efectivas que dan las partículas para desacelerarse y perder velocidad. Para este caso en particular, el  $N= 6,023$ , es decir 6 vueltas efectivas. De acuerdo a esta información se continúa con el cálculo del tiempo de permanencia del gas o aire en el vórtice generado para la desaceleración de las partículas, utilizando el diámetro del cuerpo del ciclón, el número de vueltas efectivas y la velocidad de entrada del ciclón.

La velocidad de entrada del ciclón se obtiene con el área transversal de la sección de entrada del ciclón y el caudal de operación. Para este caso en particular, con las dimensiones del ciclón que se presentan en la figura 10 y un caudal de  $1\ 200\ m^3/h$ , se obtiene una velocidad de  $62,63\ m/s$  y un  $\Delta t$  de  $0,0725$  segundos, que es el tiempo de permanencia del gas en el recorrido del vórtice (ver figura 19).

También se debe determinar el diámetro mínimo de captura del ciclón, ya que en teoría todas las partículas con un diámetro igual o mayor al diámetro mínimo de captura deben ser colectadas con  $100\ \%$  de eficiencia. Para estos cálculos se toma en cuenta la longitud de la entrada del ciclón, la cual para este caso se tomó de  $50\ mm$ ; también se considera la viscosidad del aire, calculada en  $0,00001849\ kg/m\cdot s$ , con las densidades del aire de  $1,184\ Kg/m^3$  y de las partículas, que es de  $6\ 114\ kg/m^3$  (ver figura 11).

También se calcula el diámetro de corte para partículas colectadas con un 50 % de eficiencia de  $0,7608 \mu\text{m}$  (ver tabla VII). Este término corresponde a una curva en donde se puede predecir la eficiencia del ciclón. Esta curva se muestra en la siguiente figura:

Figura 11. **Curva de predicción de la eficiencia para el ciclón**



Fuente: LAPPLE, C. *Processes use many collector types*. p. 148.

Como se observa, la eficiencia de captación se presenta en el eje vertical que depende del diámetro de las partículas, mientras que en el eje horizontal se muestra la relación entre el diámetro de las partículas y el parámetro  $d_{pc}$ . De acuerdo con la curva de la figura, cuando el diámetro de la partícula es igual a  $d_{pc}$ , se tiene una eficiencia de 50 %, indicando que una de cada dos partículas es captada por el ciclón. También se observa que a medida que el diámetro de las partículas aumenta, se incrementa la eficiencia, por lo que con diámetros más grandes la eficiencia se va acercando más al 100 %.

También se ha de calcular la eficiencia por cada fracción de las partículas que se encuentran en el espectro de captación, para facilitar el cálculo y ponderar su aporte a la eficiencia general del dispositivo se requiere del diámetro de partículas colectadas y el diámetro promedio del rango.

Aplicando la ecuación correspondiente a cada fracción de las partículas según su diámetro, se obtiene la eficiencia del ciclón para cada rango de diámetros y con este procedimiento se estima la eficiencia global del ciclón. De acuerdo a los cálculos se obtiene la siguiente tabla:

Tabla VII. **Eficiencia de captación del ciclón**

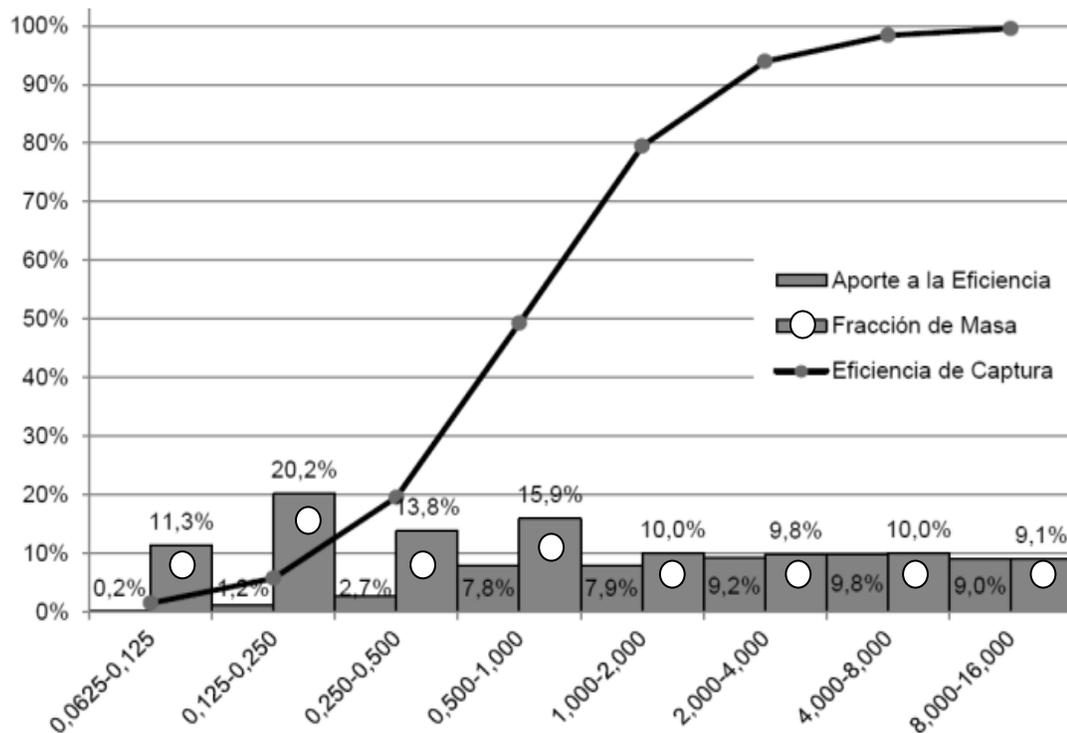
<b>Rango</b>	<b>Promedio</b>	<b>Fracción de masa</b>	<b>Eficiencia de captura</b>	<b>Eficiencia ponderada</b>
0,0625-0,1250	0,0938	11,34 %	1,5 %	0,170 %
0,1251-0,2500	0,1875	20,18 %	5,7 %	1,156 %
0,2501-0,5000	0,3750	13,83 %	19,5 %	2,704 %
0,5001-1,0000	0,7500	15,87 %	49,3 %	7,823 %
1,0001-2,0000	1,5000	9,98 %	79,5 %	7,936 %
2,0001-4,0000	3,0000	9,75 %	94,0 %	9,161 %
4,0001-8,0000	6,0000	9,98 %	98,4 %	9,819 %
8,0001-16,0000	12,0000	9,07 %	99,6 %	9,034 %
<b>Totales</b>		<b>100,00 %</b>		<b>47,803 %</b>

Fuente: elaboración propia.

Con los cálculos realizados y presentados en la tabla anterior, se comprueba que la eficiencia global del ciclón es del 47,8 %. Al mismo tiempo, vale la pena evidenciar que para diámetros superiores a 1 $\mu$ m se obtienen eficiencias que parten casi del 80 % hasta 99,6 %.

