

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN EXTRACTOR DE HUMOS DE SOLDADURA
PARA ESPACIOS CONFINADOS**

ROBERTO ESTEBAN SIERRA OROZCO

Director proyecto:

LUIS ENRIQUE ISAZA VELÁSQUEZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTADA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA**

2015

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN EXTRACTOR DE HUMOS DE SOLDADURA
PARA ESPACIOS CONFINADOS**

ROBERTO ESTEBAN SIERRA OROZCO

Trabajo de investigación para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

LUIS ENRIQUE ISAZA VELÁSQUEZ

Ingeniero Mecánico M.Sc.

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTADA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA**

2015

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Fue un largo y arduo camino para lograr esta meta y gracias a la ayuda de Dios ahora es una realidad. Agradezco a mis padres por la formación y valores inculcados como persona.

A mi esposa por su apoyo incondicional durante mis estudios, siempre animándome cuando se presentaban situaciones difíciles.

A la universidad por todos los conocimientos enseñados para esta nueva etapa profesional.

Dedico este trabajo de grado a todas las personas que por algún momento se preocuparon, me ayudaron y me animaron a la culminación de este proceso de formación profesional y por supuesto en especial a mi padre y mi madre, gracias totales.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. PRELIMINARES.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS	5
1.4 METODOLOGÍA.....	5
1.5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
2. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	10
2.1 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA.....	10
2.2 ESPACIOS CONFINADOS	13
2.3 INFORMACIÓN PREVIA PARA EL DISEÑO Y PARÁMETROS DE REFERENCIA	14
3. DISEÑO FUNCIONAL Y SIMULACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	20
3.1 BOCA DE ASPIRACIÓN	20
3.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL DUCTO	26
3.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CICLÓN.....	32
3.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FILTROS	50
3.5 SELECCIÓN DEL IMPULSOR	64
4. DISEÑO ESTRUCTURAL	70
4.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	70
4.2 DISEÑO CONSTRUCTIVO DE LA BOCA DE ASPIRACIÓN Y EL DUCTO ...	70
4.3 DISEÑO CONSTRUCTIVO DEL CICLÓN.....	75
4.4 DISEÑO CONSTRUCTIVO DE LA CAJA DE FILTROS.....	77
4.5 DISPOSICIÓN INTERNA DE LOS COMPONENTES	79
4.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE	89
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
6. BIBLIOGRAFÍA	95

7. ANEXOS 97

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que está en la necesidad de trabajar en el mejoramiento de su competitividad y capacidad tecnológica, así como en el desarrollo de una infraestructura acorde con sus necesidades. De allí que muchos sectores estratégicos requieran el desarrollo de mejores prácticas, entre ellos, la soldadura.

La soldadura siendo un proceso transversal a diversos sectores, como la construcción, la metalmecánica, la agroindustria, entre otros, requiere la implementación de mejores prácticas, sobre todo en salud e higiene ocupacional, dada la creciente demanda de soldadores a todos los niveles de la industria, los cuales, están expuestos a una amplia gama de enfermedades ocupacionales.

En este trabajo se propone el diseño de un dispositivo que permita extraer los humos de soldadura en espacios confinados y así garantizar las propiedades del aire requeridas para el consumo humano.

En este trabajo se utilizaron las tecnologías CFD para hacer el diseño y la simulación de los componentes del dispositivo, así como las herramientas CAD-CAE integradas en la suite de SolidWorks.

1. PRELIMINARES

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El estándar AWS-ANSI Z49.1 establece que se debe proveer una adecuada ventilación para la realización de cualquier trabajo de soldadura, corte de metales o actividades afines.¹ Esto con el fin de que los operarios que realicen las actividades mencionadas, no estén expuestos a concentraciones peligrosas de contaminantes gaseosos de la atmósfera de trabajo. Aparte de la protección respiratoria que debe tener cada operario, es necesario que el ambiente de trabajo cuente con los medios para poder evacuar o disminuir la concentración de los gases nocivos. Este último detalle presenta gran dificultad en los espacios confinados, los cuales deben tener disposiciones especiales para poder brindar seguridad respiratoria a los soldadores y al personal que se encuentra en estos lugares.

Según el estándar AWS-ANSI Z49.1, se define como espacio confinado a un lugar pequeño o con espacio restringido, como un tanque, caldera, recipiente a presión o compartimiento pequeño. El confinamiento implica ventilación pobre como resultado de las dimensiones, forma o características constructivas, además de la restricción para la salida del personal. El numeral 7 del estándar Z49.1 hace mención de los requerimientos particulares que deben tenerse en cuenta en los espacios confinados², los cuales se presentan a continuación:

- ✓ Debe garantizarse el suministro de oxígeno requerido para adecuada respiración.
- ✓ Debe evitarse la acumulación de gases tóxicos, asfixiantes, inflamables o explosivos.
- ✓ Deben evitarse atmósferas enriquecidas de oxígeno.

Frente a lo anteriormente mencionado, existen diversas variantes, como la dotación de los operarios con equipos especiales de respiración, no obstante, aunque se pueda garantizar un suministro de aire adecuado para la respiración

¹ AWS-ANSI Z49.1-2012 pág. 11

² AWS-ANSI Z49.1-2012 pág 28

con equipos de respiración autónoma, esto no evita que la atmósfera se contamine con los gases y la polución proveniente de los procesos de soldadura o corte, por lo cual se hace necesario implementar equipos de extracción que permitan reducir el contacto de los gases, vapores y humos contaminantes con el aire del espacio, a la vez que filtran y atrapan los contaminantes capturados para liberar aire en mejores condiciones.

Por las razones anteriormente descritas, se hace necesario trabajar en diseños y dispositivos que mejoren las condiciones de operación en espacios confinados, ya sea en eficiencia, costo o simplicidad.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Colombia es un país que está en la necesidad de trabajar en el mejoramiento de su competitividad y capacidad tecnológica, así como en el desarrollo de una infraestructura acorde con sus necesidades. De allí que muchos sectores estratégicos requieran el desarrollo de mejores prácticas, entre ellos, la soldadura. La soldadura siendo un proceso transversal a diversos sectores, como la construcción, la metalmecánica, la agroindustria, entre otros, requiere la implementación de mejores prácticas, sobre todo en salud e higiene ocupacional, dada la creciente demanda de soldadores a todos los niveles de la industria, los cuales, están expuestos a una amplia gama de enfermedades ocupacionales.

Ya en 1999 un artículo publicado en la revista internacional The Lancet por el doctor Manolls Kogevinas del Instituto de Investigación médica de Barcelona, revela que, en un estudio realizado en 12 países, en una población de 15.000 personas, entre los 15 y 44 años, reveló que entre el 10 y el 15% de los casos de asma en los países industrializados se debe a factores laborales. Adicionalmente, la tasa de crecimiento del asma es de un 2% anual, llegando en la actualidad a que 1 de cada 5 personas padecen esta enfermedad.

Los soldadores padecen asma principalmente por el material particulado que se desprende en los procesos de soldadura y corte, no obstante, la solidificación de sustancias suspendidas aporta para el desarrollo de esta patología y de otras aún más comunes entre ellos como la EPOC (Enfermedad Obstructiva Crónica), que

se define como una obstrucción crónica de los bronquios y que puede desencadenar enfisema y cáncer de pulmón.

A continuación se presenta una lista de las enfermedades más comunes en los soldadores relacionadas con los contaminantes típicos de los humos de soldadura y los procesos de corte o afilado de electrodos.

Tabla 1. Relación entre los contaminantes y las enfermedades

Enfermedades Contaminantes	Irritación tracto Respiratorio	Neumoconiosis	Asma	Hipoxia Celular	Daños en Otros Organos	Enfermedad Especifica del Material	Cáncer	Agente Teratógeno	Agente Radiactivo
Acroleína	X								
Aluminio	X	X	X						
Amianto	X	X					X		
Anhídrido carbónico					X	X			
Antimonio	X	X			X	X			
Bario	X	X			X	X			
Berilio	X	X			X	X	X		
Cadmio	X				X	X	X	X	
Cloruros	X		X						
Cobalto	X	X	X				X		
Cobre	X	X			X	X			
Colofonia	X		X						
Cromo	X		X		X	X	X		
Dióxido de nitrógeno	X		X		X	X			
Estaño	X	X							
Fluoruros	X		X			X			
Formaldehído	X		X				X		
Fosgeno	X								
Isocianatos	X		X				X		
Hierro	X	X							
Manganeso	X				X	X			
Monóxido de carbono				X	X	X		X	
Monóxido de nitrógeno	X			X					
Níquel	X		X				X		
Ozono	X		X		X	X			

Tabla 1: relación entre los contaminantes y las enfermedades (continuación)

Enfermedades Contaminantes	Irritación tracto Respiratorio	Neumoconiosis	Asma	Hipoxia Celular	Daños en Otros Órganos	Enfermedad Específica del Material	Cáncer	Agente Teratogéno	Agente Radiactivo
Plomo					X	X		X	
Titanio		X							
Torio	X				X	X	X		X
Vanadio	X	X	X		X	X	X	X	
Zinc	X		X		X	X			

Fuente: Elaboración propia a partir de la bibliografía

Con la información anteriormente presentada, aparece una preocupación: la creciente informalidad en el trabajo, la cual, hace que muchos operarios de soldadura trabajen bajo condiciones peligrosas, exponiéndose sobre todo a la inhalación de humos y vapores nocivos para la salud.

Algunos talleres artesanales están ubicados en locales reducidos, tienen las características de ventilación propias de los espacios confinados, aumentando la toxicidad de la atmósfera y por ende los riesgos para la salud.

Según la caracterización ocupacional realizada por el SENA para el sector de la soldadura, el 29% de las empresas que se dedican a esta área son microempresas, de las cuales el 15% son personas naturales. Esta información sólo cubre las empresas formales, sin tener en cuenta las informales que no se encuentran registradas. Aunque en el documento se menciona que el 83% de los soldadores usan protección respiratoria, específicamente mascarillas con filtro, no se hace ninguna referencia a equipos de extracción, los cuales son más eficaces en condiciones de confinamiento o baja ventilación.

En cuanto a la ubicación de estas empresas, el 17% se encuentran en sectores residenciales, en los cuales normalmente no se hace sencilla o apropiada la instalación de redes de extracción para los humos de soldadura.