Con la información obtenida del cálculo de la eficiencia global se puede graficar el aporte a la eficiencia, la fracción de masa y la eficiencia de captura, que se muestra en la siguiente figura:

Figura 12. **Eficiencia de captación del ciclón**

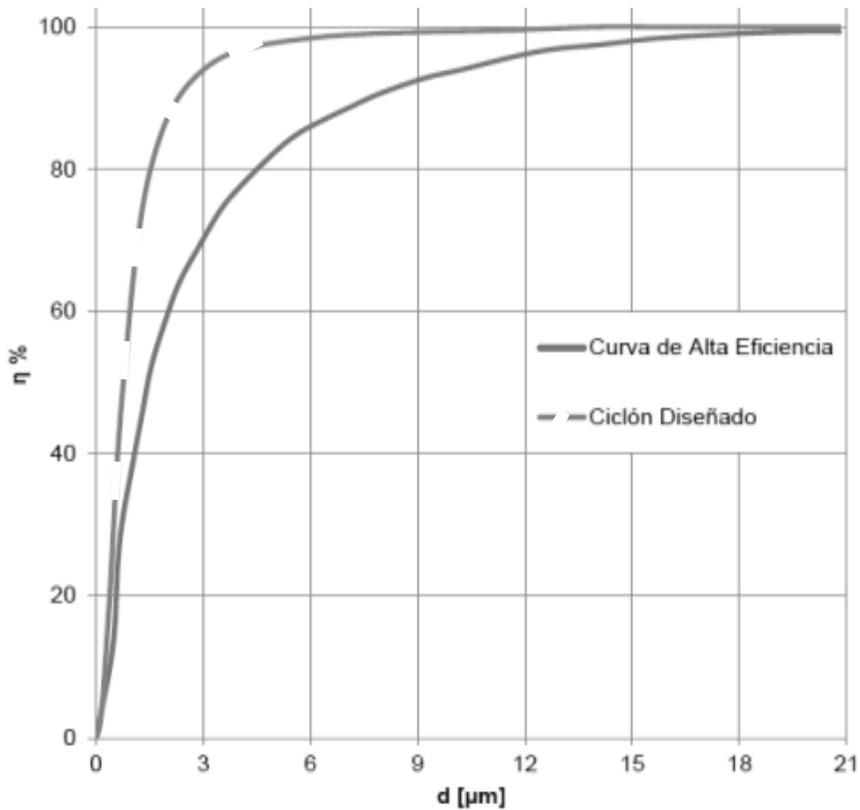


Fuente: elaboración propia.

Es evidente que la curva de eficiencia obtenida para el ciclón tiene una forma similar a la que se presenta en la figura 11, que corrobora que las estimaciones y los cálculos son coherentes. Al iniciar el proceso de diseño de este elemento se precisó que el ciclón puede entrar entre la clasificación de alta eficiencia. Tomando como referencia la curva teórica del comportamiento de ciclones presentada en la figura 8, se realiza una comparación con la curva de

la eficiencia del ciclón diseñado, esta comparación se presenta en la siguiente figura:

Figura 13. **Curva de alta eficiencia versus curva del ciclón diseñado**



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos para el ciclón diseñado, al ser graficados, no solo muestran que los cálculos son correctos, sino que superan el promedio sugerido teóricamente. Con todos los cálculos realizados anteriormente para el diseño funcional del ciclón, se realiza una tabla resumen que se presenta a continuación:

Tabla VIII. Cálculos para el diseño operativo

Fórmula	Simbología	Calculo
$N = \frac{1}{H} (Lb + Lc/2)$	N= número de vueltas efectivas Lb= altura del cilindro Lc= altura de la tolva H= altura del área rectangular (Referencia en figura 10)	N=6 023 N≈ 6 vueltas
$\Delta t = \pi DN/V_i$	$\Delta t$ = tiempo de permanencia del humo D= diámetro del cuerpo del ciclón N= número de vueltas efectivas $V_i$ = velocidad de entrada del aire al ciclón	$\Delta t=0,0725s$
$d_p = \left( \frac{9\mu T}{\pi N V_i (\rho_p - \rho_a)} \right)^{1/2}$	$d_p$ = diámetro mínimo de captación T= longitud de entrada al ciclón $\mu$ = viscosidad del aire $\rho_p$ = densidad del aire $\rho_a$ = densidad de partículas N= número de vueltas efectivas $V_i$ = velocidad de entrada del aire al ciclón	$d_p= 0,076\mu m$
$d_{pc} = \left( \frac{9\mu T}{2\pi N V_i (\rho_p - \rho_a)} \right)^{1/2}$	$d_{pc}$ = diámetro de partículas colectadas T= longitud de entrada al ciclón $\mu$ = viscosidad del aire $\rho_p$ = densidad del aire $\rho_a$ = densidad de partículas N= número de vueltas efectivas $V_i$ = velocidad de entrada del aire al ciclón	$d_{pc}= 07608 \mu m$
$\eta_j = \frac{1}{1+(d_{pc}/d_j)^2}$	$\eta_j$ = eficiencia para rango de partículas $d_{pc}$ = diámetro de partículas colectadas $d_j$ = diámetro promedio del rango	$\eta_j=47 803 \%$

Fuente: elaboración propia.

#### **5.4. Selección del sistema de filtros**

Aunque el ciclón sea de alta eficiencia, el porcentaje de partículas medias y ultrafinas es considerablemente alto, por lo que se hace necesario un sistema de filtrado adicional que capte estas partículas.

Con base en las eficiencias calculadas para el ciclón y del espectro particulado no captado, se realiza la selección de los dispositivos de filtración para que el aire pueda ser integrado a la atmósfera libre de partículas tóxicas y contaminantes.

Las partículas que pasan por los filtros tienen diámetros aerodinámicos inferiores a una micra y esta es la principal característica del espectro particulado que se debe considerar en la selección de los dispositivos de filtración, que por lo regular son filtros finos. Debido a sus características, la vida útil de estos filtros se acorta si son expuestos a partículas pesadas, aunque estas lleguen en mínimas cantidades, por esto se requiere diseñar un sistema de filtrado de doble fase.

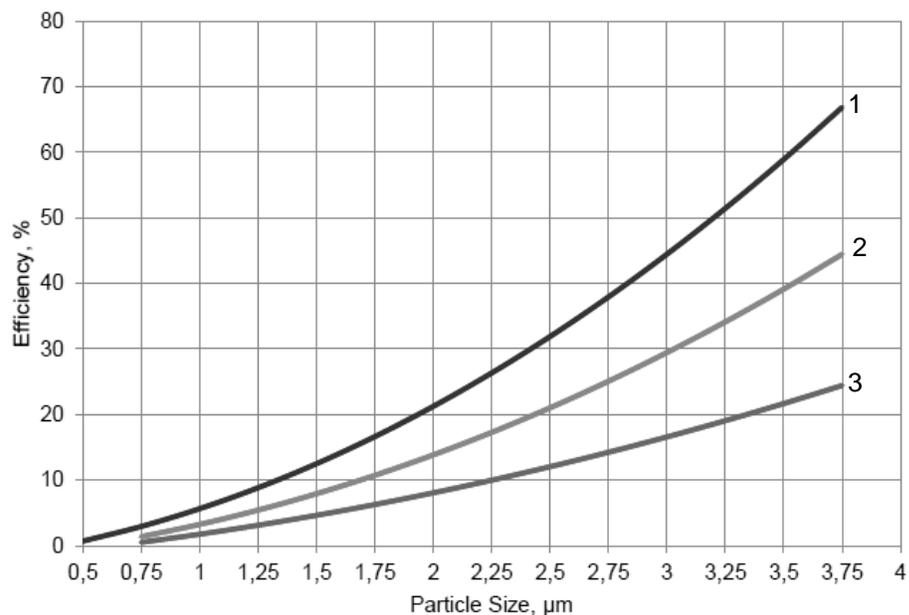
El sistema de filtrado de doble fase es bastante simple, únicamente se coloca un prefiltro y un ultrafiltro alineado. Para el diseño se escoge un prefiltro con las siguientes características:

- Fabricado de poliéster sintético alisado térmicamente.
- Los pliegues de los medios de filtrado están soportados por trazas delgadas de cola termofusible que mantienen el paquete de filtro firmemente en forma.

- El medio filtrante puede enmarcarse en cartón o plástico.
- Los medios filtrantes están diseñados específicamente para aplicaciones de prefiltración, permiten un flujo de aire estable a través del filtro y una baja pérdida de presión.
- Alta capacidad de retención de polvos.
- Alta constancia para la humedad.

Otra de las características a contemplar en el prefiltro es su curva de eficiencia, por lo que se presenta la que proporciona el fabricante:

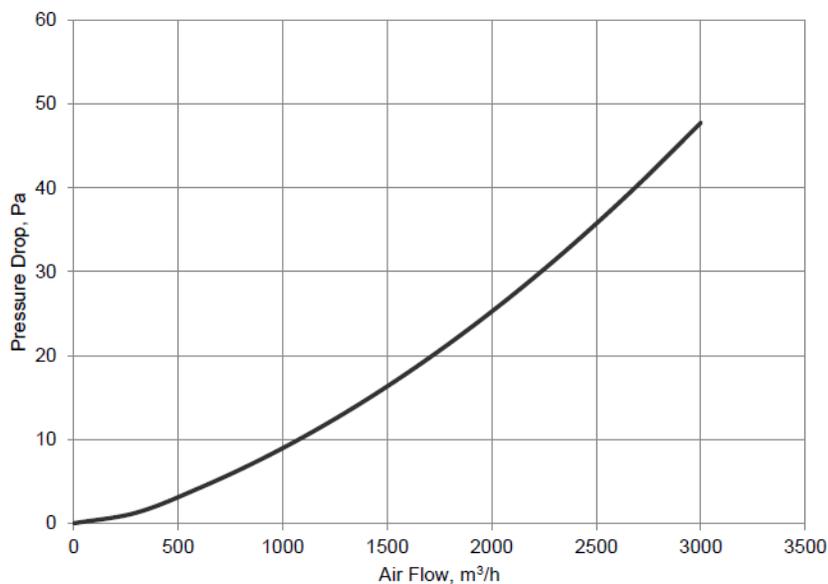
Figura 14. **Curva de eficiencias del prefiltro**



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 23.

Como se observa en la figura anterior, el eje horizontal presenta el diámetro aerodinámico de las partículas en micras, mientras que el eje vertical da a conocer la eficiencia porcentual. La curva 1 muestra la eficiencia con un flujo de 1 700 m<sup>3</sup>/h, la curva 2 con un flujo de 1 200 m<sup>3</sup>/h y la curva 3 con un flujo de 700 m<sup>3</sup>/h. Si se comparan las curvas se valida la dependencia de la eficiencia con el flujo y con la caída de presión, tal como se grafica en la siguiente figura:

Figura 15. **Caída de presión en función del caudal para el prefiltro**



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 23.

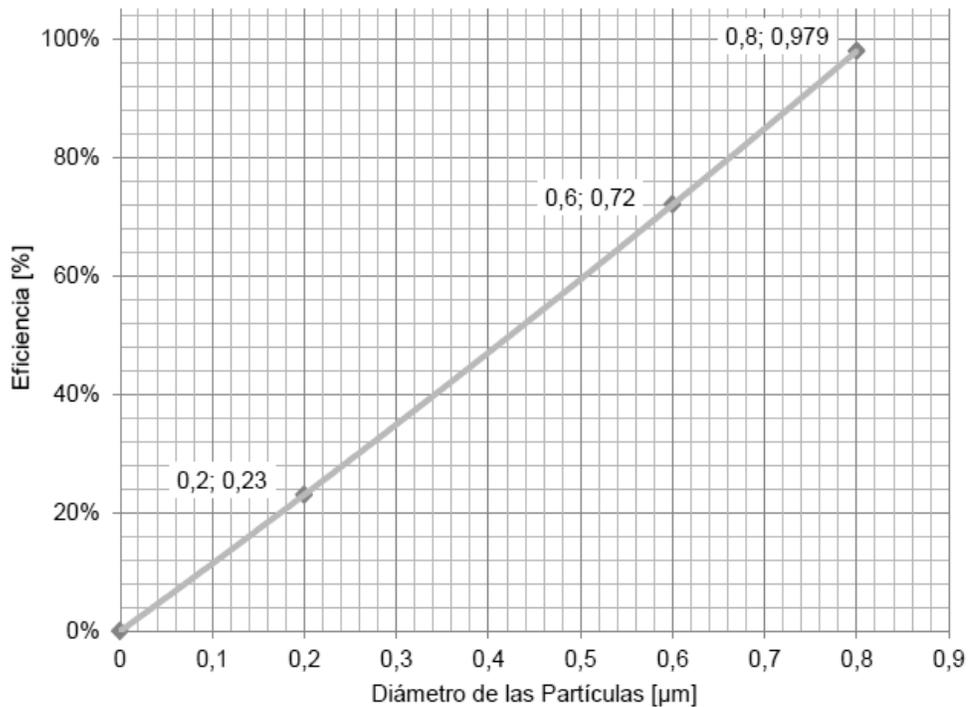
La principal función del prefiltro es la de brindarle protección al ultrafiltro, ya que este último es más propenso a taponamientos con partículas medias o pesadas que pueden generar una caída de presión en el sistema de ventilación. Se infiere que la zona de trabajo para el prefiltro está ubicada en la fracción de partículas con diámetros superiores a las 4 micras, en donde a pesar de tener una alta eficiencia en el ciclón, esta no alcanza el 100 %.

La segunda parte del sistema de filtrado es el ultrafiltro, para su diseño se escoge un ultrafiltro con las siguientes características:

- Filtro de clasificación H10 a U17, según clasificación de aplicación que proporciona el fabricante.
- Fabricada de microfibras de vidrio sintética, adecuada para unidades de ventilación que tienen espacios limitados para los filtros.
- Los pliegues de los medios de filtrado están soportados por trazas delgadas de cola termofusible que mantienen el paquete de filtro firmemente en forma.
- El medio filtrante está enmarcado por un marco de plástico.
- Medios filtrantes diseñados específicamente para aplicaciones de poca profundidad.
- Alta capacidad de retención de polvo, capta partículas de microdimensiones, indiscernibles para el ojo humano.
- Alta resistencia a la humedad.
- Entre su rango de operación se tiene una eficiencia inicial porcentual, distribuida de la siguiente forma:
  - 0,2 $\mu$ m-23 %
  - 0,6 $\mu$ m-72 %
  - 0,8 $\mu$ m-98 %

La eficiencia inicial porcentual que presenta el fabricante tiene un comportamiento gráfico como el que se muestra en la siguiente figura:

Figura 16. **Eficiencia del ultrafiltro**



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 32.