Tomando en cuenta todos los elementos anteriormente mencionados y que el precio de los extractores de humos portátiles en el mercado oscila entre los

US\$ 1500 y US\$ 3000, se hace necesario hacer un diseño que pueda construirse en los mismos talleres de soldadura y que permita tener a los operarios condiciones de trabajo menos lesivas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General. Diseñar y simular a través de software un extractor de humos que pueda utilizarse en aplicaciones de espacios confinados para procesos soldadura y corte.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- ✓ Determinar los requerimientos operativos del extractor a partir del dimensionamiento de la aplicación y los requerimientos técnicos establecidos por la guía AWS F 3.2³ y los documentos ASHRAE Fundamentals [1], ASHRAE Applications [2] y ASHRAE Systems and Equipment [3].
- ✓ Diseñar el sistema de extracción de humos a partir de los lineamientos presentes en los documentos técnicos referenciados en el objetivo anterior.
- ✓ Validar la efectividad del diseño del dispositivo a través de simulación del sistema anteriormente mencionado y sus componentes.
- ✓ Refinar y ajustar los diseños del extractor utilizando los resultados obtenidos en las simulaciones con el fin de obtener un diseño más eficiente y efectivo.

1.4 METODOLOGÍA.

La metodología que se aplicó para la realización del proyecto consta de las siguientes etapas:

³ AWS 3.2/3.2M 2001: Ventilation Guide for Weld Fume

- ✓ **Determinación de Condiciones de Operación y Requerimientos:** en esta fase, se acotó el diseño con base a los requerimientos de los estándares utilizados como referencia.
- ✓ **Prediseño y Configuración Inicial:** con los datos anteriormente determinados, se hizo un prediseño, el cual se validó de manera previa la funcionalidad, la estructura y los parámetros de la simulación.
- ✓ **Simulación:** en esta fase se hicieron las verificaciones del diseño de los distintos componentes, pérdidas, velocidades de transporte, captación y funcionalidad del equipo. Adicionalmente se recolectó información acerca del desempeño esperado del equipo en conjunción con todos los elementos.
- ✓ **Diseño Final y Resultados:** en esta fase, se depuró el diseño a partir de los datos de las simulaciones, consolidando el diseño final y estableciendo la viabilidad constructiva.

1.5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.5.1 Ecuaciones de trabajo de los CFD: para este proyecto se utilizó software CFD (Computational Fluid Dynamics), para la resolución de las ecuaciones de flujo y energía asociadas al fluido que transita a lo largo del dispositivo. El paquete utilizado fue SolidWorks Fluid Simulation 2012, licenciado para la Universidad Tecnológica de Pereira. Los CFD operan partiendo de la ecuación de *Navier-Stokes* para el flujo laminar y turbulento; dichas ecuaciones se aplican para diversas condiciones, por lo cual en algunos casos deben ser afectadas o modificadas para facilitar su resolución, como por ejemplo la ecuación de *Navier-Stokes* promediada por *Favre*, la cual se usa cuando los efectos de la turbulencia promediados en el tiempo se consideran en combinación con los demás.

Para lograr una simulación tridimensional, es necesario trabajar con un marco referencial tridimensional, en donde se plantean las ecuaciones de conservación de la masa, el momentum y la energía. Para un sistema cartesiano que gira a una velocidad angular Ω , con el eje x atravesando el origen, las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

En donde u es la velocidad del fluido, ρ es la densidad, S_i es la fuerza externa distribuida sobre la masa del fluido debido a la resistencia del medio poroso o la fuerza de boyamiento; h es la entalpía, Q_H es el calor por unidad de volumen, τ_{ik} es el tensor de esfuerzos viscosos y q_i es el flujo de calor difusivo.

Ahora bien, para los fluidos newtonianos, el tensor de esfuerzos viscosos se define a continuación:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

En donde μ es la viscosidad del fluido.

Para el modelado del extractor, lo que se hará será fraccionar el sistema para poder disminuir la carga de cómputo. Debido a que no hay fenómenos en los que las velocidades sean muy altas o análisis para fluidos especiales, las ecuaciones que deben usarse están incluidas dentro de los programas a usar. Es importante mencionar que los filtros se simularán como medios porosos, que presentan una resistencia al flujo dependiendo de las dimensiones de sus poros.

1.5.2 Solución numérica en los CFD: las ecuaciones anteriormente descritas, están formuladas desde una concepción infinitesimal. No obstante, para poder resolverlas de modo numérico, es necesario discretizarlas, partiendo de la creación de un dominio computacional.

Las fronteras del modelo se establecen a través de límites físicos o imaginarios que delimitan el campo de cálculo. Este dominio computacional, al cual se le han aplicado condiciones de frontera, se subdivide en pequeñas fracciones cúbicas o tetraédricas, las cuales, establecerán un cierto número de elementos sobre los cuales se aplicará una solución. El encadenamiento de cada solución puntual, la cual se compara con un parámetro de referencia llamado tolerancia, es el que genera la solución esperada para las ecuaciones planteadas sobre el dominio computacional. Los métodos que se utilizan para la resolución de estos sistemas de ecuaciones son básicamente iterativos y algoritmos “*multigrid*” los cuales son aplicados a sistemas de ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales o multidimensionales.

1.5.3 Documentación de Referencia: para que el diseño del dispositivo estuviese sustentado en principios lo suficientemente válidos, se utilizaron como referentes los criterios establecidos en la siguiente documentación técnica:

- ✓ AWS-ANSI F3.2M/F3.2:2001. Ventilation Guide for Weld Fume de la AWS [4], capítulos 4 al 7.
- ✓ Industrial Gas Cleaning and Air Pollution Control, capítulo 30 del manual HVAC Systems and Equipment de la ASHRAE⁴ [3].
- ✓ Duct Design, capítulo 35 del manual Fundamentals de la ASHRAE [1].
- ✓ Duct Construction, capítulo 19 del manual HVAC Systems and Equipment de la ASHRAE [3].
- ✓ Fans, capítulo 21 del manual HVAC Systems and Equipment de la ASHRAE [3].

⁴ Estos documentos han sido seleccionados porque la guía F3.2M/F3.2-2001 de la AWS hace mención directa de ellos como referentes para el diseño de sistemas de extracción y gestión de humos de soldadura.

- ✓ Air Cleaners for Particulate Contaminants, capítulo 29 del manual HVAC Systems and Equipment de la ASHRAE [3]

Adicionalmente, algunos requerimientos específicos concernientes a los espacios confinados serán extractados de las normas API 653; API 2015 y 2016.

2. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

2.1 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA

El estándar de F3.2M-3.2 (2001) de la AWS, establece que los sistemas de extracción localizada son los sistemas que tienen una mayor relación costo efectividad, especialmente cuando no se usa la recirculación. Así mismo, los sistemas de extracción localizada permiten maximizar la efectividad del flujo del aire.

Los sistemas de extracción localizada, sean fijos o portátiles, capturan los contaminantes muy cerca de la fuente, sin embargo, estos sistemas son efectivos siempre y cuando su diseño, instalación, operación y mantenimiento sean correctos.

En general, todos los sistemas de extracción localizada constan de los siguientes elementos:

- ✓ Campana Extractora (de captura)
- ✓ Sistemas de ductos
- ✓ Dispositivos de limpieza de aire
- ✓ Ventilador
- ✓ Ductos de descarga

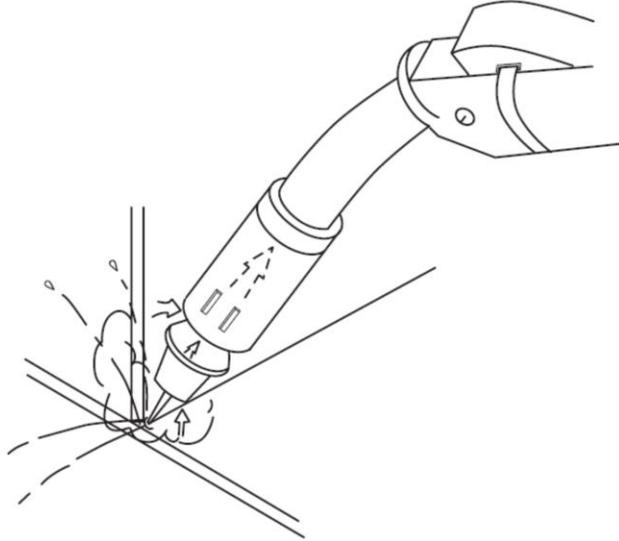
Estos elementos deben ser diseñados específicamente para cada aplicación. Estos deben extraer el humo sin perturbar el proceso de soldadura, por ejemplo, la velocidad de captación de los humos debe ser tal que no afecte la atmósfera creada por los gases de protección de la soldadura.

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, citados los el estándar AWS F3.2M-F3.2 del 2001:

- ✓ Pistola de soldadura con extractor integrado.
- ✓ Captador por tobera de alto vacío.
- ✓ Brazos de extracción flexibles