Se considera importante mencionar que el fabricante no proporciona información sobre el caudal utilizado para construir la curva, por lo que se puede utilizar el caudal de operación para realizar las estimaciones de la capacidad de captación.

Si se combinan los espectros de captación del ciclón y de los filtros, es posible calcular la eficiencia global del sistema, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IX. **Eficiencia global del sistema de filtración**

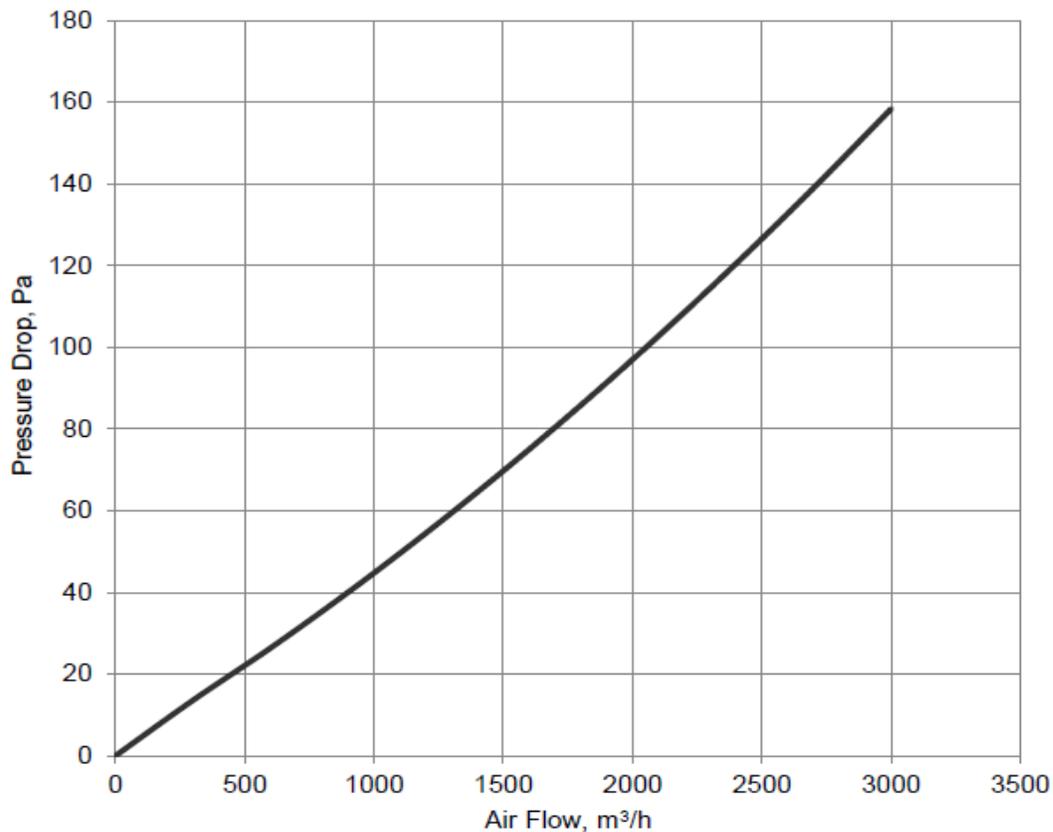
Rango	Promedio	Fracción de masa	Eficiencia ciclón	Eficiencia prefiltro	Eficiencia ultra-filtro	Eficiencia sistema
0,0625-0,1250	0,0938	11,34 %	1,50 %	0,00 %	10,67 %	1,361 %
0,1251-0,2500	0,1875	20,18 %	5,73 %	0,00 %	21,56 %	5,257 %
0,2501-0,5000	0,3750	13,83 %	19,55 %	0,00 %	43,96 %	7,596 %
0,5001-1,0000	0,7500	15,87 %	49,30 %	1,37 %	91,34 %	15,185 %
1,0001-2,0000	1,5000	9,98 %	79,54 %	7,91 %	100,00 %	9,977 %
2,0001-4,0000	3,0000	9,75 %	93,96 %	29,44 %	100,00 %	9,751 %
4,0001-8,0000	6,0000	9,98 %	98,42 %	100,00 %	100,00 %	9,977 %
8,0001-16,0000	12,0000	9,07 %	99,60 %	100,00 %	100,00 %	9,070 %
Eficiencia global:						<b>68,175 %</b>

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior muestra la capacidad de captación total del sistema, donde se toma en cuenta la eficiencia del ciclón, del prefiltro y el ultrafiltro. Los rangos de eficiencia en donde los filtros hacen un mayor aporte respecto al ciclón son resaltados con gris. También puede notarse que el sistema está bien diseñado, porque el ciclón asume la mayor carga de partículas con diámetros mayores a 2 micras y, como es de esperar, los filtros tienen la capacidad suficiente para el resto de partículas.

Ya con la eficiencia calculada se procede a estimar la caída de presión a lo largo del filtro que permita construir la curva del sistema, partiendo de la información que proporciona el fabricante e incluyendo todos los componentes asociados.

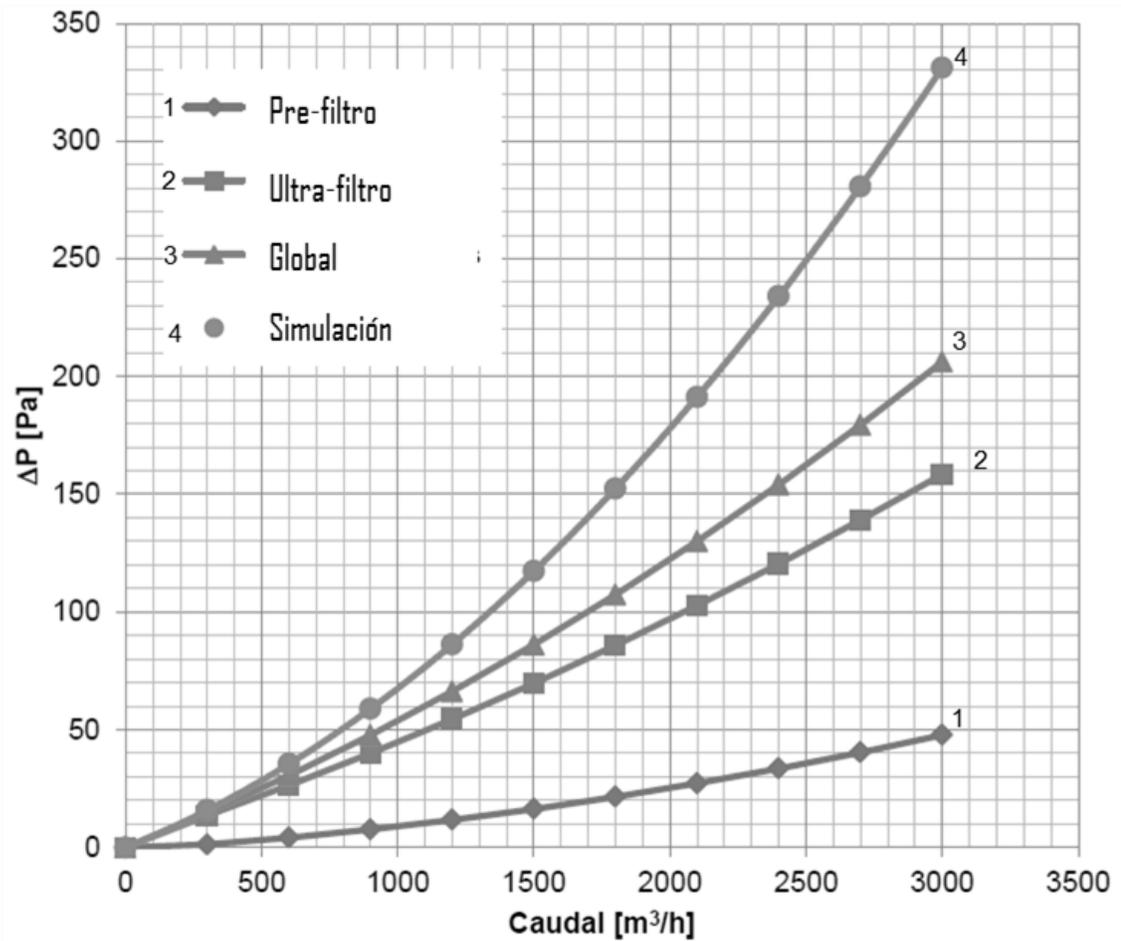
Figura 17. **Curva de caída de presión en función del caudal para el ultrafiltro**



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 32.

Aunque la información de la figura anterior es importante, también es necesario conocer más sobre el comportamiento del humo y de las partículas al interior del sistema. Para esto se pueden realizar simulaciones, agregando la información que proporciona el fabricante de los filtros. Por esto en la siguiente figura se muestra la simulación del sistema de filtración que permite incluir el comportamiento del aire al interior de los filtros, completando la información necesaria para la selección del impulsor del fluido.

Figura 18. Curva de simulación del sistema de filtración



Fuente: elaboración propia.

### 5.5. Selección del impulsador

Conforme al comportamiento establecido para el ducto, el ciclón y los filtros, se puede construir una tabla con información necesaria para trazar la curva del sistema completo que facilita la selección del impulsor. Dicha tabla se presenta a continuación:

Tabla X. **Caída de presión en función del caudal para el sistema**

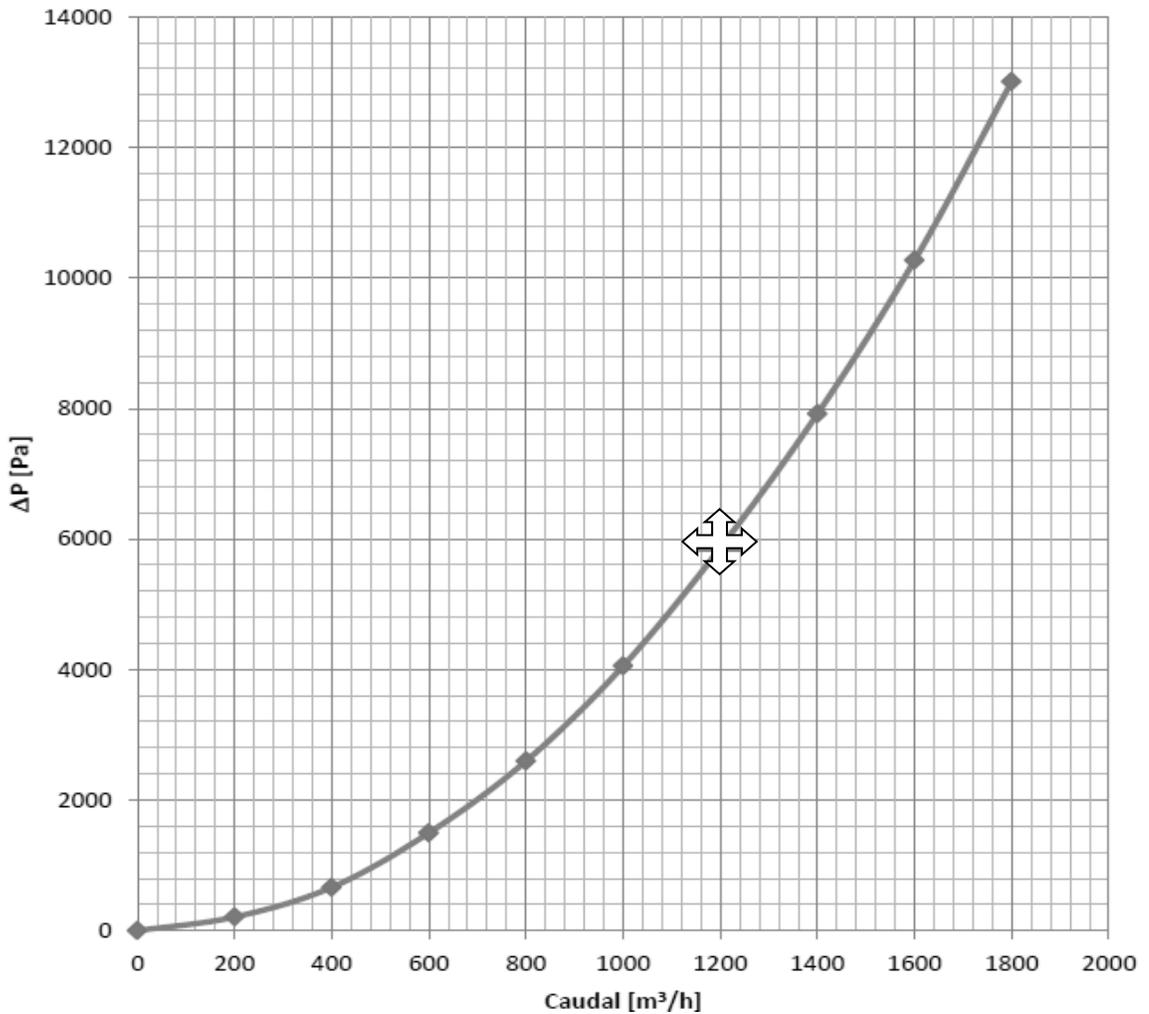
<b>Caudal Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Ducto ΔP (Pa)</b>	<b>Ciclón ΔP (Pa)</b>	<b>Filtros ΔP (Pa)</b>	<b>Total ΔP (Pa)</b>
0	0,00	0,00	0,00	0,00
200	11,48	188,09	10,16	209,74
400	48,00	594,44	21,95	664,39
600	102,32	1 359,84	35,45	1 497,61
800	193,35	2 354,29	50,66	2 598,30
1 000	277,61	3 709,26	67,59	4 054,47
1 200	429,96	5 347,62	86,23	5 863,81
1 400	555,81	7 254,62	106,58	7 917,01
1 600	678,51	6 460,34	128,65	10 267,50
1 800	867,04	11 985,40	152,43	13 004,84

Fuente: elaboración propia.

En la tabla se remarca la fila con el caudal de operación del sistema, el cual desde el inicio se establece en 1 200 m<sup>3</sup>/h, en el cual se tiene una caída de presión de 5 863,81 Pa.