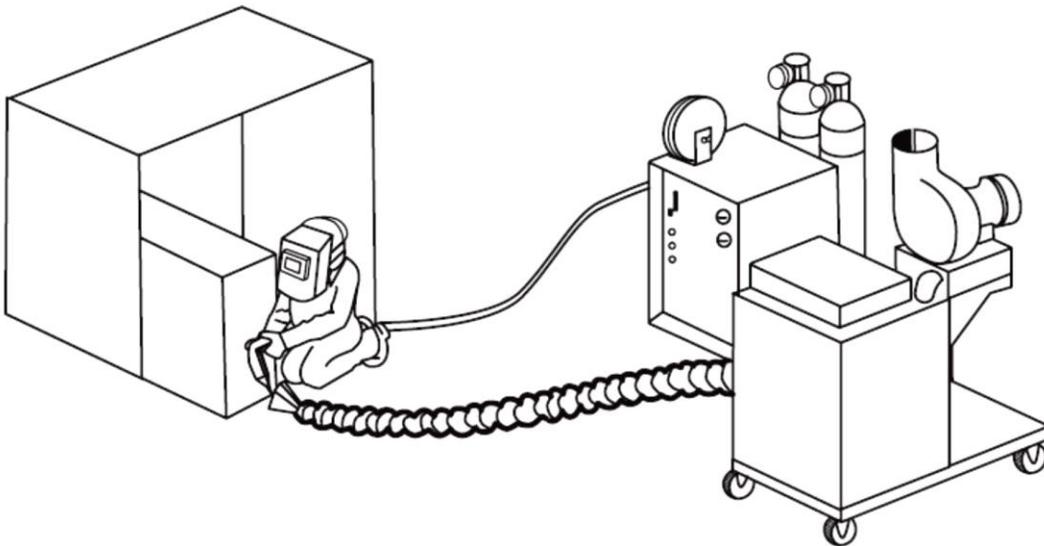
- ✓ Campana de extracción fija

Figura 1. Pistola de soldadura con extractor integrado



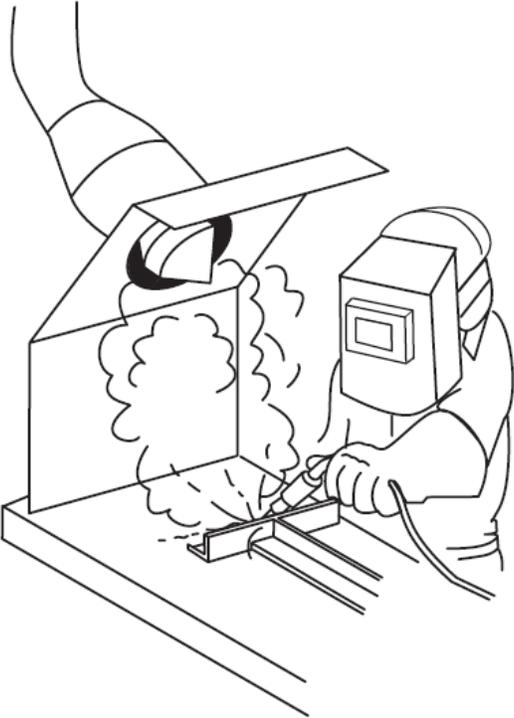
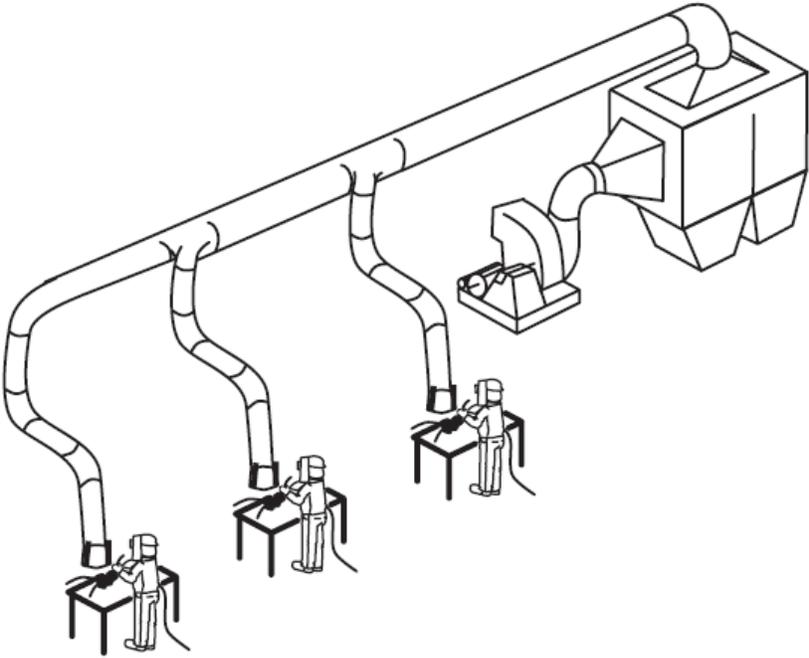
Fuente: AWS F3.2M-3.2 pág. 5

Figura 2. Captador por tobera de alto vacío



Fuente: AWS F3.2M-3.2 pág. 5

Figura 3. Brazos de extracción flexibles



Fuente: AWS F3.2M-3.2 pág. 6

Para cada configuración, existen algunos valores de referencia en cuanto al flujo de aire y requerido en la tabla 2 se presentan estos valores acompañados de algunos comentarios relativos a cada tipo de dispositivo de extracción:

Tabla 2. Valores típicos de flujo de aire para algunos sistemas de extracción localizada

Sistema	Flujo de Aire Típico (m ³ /h)	Comentario
Pistola de soldadura con extractor integrado	50-100	Extrae el humo de la zona de soldadura con pistolas de FCAW y GMAW
Captador por tobera de alto vacío	150-300	Permite posicionamiento por parte del soldador.
Brazos de extracción flexible	900-1400	Mueven un volumen de aire mayor, permiten la ubicación y reubicación por parte del soldador.
Campana de extracción fija	2500-3000	Usada para la captura sobre cabeza en locaciones fijas.

Fuente: AWS F3.2M-3.2 pág. 4

La información anteriormente descrita debe contrastarse con los requerimientos específicos de los espacios confinados, con el propósito de tener una base de decisión sólida para el diseño previo del dispositivo.

2.2 ESPACIOS CONFINADOS

Tal como se mencionó en el capítulo uno, el estándar AWS-ANSI Z49.1, define como espacio confinado a un lugar pequeño o con espacio restringido, como un tanque o compartimiento pequeño. El confinamiento implica ventilación pobre como resultado de las dimensiones, forma o características constructivas, además de la restricción para la entrada y salida del aire y del personal. El numeral siete del estándar Z49.1 hace mención de los requerimientos particulares que deben tenerse en cuenta en los espacios confinados¹, los cuales se presentan a continuación:

¹ AWS-ANSI Z49.1-2012 pág 28

- ✓ Deben garantizarse condiciones de respiración adecuada, sea a través de ventilación o equipos de respiración autónoma.
- ✓ Debe evitarse 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.
- ✓ Deben evitarse atmósferas enriquecidas de oxígeno, dado que los contenidos elevados de oxígeno son propensos a la ignición espontánea de aceites, grasas u otras sustancias.

Para afrontar las exigencias anteriores, existen diversas variantes, como la utilización por parte de los operarios de equipos especiales de respiración, no obstante, aunque se pueda garantizar un suministro de aire adecuado para el consumo humano, esto no evita que la atmósfera se contamine con los gases y la polución proveniente de los procesos de soldadura o corte, por lo cual se hace necesario implementar equipos de extracción que permitan reducir el contacto de los gases, vapores y humos contaminantes con el aire del espacio, a la vez que filtran y atrapan los contaminantes capturados para liberar aire en mejores condiciones.

2.3 INFORMACIÓN PREVIA PARA EL DISEÑO Y PARÁMETROS DE REFERENCIA

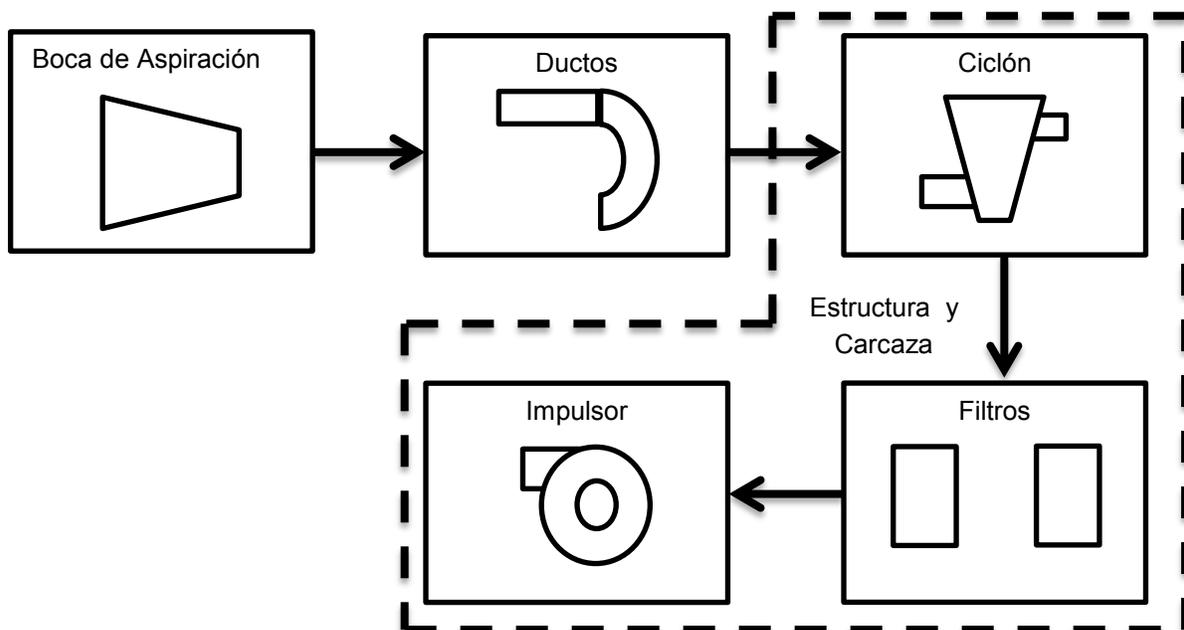
2.3.1 Configuración Topológica: de los tipos de dispositivos presentados en las figuras anteriores y en conjunción con los requerimientos de los espacios confinados se determina que el diseño más adecuado es el de tobera de alto vacío. Algunas de las ventajas de este sistema son:

- ✓ Es un dispositivo portátil, fácil de operar y de ubicar.
- ✓ Gracias a que la expulsión de los gases se da fuera del espacio confinado, no afecta la atmósfera del mismo, evitando la concentración de gases o la escasez de oxígeno.

- ✓ Su uso no está restringido únicamente a los espacios confinados pues puede ser utilizado en un puesto de trabajo al interior de un taller o en espacio abierto, lo cual lo hace un equipo multifuncional

A partir de la información presentada anteriormente, se piensa en un esquema funcional del dispositivo para extracción localizada en espacios confinados con la distribución de componentes presentada en la figura 4.

Figura 4. Diagrama de bloques del dispositivo:



2.3.2 Parámetros de Referencia: para poder hacer un dimensionamiento previo de los componentes descritos en el esquema inmediatamente anterior, es necesario partir de las recomendaciones técnicas provistas por los estándares de la AWS y la ASHRAE. El diseño parte de la boca de aspiración, para lo cual se requieren los parámetros de velocidad de captación de los humos de soldadura. Esta velocidad viene descrita en la tabla 1 del capítulo 32 del ASHRAE APPLICATIONS, la cual se presenta a continuación:

Tabla 3. Rango de velocidades de captura

Table 1 Range of Capture (Control) Velocities

Condition of Contaminant Dispersion	Examples	Capture Velocity, m/s
Released with essentially no velocity into still air	Evaporation from tanks, degreasing, plating	0.25 to 0.5
Released at low velocity into moderately still air	Container filling, low-speed conveyor transfers, welding	0.5 to 1.0
Active generation into zone of rapid air motion	Barrel filling, chute loading of conveyors, crushing, cool shakeout	1.0 to 2.5
Released at high velocity into zone of very rapid air motion	Grinding, abrasive blasting, tumbling, hot shakeout	2.5 to 10

Fuente: ASHRAE APPLICATIONS p. 32.3

Con esta información, se tiene un referente pues de manera indirecta, se infiere el caudal, dado que el caudal que manejará el equipo es el producto de la velocidad a la entrada de la boca de aspiración por el área de la misma. De igual forma, el caudal de aspiración depende de las velocidades que se deseen a las diferentes distancias de la boca. Como valor de referencia se toman cuarenta centímetros, que es una distancia cómoda de trabajo. Esto implica que el caudal de aire será satisfactorio si a los cuarenta centímetros de distancia de la boca de aspiración se alcanza un valor de velocidad entre 0,5 y 1 m/s, que es lo que sugiere la norma.