Con esta información se construye la curva del sistema que se muestra en la siguiente figura. La demanda de cabeza es alta a un caudal relativamente reducido, por lo tanto el impulsor adecuado es un impulsor centrífugo. Con la curva del sistema se busca en los catálogos industriales un impulsor que se adapte a los requerimientos del sistema que proporcionen la mayor eficiencia posible.

Figura 19. Curva del sistema



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 33.

De acuerdo a las características deseadas para el sistema diseñado, se selecciona un impulsor CX 4 500 de Soler y Palau, con las características más relevantes listadas en la siguiente tabla:

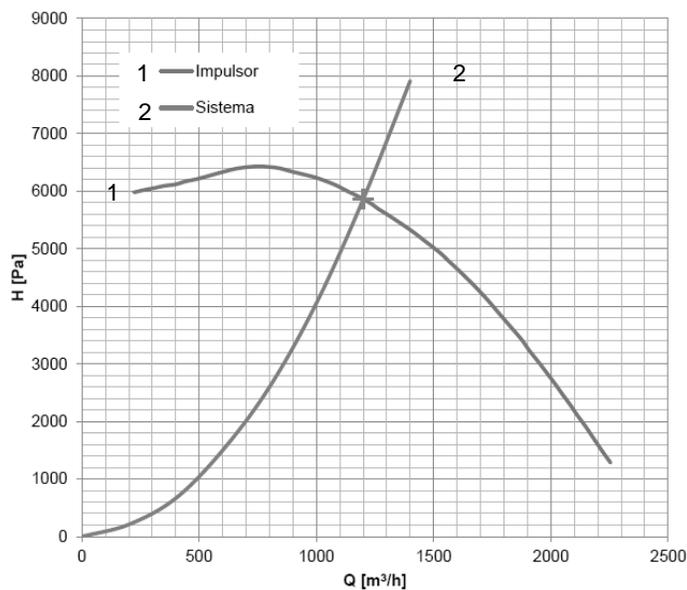
Tabla XI. **Datos técnicos del impulsor**

<b>Parámetro</b>	<b>Datos técnicos</b>
Modelo	CMC40
Fabricante	Soler & Palau
Tamaño nominal	400 mm
Diámetro nominal	400 mm
Velocidad de Giro	2 370 RPM
Punto de operación	1 200 m <sup>3</sup> /h
	5 864 Pa
Potencia demandada	3,4 kW

Fuente: elaboración propia.

Con base en la información que proporciona el fabricante, se sobrepone la curva del impulsor sobre la del sistema para verificar el punto de operación, lo cual se representa en la siguiente gráfica:

Figura 20. **Curva del sistema y del impulsor**



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 34.

Agrupando la información se debe realizar un análisis energético del dispositivo para establecer si el punto de operación corresponde al punto de desempeño óptimo. Para lograrlo se realizan los cálculos que determinan la eficiencia del dispositivo, a partir de la potencia adiabática y la curva de potencia real proporcionada por el fabricante; tomando además como referencia los datos en condiciones normales, es decir, 30 °C y 1 Atm.

En la siguiente tabla se muestra la información con los cálculos de las potencias adiabáticas y las eficiencias para los diferentes puntos a analizar.

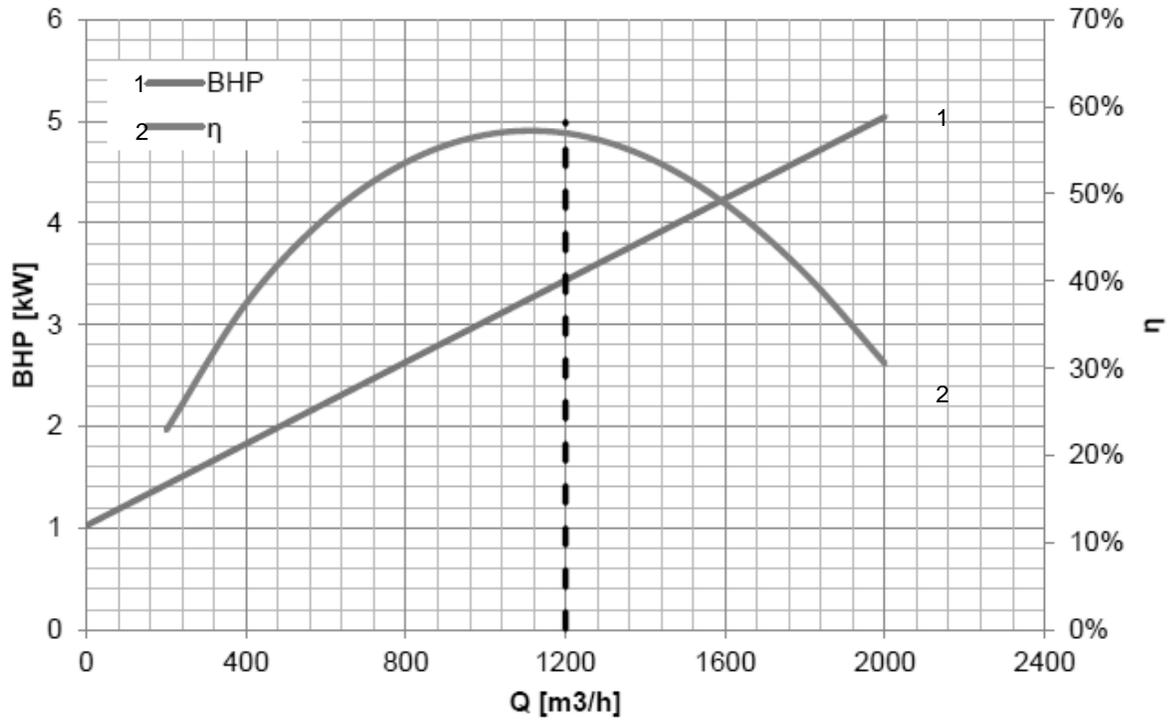
Tabla XII. **Cálculos de potencia y eficiencia del impulsor**

<b>Caudal Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H (Pa)</b>	<b>WHP (kW)</b>	<b>BHP (kw)</b>	<b>η</b>
0	5 510,07	0,00	1,02	0,00 %
200	5 882,90	0,33	1,43	22,89 %
400	6 174,35	0,68	1,83	37,45 %
600	6 345,36	1,06	2,23	47,30 %
800	6 365,73	1,41	2,63	53,60 %
1 000	6 214,08	1,72	3,03	56,78 %
1 200	5 877,83	1,96	3,44	56,97 %
1 400	5 353,26	2,08	3,84	54,29 %
1 600	4 645,45	2,07	4,24	48,86 %
1 800	3 768,34	1,90	4,64	40,85 %
2 000	2 744,65	1,54	5,04	30,53 %

Fuente: elaboración propia.

La información que se presenta en la tabla anterior sirve de base para la construcción de la siguiente gráfica, en la cual se representa la potencia y la eficiencia del dispositivo en un mismo plano:

Figura 21. Curvas de potencia y eficiencia para el impulsor



Fuente: Halton Product. *Catalogue for air filtration*. p. 35.

Utilizando como referencia la información cualitativa de la tabla y la información gráfica de la figura anterior, se puede afirmar que el punto de operación del sistema coincide con el punto de desempeño óptimo de impulsor. Esto respalda que la selección es correcta y que el diseño funcional de dispositivo está completo.