Después de diseñar la boca de aspiración, se diseñarán los ductos, los cuales deben tener codos elásticos para poder posicionar la boca de aspiración en donde se desee. Para poder estimar los valores de las pérdidas y determinar si los valores son los adecuados, se tomará como referencia la tabla F1, del estándar AWS F3.2M, la cual se presenta a continuación:

Tabla 4. Coeficientes de pérdida típicos para ductos flexibles

Table F1			
Pressure Loss Coefficients for Typical Flexible Welding Fume Extraction Arms			
(Experiments were conducted in 1994 at the Bioenvironmental Engineering Research Laboratory of the University of Illinois at Urbana, on request from AWS) ⁽¹⁾			
No.	Extraction Arm Type	Average Pressure Loss Coefficient $\xi^{(2)}$	Airflow Rate m ³ /h [cfm]
1	150 mm ID [6 in.] welding arm with a 3 m [10 ft] full-length flexible hose	25.5	425–680 [250–400]
2	160 mm ID [6.3 in.] welding arm with a full-length flexible hose	12.5–18	680–850 [400–500]
3	160 mm ID [6.3 in.] 3–4 m [10–14 ft] welding arm with a two sectional rigid ducts	4.7	680–1530 [400–900]
4	160 mm ID [6.3 in.] welding arm with one section 3–5 m [10–16 ft] rigid arm and one section 2 m (8 ft) flexible hose	12.3	680–1190 [400–700]
5	180 mm ID [7 in.] welding arm with a 3 m [10 ft] full length flexible hose	13.8	680–1190 [400–700]
6	200 mm ID [8 in.] welding arm with a 3 m [10 ft] full length flexible hose	9.0	850–1530 [500–900]
7	200 mm ID [8 in.] welding arm with 3 m [10 ft] two rigid duct sections	11.1	850–1530 [500–900]

Fuente: Tabla F1 Standard AWS F3.2

En la tabla se señala la fila 3, la cual tiene los valores para el ducto que utilizará como referente al diseño, lo cual implica que su topología será de 160 mm de diámetro (6”) y constará de dos ductos rígidos entre 1,5 y 3 m los cuales estará acoplados por medio de tubería flexible corrugada.

El siguiente paso en el diseño del dispositivo, será la selección y el diseño de los medios de filtración. Cabe anotar que el propósito es desarrollar una solución accesible a las microempresas, por lo tanto este diseño pretende implementar métodos eficaces pero lo suficientemente simples y económicos como para ser construidos en cualquier microempresa metalmecánica de la región. Desde esta perspectiva se consulta la bibliografía técnica de referencia concerniente al filtrado de la polución industrial del aire, con lo cual se encuentra que los estándares más adecuados se encuentran en el documento ASHRAE HANDBOOK HVAC SYSTEMS AND EQUIPEMENT. Dentro de este documento, el capítulo referente a la filtración y la remoción de la polución industrial es el capítulo 30. Este capítulo sienta las directrices para la selección y construcción de sistemas de filtrado y remoción de la polución del aire. Como parámetro previo se tomó la tabla 3 de la página 30.3 del manual, en la cual se resumen los principales dispositivos para la remoción de material particulado en el aire:

Tabla 5. Medidas de desempeño para dispositivos de limpieza de aire

Table 3 Measures of Performance for Gas-Cleaning Equipment

Type of Particle Collector	Particle Diameter, ^a μm	Max. Loading, g/m^3	Collection Efficiency, % by mass	Pressure Loss		Utilities per m^3/s (gas)	Comparative Energy Requirement	Superficial Velocity, ^b m/s	Capacity Limits, m^3/s	Space Required (Relative)
				Gas, Pa	Liquid, kPa					
Dry inertial collectors										
Settling chamber	>40	>10	50	25 to 125	—	—	1	1.5 to 3.0	None	Large
Baffle chamber	>20	>10	50	125 to 625	—	—	1.5	5.0 to 10	None	Medium
Skimming chamber	>20	>2	70	<250	—	—	3.0	10 to 20	25	Small
Louver	>10	>2	80	75 to 500	—	—	1.5 to 6.0	10 to 20	15	Medium
Cyclone	>15	>2	85	125 to 750	—	—	1.5 to 9.0	10 to 20	25	Medium
Multicyclone	>5	>2	95	300 to 2300	—	—	6.0 to 20	10 to 20	95	Small
Impingement	>10	>2	90	250 to 500	—	—	3.0 to 6.0	10 to 20	None	Small
Dynamic	>10	>2	90	Provides pressure	—	0.75 to 1.5 kW	10 to 20	—	25	—
Electrostatic precipitators										
High-voltage	>0.01	>0.2	99	50 to 250	—	0.1 to 0.6 kW	0.8 to 2.0	0.3 to 2.0	5 to 940	Large
Low-voltage	>0.001	1	90 to 99	50 to 125	—	0.03 to 0.06 kW	0.5 to 1.0	1.0 to 3.5	0.5 to 50	Medium
Fabric filters										
Baghouses	>0.08	>1	99	500 to 1500	—	—	6.0 to 20	0.005 to 0.10	95	Large
Cartridge filters	>0.05	>0.2	99+	500 to 2000	—	—	—	0.0025 to 0.025	20 to 25	Medium
Wet scrubbers										
Gravity spray	>10	>2	70	25 to 250	140 to 690	70 to 270 L/s	5.0	0.5 to 1	50	Medium
Centrifugal	>5	>2	90	500 to 2000	140 to 690	0.14 to 1.4 L/s	12 to 26	10 to 20	50	Medium
Impingement	>5	>2	95	500 to 2000	140 to 690	0.14 to 0.7 L/s	9.0 to 31	15 to 30	50	Medium
Packed bed	>5	>0.2	90	125 to 2500	35 to 210	0.7 to 70 L/s	4.0 to 34	0.5 to 1.5	25	Medium
Dynamic	>2	>2	95	Provides pressure	35 to 210	0.14 to 0.7 L/s, 2.25 to 15 kW	30 to 200	15 to 20	25	Small
Submerged orifice	>2	>0.2	90	500 to 1500	None	No pumping	9.0 to 21	15	25	Medium
Jet	>2	>0.2	90	Provides pressure	345 to 610	7 to 14 L/s	15 to 30	10 to 100	50	Small
Venturi	>0.1	>0.2	95 to 99	2500 to 15 000	70 to 210	0.4 to 1.4 L/s	30 to 300	60 to 210	50	Small

Fuente: ASHRAE HANDBOOK HVAC SYSTEMS AND EQUIPMENT p. 30.3

Las opciones demarcadas en la tabla son las que se tendrán en cuenta de manera inicial. Los ciclones son de fácil construcción y permiten atrapar contaminantes de granulometría alta y baja, dependiendo de su densidad, además son prácticamente libres de mantenimiento. Se considera colocar un ciclón antes de los baffles de filtros con el fin de reducir la carga para estos últimos. Como se tiene presente la idea de reducir costos en la construcción y los costos operativos, se considera que estos dos elementos son los primeros a tener en cuenta para el diseño.

Luego de tener un diseño de la boca de aspiración, los ductos y los sistemas de filtrado, es necesario seleccionar el impulsor, esto se hace con los criterios establecidos en el capítulo 35 del ASHRAE FUNDAMENTALS. Con el impulsor, los sistemas de filtrado y los ductos listos, se hace un diseño estructural para contener y agrupar cada dispositivo, así como la armazón para la rigidización del ducto de aspiración.

El proceso de diseño utilizado está establecido de la siguiente forma: diseño preliminar (basado en los datos de entrada), validación a través de CFD, refinación del diseño y presentación final.

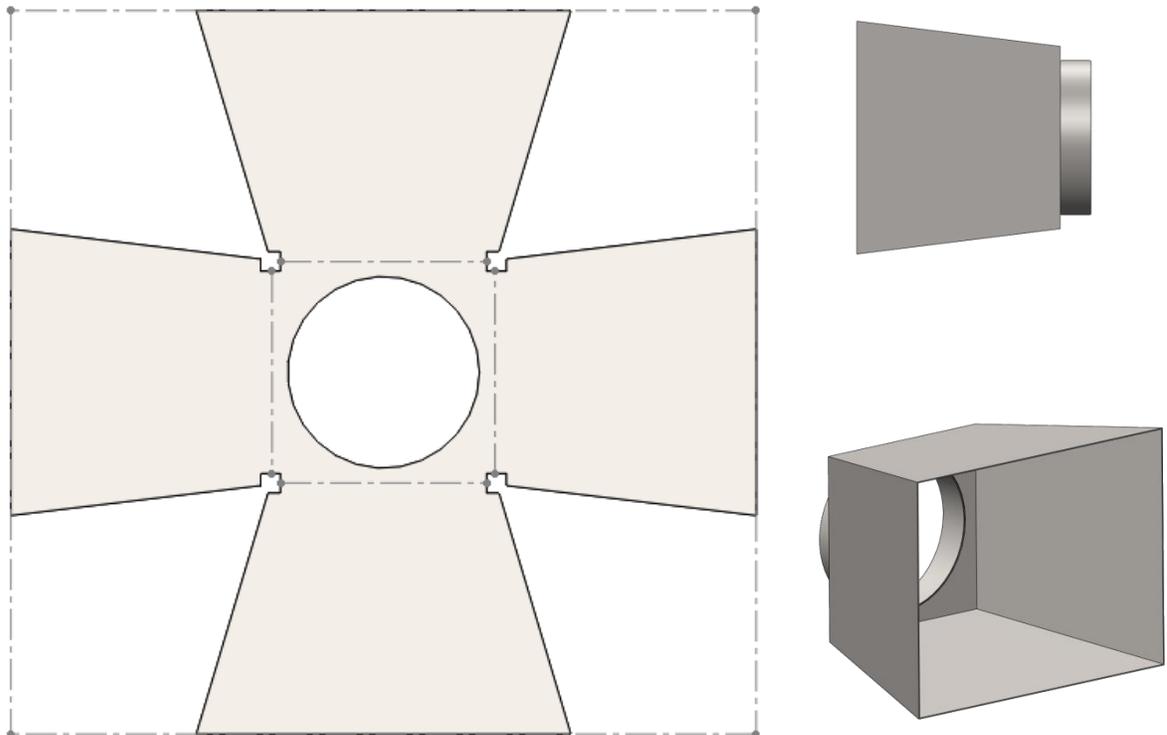
3. DISEÑO FUNCIONAL Y SIMULACIÓN DEL DISPOSITIVO

3.1 BOCA DE ASPIRACIÓN

La boca de aspiración es el elemento encargado de captar los humos provenientes del proceso de soldadura. Los parámetros que se tienen para el diseño de la boca de aspiración son en primer lugar la facilidad de construcción, la cual se planea a partir de lámina de acero galvanizado, acero inoxidable o cualquier otro material de bajo costo y fácil configuración que pueda resistir el uso cotidiano. En la industria, muchos equipos tienen este accesorio en plástico, sin embargo, este material es recomendable sólo cuando se produce este tipo de piezas en masa. En segunda instancia, el diseño de la boca de aspiración debe cumplir con los requerimientos de velocidad de captación establecidos en la norma, los cuales están entre 0,5 y 1 m/s, según se mostró en el capítulo anterior.