## **6. DISEÑO ESTRUCTURAL**

Es necesario determinar las características de la estructura que deben tomarse en cuenta para evitar inconvenientes en la instalación u operación del extractor de partículas de plomo en el sistema de fundición artesanal. Es importante cuidar que el diseño estructural complemente el diseño funcional, dando el soporte necesario a las personas que deseen implementar este tipo de dispositivos.

### **6.1. Consideraciones del diseño**

Recapitulando la información de las características funcionales del dispositivo, se presentan las siguientes consideraciones:

- La campana se ha diseñado para que se construya a partir de lámina calibre 18, que aproximadamente es de 1,21 mm de grosor.
- Los ductos tienen 1,5 m de longitud, son de PVC, livianos y de bajo costo.
- Para darle rigidez al tubo de aspiración se le diseñaron elementos estructurales que abrazan al tubo y se unen con tornillos de mariposa.
- Para el acople de campana se usa un simple acople articulado, mientras que para el acople del segundo ducto se diseña un conjunto que permita la rotación parcial del ducto completo.

- La capacidad de soporte de carga de los elementos es suficiente debido al peso mínimo de dichos elementos.
- El sistema de filtrado es de doble fase, incluye un prefiltro y un ultrafiltro que se colocan posteriormente al ciclón.

## 6.2. Diseño de la estructura de soporte

Es necesario definir el arreglo de los componentes antes de definir la estructura de soporte, con base en esto en la siguiente figura se muestra la disposición final de los elementos del extractor:

Figura 22. **Disposición final de los componentes del extractor**



Fuente: simulación CFD-AST de ingeniería.

El ciclón y la caja de filtros se conectan con tubo flexible de 100mm de diámetro, la caja de filtros se conecta al impulsor a través de un accesorio de aspiración que provee el fabricante, que es un conducto que viene listo para el montaje del ventilador. Con las medidas de este accesorio se perfora la tapa frontal de la caja de filtros del sistema.

Es indispensable cuidar la distancia entre la caja de filtros, que no debe ser menor de 30cm, por ser el espacio que se necesita para acomodar el ciclón y así obtener una configuración sólida. Se cuida que el ventilador no tenga reducciones ni cambios de trayectoria para minimizar las pérdidas. Sobre la configuración de la figura 22 se monta una estructura de tubería cuadrada de 2"X1"X0,4", la cual está sobrediseñada, aunque dimensionalmente corresponde con la contextura del sistema. Dicha estructura de soporte se presenta a continuación:

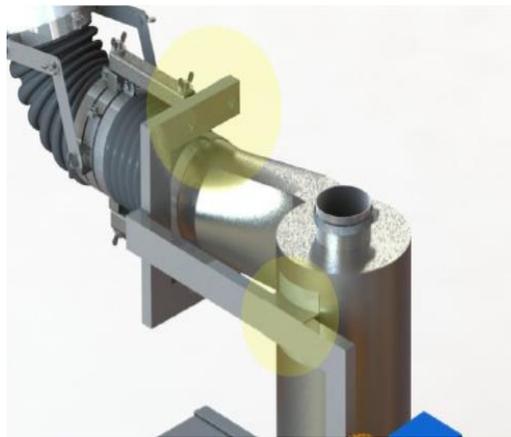
Figura 23. **Estructura de soporte para el extractor de humos**



Fuente: simulación CFD-AST de ingeniería.

En la base se coloca el ventilador y la caja de filtros, mientras que el brazo superior se sujeta el ciclón y el aspirador. Estas estructuras están sujetas al criterio del instalador, cuidando de no afectar el diseño funcional de cada elemento.

Figura 24. **Detalles de sujeción de los elementos de extractor**



Fuente: simulación CFD-AST de ingeniería.

Figura 25. **Extractor completo renderizado 1**



Fuente: simulación CFD-AST de ingeniería.

Figura 26. **Extractor completo renderizado 2**



Fuente: simulación CFD-AST de ingeniería.



## CONCLUSIONES

1. Las variables que afectan en la contaminación ambiental en el proceso de la fundición de plomo son: la falta de conciencia ambiental, mal manejo de la chatarra utilizada como materia prima, falta de extractores de humo, malos procesos en la fundición de plomo, espacios utilizados inadecuados y en su mayoría clandestinos, falta del cumplimiento de las leyes establecidas por el Ministerio de Ambiente en cuanto a monitoreo y sanciones respectivas a las fundidoras clandestinas.
2. Por la falta de educación sobre salud ocupacional, los fundidores ignoran los peligros y riesgos a los que está expuesta su salud, atribuyendo a tal consecuencia la falta de un adecuado equipo de protección personal. Pero el EPP adecuado para el proceso de fundición está compuesto por zapatos industriales con punta de acero, pantalón de lona, camisa manga larga, gabacha, lentes transparentes o careta con filtros de carbón activado, guantes de cuero y casco.
3. Para el diseño del extractor de humo se consideran muchas de las condiciones reales de los materiales como: la campana de absorción, los ductos o brazos de succión, el ciclón, la caja con sus filtros, el impulsor del ventilador y el soporte de todo el extractor. Es importante mencionar que los resultados obtenidos poseen la calidad requerida para obtener un diseño confiable.



## RECOMENDACIONES

1. Para informar sobre los riesgos de la operación inadecuada de las funciones de plomo, es importante la intervención del Ministerio de Ambiente y otras instituciones privadas o públicas que deseen contribuir con la disminución de la contaminación del ambiente en Guatemala, iniciando con la determinación de la cantidad de fundidoras artesanales clandestinas que operan en el país y culminando con la capacitación de todas las empresas que se dediquen a esta industria.
2. Implementar un plan de salud y seguridad ocupacional en las fundidoras de plomo artesanal, realizando evaluaciones periódicas sobre el buen uso del equipo de protección personal EPP, esto con el fin de minimizar los peligros y riesgos a los que se expone el personal involucrado en el proceso de fundición de plomo.
3. Con base en las dificultades encontradas a lo largo de la investigación, se considera necesario ampliar los resultados de este trabajo, desarrollando trabajos subsecuentes en el análisis de ciclones, sistemas de filtración, ductos y estructuras de sujeción adecuadas para este tipo de extractores.
4. Aunque el metal es un material accesible, también se puede utilizar fibra de vidrio como alternativa interesante en el diseño de los diferentes elementos que conforman el sistema.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *El mecanismo de cierre de la vena fluida durante los ensayos de fluidez de aleaciones Al-Cu diluidas*. Proyecto de investigaciones metalúrgicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 6 p.
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *ASHRAE Applications*. EEUU: ASHRAE, 2011. 34 p.
3. \_\_\_\_\_. *ASHRAE Fundamentals*. EEUU: ASHRAE, 2009. 36 p.
- 4.
5. \_\_\_\_\_. *ASHRAE systems and equipment*. EEUU: ASHRAE, 2016. 38 p.
6. BIEDERMANN, A.; HASSEKEFF, L. *Fundición del hierro y el acero*. Argentina: Montesó, 1957. 512 p.
7. Cosmos Online. *Empresa de compra y venta de plomo*. [en línea]. <<http://www.cosmos/producto/dh4z/plomo>>. [Consulta: 8 de septiembre de 2016].
8. ENNAN, A; KIRO, S.; OPRYA, M.; VISHNYAKOV, V. *Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of*

- shielded metal arc welding*. Journal of Aerosol Science, 64, 2013. 110 p.
9. Halton Air Filtration. *Product catalogue of air filtration*. [en línea]. <<http://pdf.archiexpo.com/pdf/halton/product-catalogue-air-filtration/527-158033.html>>. [Consulta: 8 de septiembre de 2016].
  10. LAPPLE, Charles. *Processes use many collector types*. Chemical Engineering, 58, 1951. 151 p.
  11. NAZROFF, William; ÁLVAREZ-COHEN, Lisa. *Gaseous emission-control technologies*. Air Quality Tecnology, 2006. 444 p.
  12. Organización Mundial de la Salud. *Daños y consecuencias en personas por ingestión de plomo*. [en línea]. <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>>. [Consulta: 8 de septiembre de 2016].