A partir de esta información se decide realizar un diseño inicial de la boca de aspiración en lámina metálica, el cual se presenta en la figura 5:

Figura 5. Boca de aspiración



La topología de la propuesta inicial de la boca de aspiración se describe como una pirámide truncada con una base de 230 X 300 mm, con una altura de 200 mm que se proyecta hacia un cuadrado de 180 X 180 mm en el cual se inscribe un círculo de 6" de diámetro, el cual es la entrada hacia el ducto de aspiración. Para dar soporte al acoplamiento con el ducto, se tiene una pestaña de 15 mm de altura en la parte posterior de la boca de aspiración, la cual se conecta con el ducto.

Después de hacer el diseño, se procedió a realizar la simulación con el fin de determinar cuál es la velocidad de captación efectiva de la boca de aspiración y cuál es la distancia de trabajo. Dependiendo de la distancia de operación deseada y de la velocidad de captación a esta distancia, se determina entonces cuál es el flujo de operación del sistema. Con este flujo deben hacerse los cálculos de caídas de presión y comportamiento para los demás elementos del sistema.

Las simulaciones realizadas en el software SolidWorks Flow Simulation se realizaron con diversos valores de caudal, partiendo de los 800 m³/h hasta los 1600 m³/h. Con este flujo se hizo una caracterización de los gradientes de velocidad a diversas distancias de la boca de aspiración, con el fin de terminar cual era la velocidad en distintos puntos. Para ello se estableció una matriz de puntos de medición en donde se determinó para cada uno de ellos la velocidad de captación del fluido. Adicionalmente se hizo un análisis de trayectorias para determinar cuáles eran los patrones de movimiento seguidos por los humos de soldadura hacia la boca de aspiración. Los resultados de las simulaciones se muestran en las figuras 6, 7 y 8.

El estándar AWS F3.2 establece como valor de referencia velocidades de captación entre 0,5 y 1 m/s en los procesos de soldadura, sin embargo a modo de comprobación , se consultó la norma BS-EN ISO 15012-2:2008 que establece la manera de realizar las pruebas sobre los equipos extractores de humos de soldadura. El propósito de consultar la norma, es que esta establece un parámetro para la distancia de medición a partir del plano de la boca de medición. Según las dimensiones del dispositivo de captación, se establece que, la distancia a la que se debe medir la velocidad de captación está dada por la ecuación:

$$z = \sqrt{A} + 7,5 \quad (6)$$

En donde z es la distancia en centímetros a la que se tiene que hacer la medición a partir del plano externo de la boca de aspiración; A es el área de la boca de aspiración en centímetros cuadrados. Para la boca diseñada se tiene un área de 690 cm^2 por lo que z vale $33,76 \text{ cm}$. La norma establece que a esta distancia, la velocidad del fluido debe estar entre $0,3 \text{ m/s}$ y $0,5 \text{ m/s}$. Como se observa en la tabla que acompaña a la figura 8, se tomaron valores de velocidad en las coordenadas registradas para cada punto con un valor de caudal de $1600 \text{ m}^3/\text{h}$, el cual está por encima de la recomendación de diseño. Como muestra la tabla de resultados, a partir del punto 4, que está a 40 cm del plano de la boca de aspiración, la velocidad de captación no alcanza los valores deseados. Esto implica diseñar de nuevo la campana con el fin de reducir el área de captación, logrando así un perfil de velocidades más alto, mejorando la eficacia del sistema.

Figura 6. Estudio de trayectoria de la boca de aspiración

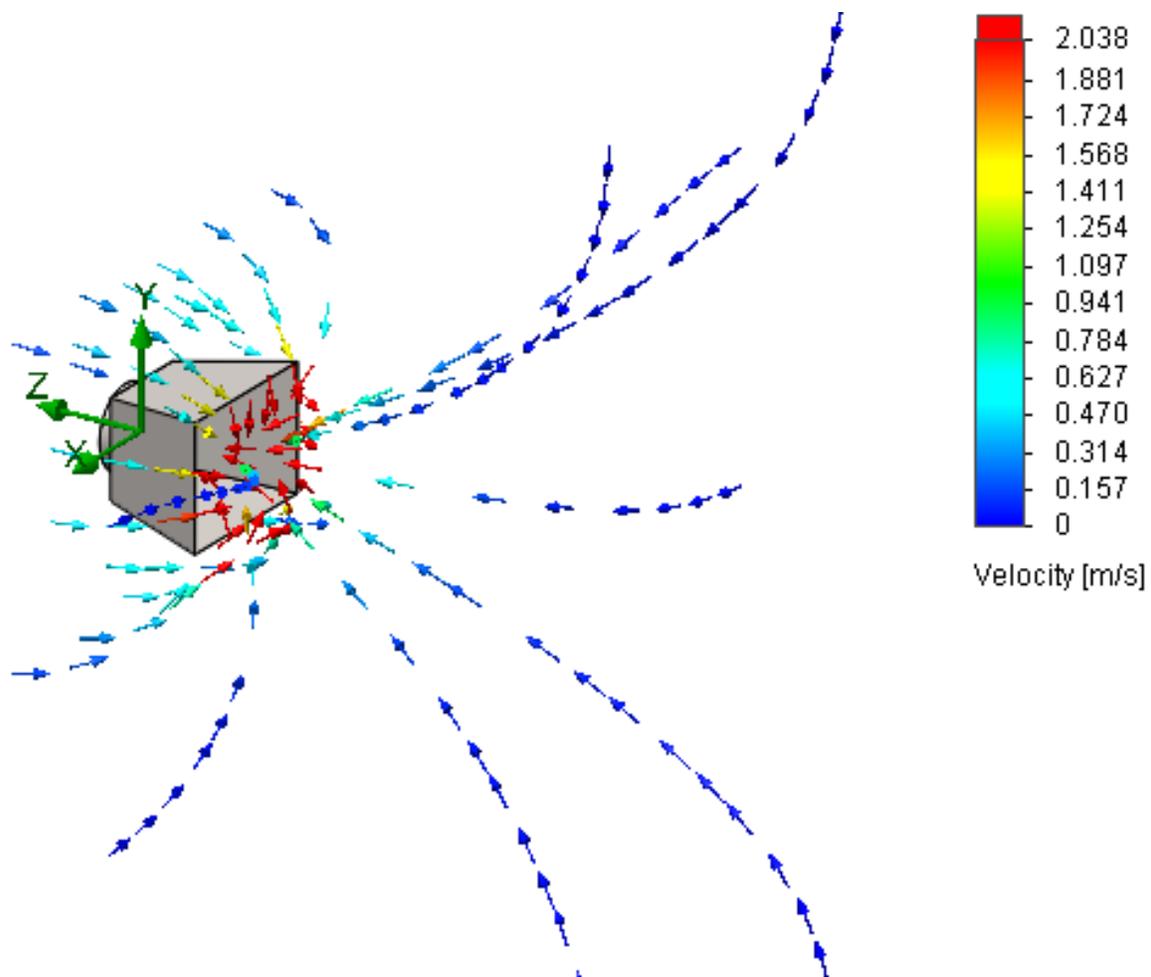


Figura 7. Isolneas de velocidad en la boca de aspiración

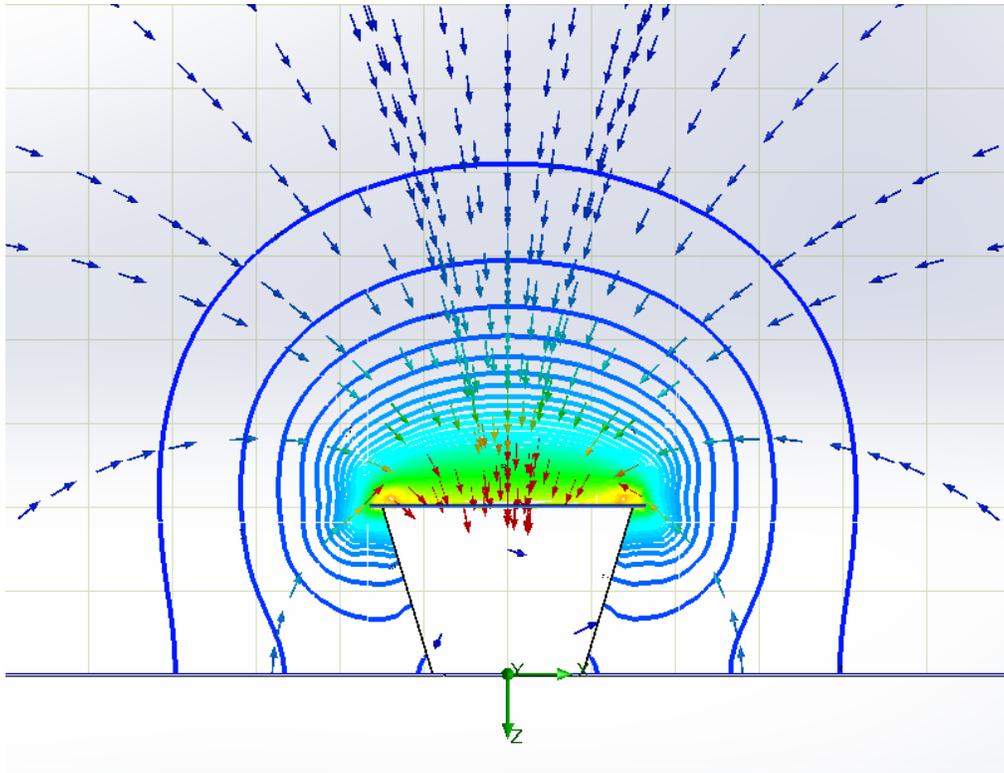
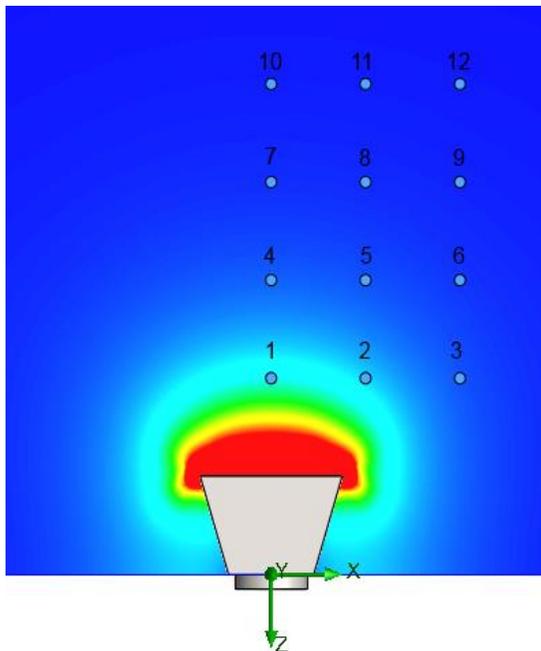