## APÉNDICES

### Apéndice 1. **Manipulación y transporte de baterías a un centro de acopio**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Almacenamiento de recipientes y plomo**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Almacenamiento de chatarra de plomo en sacos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Utensilios y herramientas convencionales en función**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Barras de plomo de una pulgada de diámetro obtenidas del proceso de fundición artesanal**



Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Anexo 1. Presupuesto

**INVERSIÓN PARA  
CAMPANA  
EXTRACTORA DE  
HUMOS DE  
FUNDICIÓN DE  
PLOMO**

Material	Unidades	Medidas	valor	Monto total	Observaciones
Ducto Flexible de 6" Diámetro	3	8"	Q185,00	Q555,00	Son Tipo Espirales, para uniones de tubos de PVC
Tubo PVC 6"	2	1,5 MTS	Q80,00	Q160,00	120 psi
Brazos de 3 cm. Con Perforación a 1 cm ambas Puntas, Sujeción de Ducto Flexible	8	16 CM	Q48,30	Q386,40	Son Hembras de 3cm de Ancho Por 1/8 Grosor
Brazo de 3 cm. Con Perforación a 1 cm ambas Puntas, Sujeción de Ducto Flexible	4	21 cm	Q57,50	Q230,00	Son Hembras de 3cm de Ancho Por 1/8 Grosor
Espaciador de sujeción de ducto flexible	6	6 "	Q16,00	Q96,00	Son Abrazaderas de cincho de 1" de Ancho
Abrazadera de Sujeción de ducto flexible	6	6"	Q18,00	Q108,00	Son Abrazaderas de cincho de 1" de Ancho
Guía donde irán ensamblados los brazos de sujeción de ducto flexible	6	6"	Q45,00	Q270,00	Son Abrazaderas de cincho de 1" de Ancho, esta lleva 2 puntos de anclaje
Brazo Cuadrado de 3cm Diámetro, con perforación de 1 cm	2	20 cm	Q25,00	Q50,00	Tubo cuadrado
Platina de Soporte	2	14 cm	Q65,00	Q130,00	Prefabricadas

Continuación del anexo 1.

<b>BOCA DE ASPIRACIÓN</b> lámina Calibre 18 Acero A-36, ancho de 25 cm	1	57,14 cm	Q30,00	Q30,00	Q15 Cada Pie
Tornillos de Mariposa para anclajes	24	3,1/2"	Q2,75	Q66,00	Tornillos Completos
<b>BASE CAJA DE FILTROS</b>	2	592x592x 48-96 (mm)	Q1,750	Q3,500,00	Base x altura x espesor en este caso son dos espesores distintos.
Lamina calibre 18 Acero A-36 ancho 35.3 cm	1	1,78 mts	Q75	Q75	Q15 Cada Pie
Tornillos Completo para anclaje de caja de Filtros	100	3/8" x 2"	Q1,15	Q115,00	Tornillo Completo
<b>TAPAS Y EMPAQUES DE FILTROS</b> Lamina Calibre 18 Acero A-36, Ancho 1.53 mts (Para 3 Tapaderas)	3	1,82 mts	Q90,00	Q270,00	Q15 Cada Pie
<b>PREFILTRO</b> Poliéster sintético enmarcado en plástico	1	592x592x 48 (mm)	Q275,00	Q275,00	Base x altura x espesor
<b>ULTRAFILTRO</b> Micro fibra de vidrio sintético. Filtro de clasificación H10	1	592x592x 96 (mm)	Q490,00	Q490,00	Base x altura x espesor
<b>CICLÓN</b> Lamina calibre 18 Acero A-36 de 24 cm de ancho	1	104,6 cms Largo	Q60	Q60	Q15 cada Pie
<b>MANO DE OBRA</b>	1	Por trato	Q3,750	Q3,750	Trazo, cortes de lámina y armado de estructura.
			<b>Total</b>	<b>Q10,616.40</b>	

Fuente: Ferretería J&L. Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

Anexo 2. **Cotización**

**MOTOR PARA EL  
FUNCIONAMIENTO DE LA  
CAMPANA EXTRACTORA DE  
PARTÍCULAS DE PLOMO**

EQUIPO	UNIDADES	VALOR	MONTO TOTAL	FOTOGRAFÍA
Motor 1.5 HP 3 420 RPM 120/230 V	1	Q797,16	Q797,16	
Motor 0.5 HP 1450 RPM 230/460 V	1	Q525,55	Q525,55	

Fuente: FPK S.A.

### Anexo 3. Características técnicas del prefiltro seleccionado

## PANEL COARSE FILTER

G4 W-line



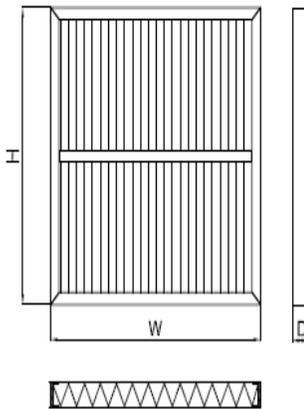
#### General characteristics

Coarse filters eliminate the largest impurities, such as pollen and sand dust, from indoor air. These filters can to some extent eliminate the impurities, which contain smoke and which can cause darkening.

#### Typical applications

Coarse filters can for primarily used as pre-filters in multistage filtering systems. These filters are also used as main filters e.g. in storage rooms and warehouses, where the requirements for the purity of indoor air are less demanding. Panel filters are suitable for ventilation units, which have limited space for filters.

#### Dimensions



#### Materials

Panel filters are manufactured of progressive thermally smoothed synthetic polyester having high dust holding capacity and high constancy for humidity. The filter media is framed by cardboard or plastic frame, which makes filters completely incinerable.

#### Operating range

Max. operating temperature: 80°C  
 relative humidity: Max. 100%  
 Final pressure drop  
 recommended for filter replacement: 200 Pa  
 Initial efficiency (2 mm, 1700m<sup>3</sup>/h): 50%

Halton code	Dimensions WxHxD mm	Filter class, EN779:2002	Flow rate		
			m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s	Pa*
ST-WF-P-592-592-48-v-U115-GF-	592x592x48	U15	1900	0,53	118
ST-WF-P-592-592-96-y-U15-GF-	592x592x96	U15	3400	0,94	177

Fuente: Halton product. *Catalogue for air filtration.*