Figura 8. Análisis de valores de velocidad en la boca de aspiración



Punto	x [m]	y [m]	z [m]	V [m/s]
1	0	0	-0,4	0,790
2	0,2	0	-0,4	0,509
3	0,4	0	-0,4	0,177
4	0	0	-0,6	0,203
5	0,2	0	-0,6	0,168
6	0,4	0	-0,6	0,101
7	0	0	-0,8	0,082
8	0,2	0	-0,8	0,055
9	0,4	0	-0,8	0,036
10	0	0	-1	0,018
11	0,2	0	-1	0,013
12	0,4	0	-1	0,010

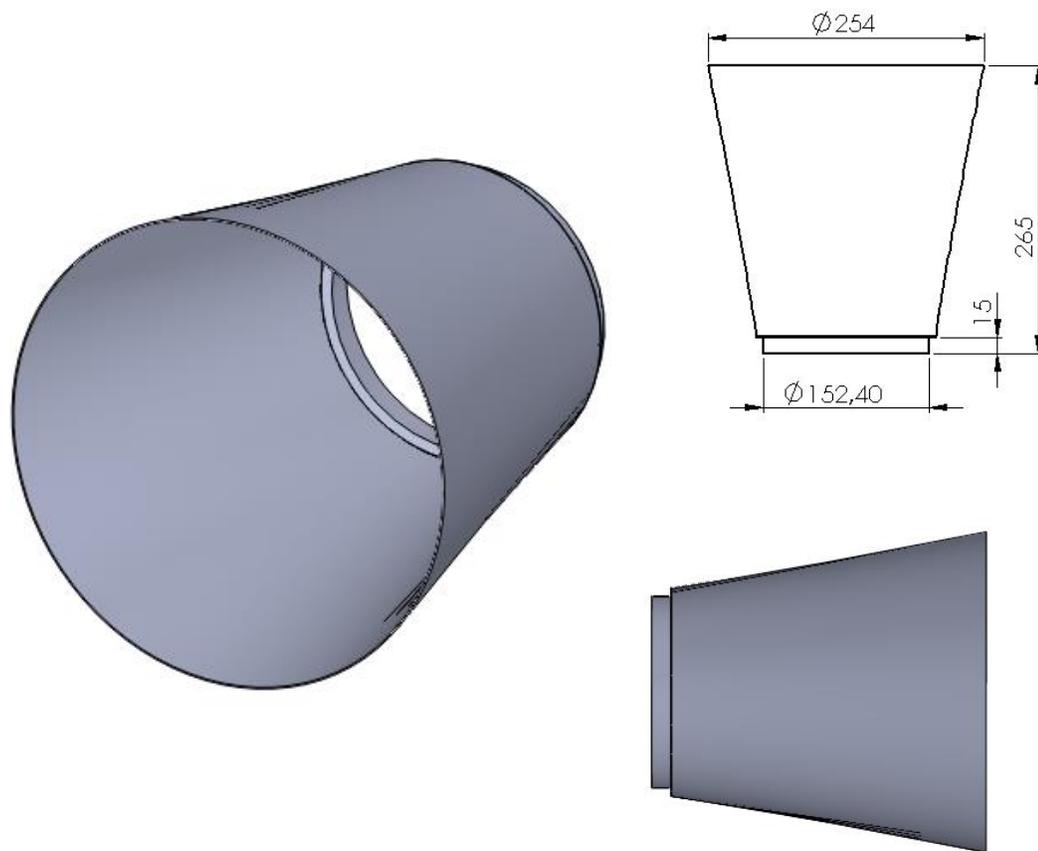
Nótese que los puntos se distribuyen sólo al cuadrante derecho debido a la simetría del fenómeno. El nivel de resolución concerniente a las simulaciones realizadas se presenta en la tabla 6, allí se registra el número de celdas de fluido con el fin de dar una idea del nivel de exactitud utilizado:

Tabla 6. Datos de la simulación de velocidad de captación de la boca de aspiración

Celdas Totales	224782
Celdas de Fluido	220290
Celdas Parciales	4492

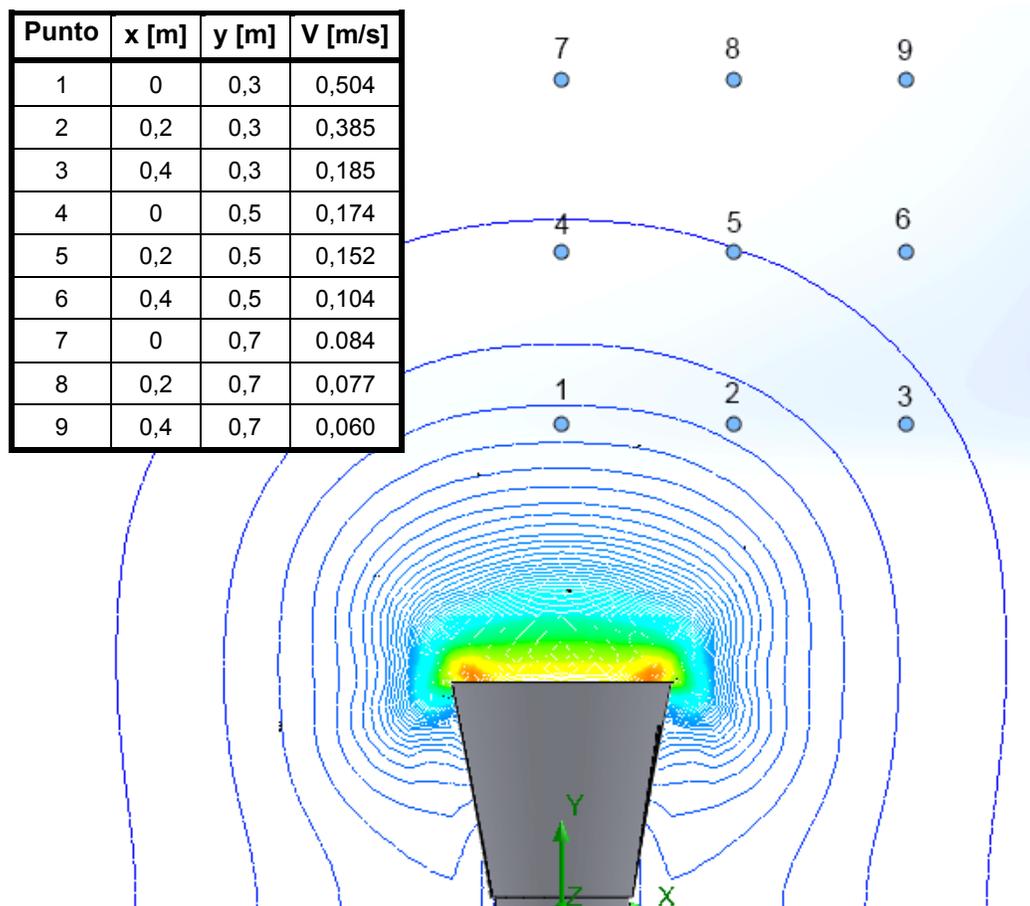
Terminado el análisis anterior, se rediseña la campana con las medidas expuestas en la figura 10:

Figura 10. Campana rediseñada



Las simulaciones para la nueva boca de aspiración se realizaron de forma similar a la anterior, partiendo de los 600 m³/h hasta los 1200 m³/h. Se hicieron además los análisis correspondientes a la velocidad de captación teniendo en cuenta los criterios estipulados en la norma BS-EN ISO 15012-2:2008. Con la nueva configuración de la boca de aspiración, se tiene un área de 506 cm² lo cual implica una reducción del 27% con respecto al diseño anterior. Esto implica que la nueva distancia de medición z es de 30 cm; a esta distancia, las velocidades del aire deben estar entre los 0,3 y 0,5 m/s. La figura 11 presenta los puntos de medición de la velocidad, con sus respectivas coordenadas y valor de la velocidad de captación en el punto.

Figura 11. Distribución de velocidades de captación en la boca de aspiración a 1200 m³/h



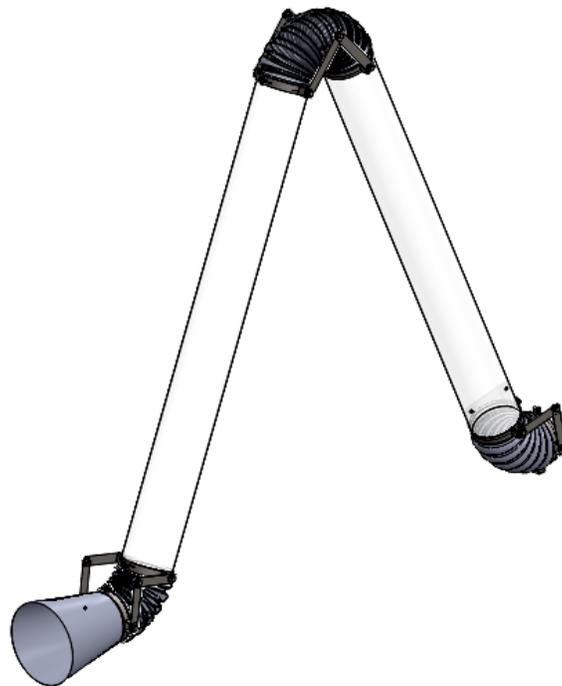
Como puede verse en la figura 11 las velocidades en cada punto satisfacen los requerimientos establecidos por la norma. Adicionalmente es necesario mencionar

que las velocidades de captación muy altas generan una alta convección en la soldadura, fragilizando el cordón, por lo cual, el control de la velocidad de captación debe presentar un balance entre la eficaz recolección de los gases y la necesidad de conservar las condiciones adecuadas en el entorno de la soldadura.

3.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL DUCTO

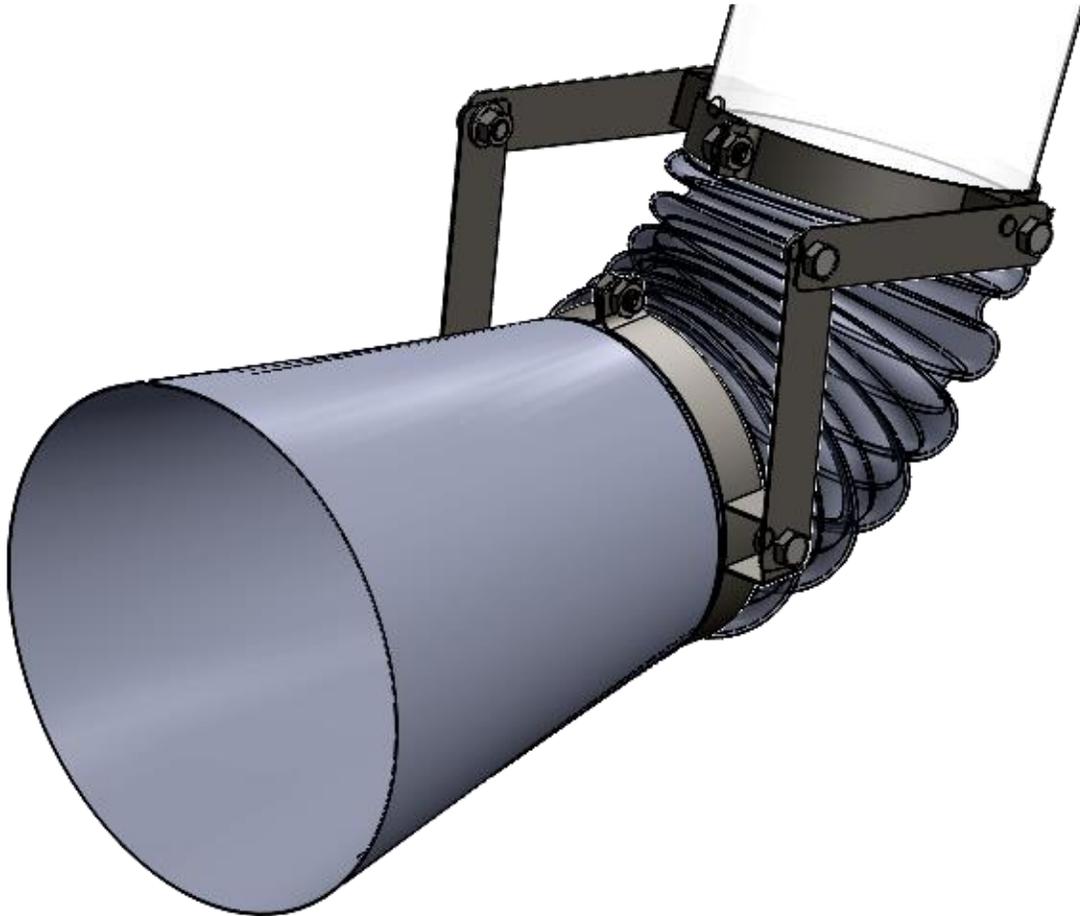
El siguiente elemento en el sistema de extracción de humos es el ducto que conecta la boca de aspiración con el resto del sistema. Partiendo de las configuraciones sugeridas en el estándar F 3.2 de la AWS, el ducto se concibe como un conjunto conformado por dos ductos rígidos de 6" de diámetro nominal, de 1,5 m de longitud cada uno. La boca de aspiración estará sujeta al sistema a través de un ducto flexible corrugado, al igual que los dos tubos entre sí. Las uniones de los elementos serán ajustadas por abrazaderas hechas en platina de acero estructural, de 1,59 mm de espesor, de acuerdo a los calibres estandarizados. De acuerdo a la información citada, se presenta el diseño del ducto a continuación:

Figura 12. Diseño del ducto



Nótense en la figura la presencia de las abrazaderas y los ductos corrugados flexibles. En la figura 13 se muestra el detalle del acople con las abrazaderas y la boca de aspiración:

Figura 13. Detalle de acoplamiento de la boca de aspiración

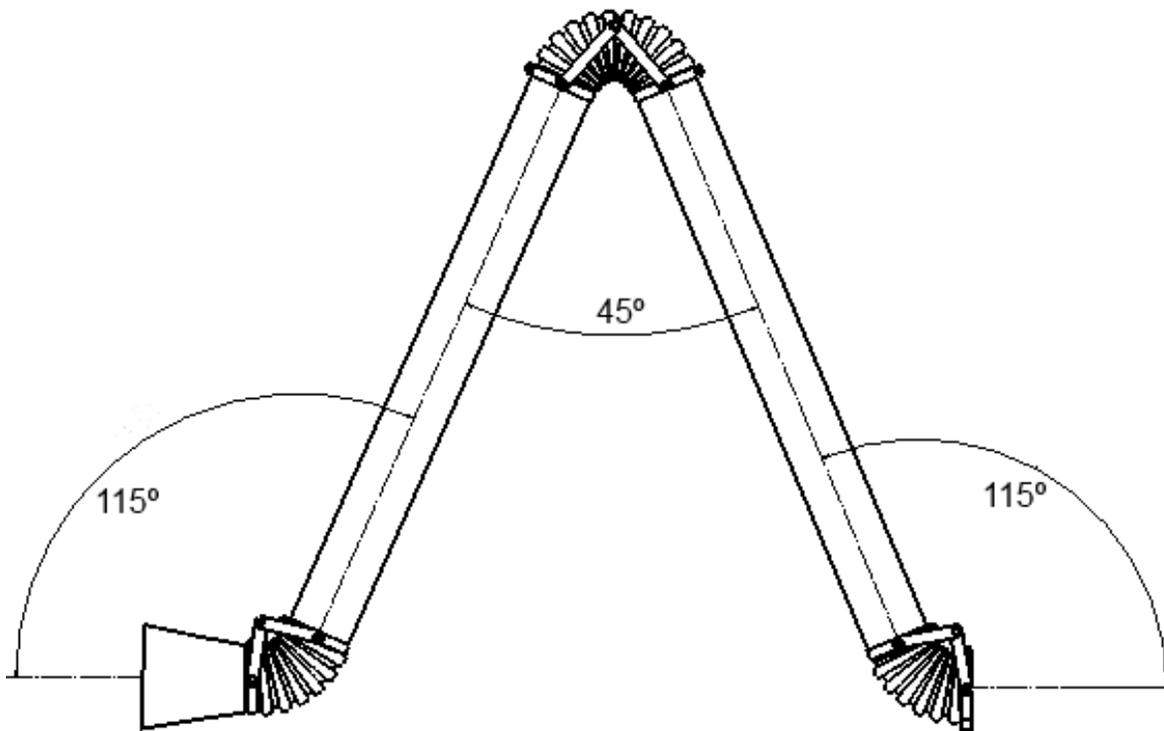


Tal como lo ilustra la figura 13, las abrazaderas son el punto de apoyo para las placas laterales que ayudan a rigidizar el ensamble, permitiendo que la boca de aspiración y el ducto flexible conserven su posición relativa con respecto al ducto. En los planos detallados, los cuales se presentan como anexo al documento, se presenta las dimensiones de cada uno de los elementos constitutivos del ensamble.

En cuanto al diseño propiamente dicho del sistema de ductos, dejando de un lado la parte estructural, es necesario, determinar la pérdida de presión que se da a lo

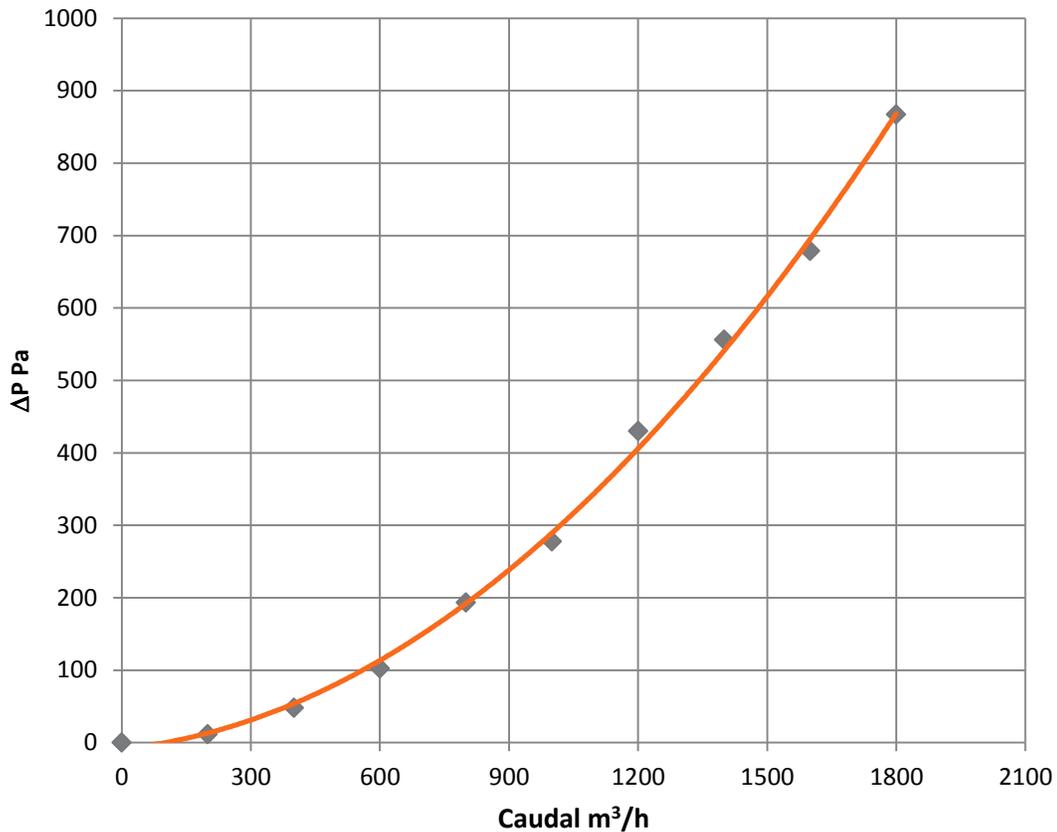
largo del ducto. Esta pérdida de presión depende de las longitudes de los ductos rectos, las cuales son fijas, y de los ángulos que formen los ductos y la boca entre sí. Aunque existe casi un número infinito de combinaciones de ángulos para los elementos anteriormente mencionados, es la combinación de ángulos más cerrada la que ofrece una pérdida de presión más alta. En ese orden de ideas, las simulaciones del ducto en busca del trazado de la curva de pérdidas del sistema se realizaron con la configuración de los ángulos que se presenta a continuación:

Figura 14. Ángulos de los ductos escogidos para la simulación



Los ángulos se escogieron en función de una configuración razonable para la estructura. Ángulos más pequeños harían que los elementos se chocaran entre sí, por lo cual, los ángulos mostrados tienen los valores mínimos permitidos por la estructura. Los elementos de rigidización presentes en las conexiones generan un mecanismo plano, por lo cual se evita la presencia de configuraciones espaciales distintas a las planteadas. Teniendo clara la posición y definidos los parámetros para las simulaciones se procedió a simular el ducto con diferentes caudales, obteniendo así la curva de comportamiento del sistema:

Figura 15. Curva de comportamiento del ducto



Con los datos de la simulación (marcadores en azul), se utilizó el software EES (Engineering Equation Solver) el cual permitió hacer la regresión del fenómeno y así predecir el comportamiento del dispositivo para los valores de caudal diferentes a los utilizados en la simulación. Con los datos de la simulación se obtuvo que la ecuación del sistema es:

$$\Delta P = -11,4078 - 6,62481Q + 9,4611Q^2 \quad (7)$$

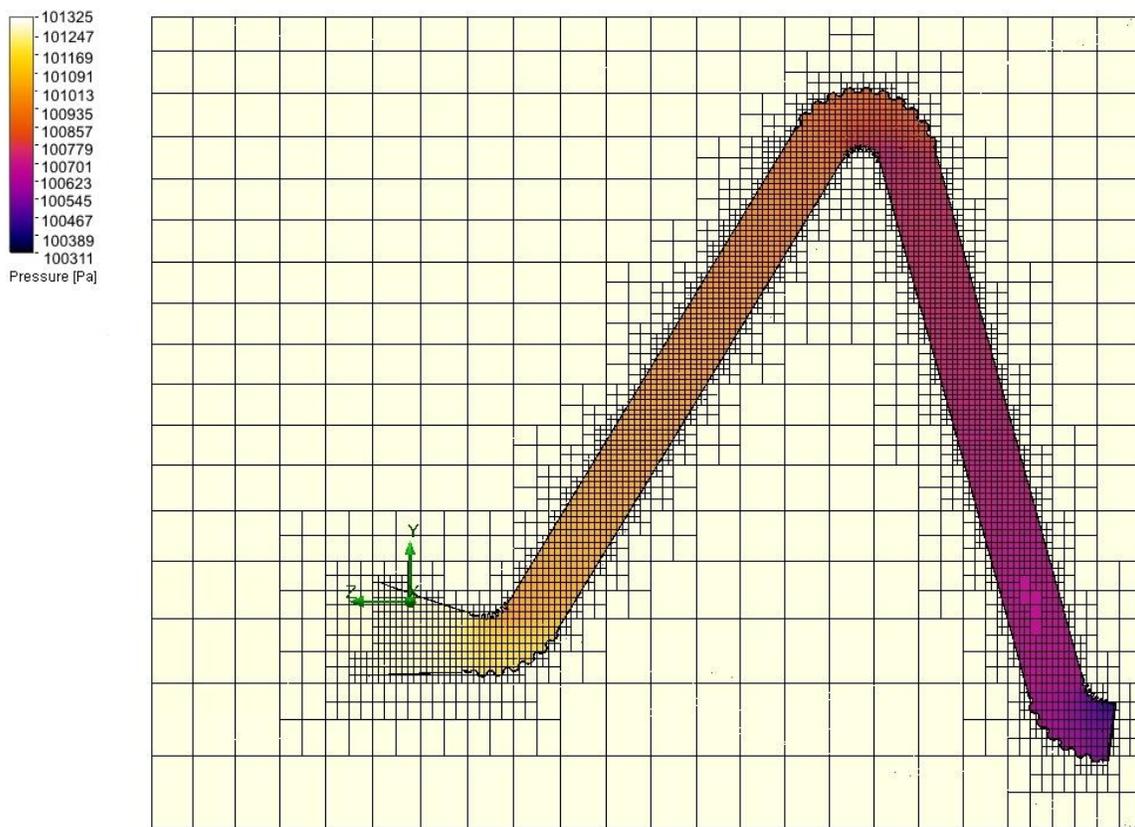
Esta ecuación obtuvo una correlación del 99,82%, lo cual muestra que no sólo las simulaciones son coherentes con el fenómeno, sino que la ecuación es válida para la predicción de la pérdida de presión en el sistema.

Es importante mencionar que la selección del impulsor del fluido debe ser seleccionado teniendo en cuenta las pérdidas de todo el sistema, esto es, boca de aspiración, ductos, ciclón y filtros. Esta curva se realizó principalmente para

verificar la pertinencia de las simulaciones e ir conociendo el orden de magnitud de las pérdidas en cada uno de los tramos del circuito.

Ampliando en análisis sobre el ducto, se hizo una revisión detallada de los fenómenos más relevantes en el diseño del dispositivo, esto es, la caída de presión a lo largo de cada uno de los tramos y el comportamiento de la velocidad en el fluido. La caída de presión es importante porque influye de manera directa sobre la selección del impulsor, así como en la eficiencia energética y la eficacia operativa del dispositivo. La velocidad permite inferir el comportamiento del fluido al interior del ducto y cómo es su evolución en términos de estabilidad y turbulencia. La figura 16 presenta la distribución de presión a lo largo del ducto:

Figura 16. Caída de presión a lo largo del ducto

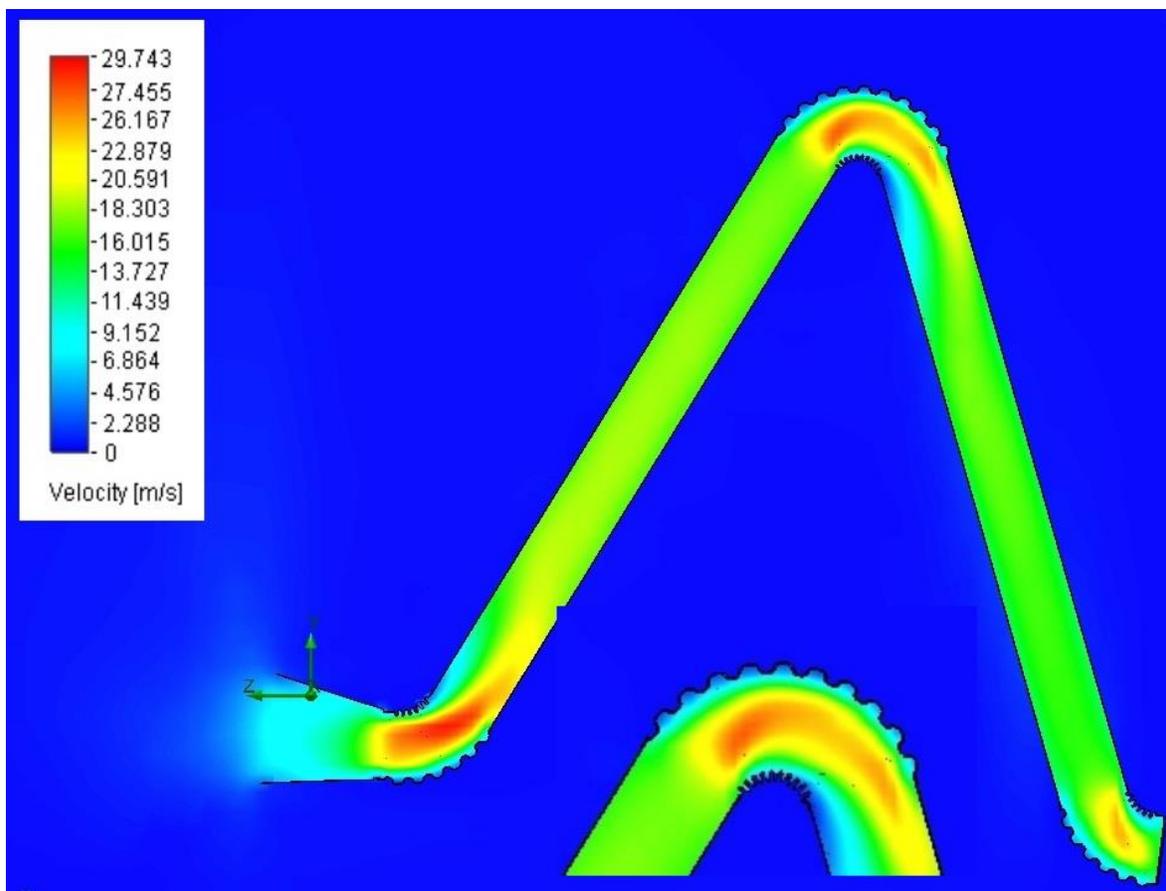


Como era de esperarse, al analizar la gráfica, se observa una caída de presión gradual, sin ninguna singularidad especial, lo cual demuestra que la selección de los ductos flexibles corrugados es correcta, puesto que no ofrecen una resistencia

al flujo particularmente alta. Adicionalmente, se observa que la caída de presión en la campana es pequeña, lo cual significa que, el ángulo y las dimensiones de la misma no sólo favorecen la captación de las partículas, sino que aportan a un diseño eficiente del dispositivo al no representar una caída de presión significativa a la succión.

En la figura 17 se hace una revisión de la distribución de la velocidad a lo largo del ducto:

Figura 17. Distribución de velocidad a lo largo del ducto



En esta simulación se deseó trabajar con la totalidad del entorno, como se ve en la gráfica, el aire está quieto en la periferia. Esta elección se hizo con el fin de observar la aceleración del fluido en la succión. Como era de esperarse, los cambios más bruscos de velocidad están en los puntos de cambio de trayectoria del fluido. Los tres codos presentan los picos de presión más altos del sistema,

siendo el de la succión el más crítico en primer lugar por la reducción de la sección transversal en la campana y en segundo lugar por el cambio de trayectoria. Es interesante observar que los picos de velocidad se dan en el centro de la trayectoria del fluido, con una distribución descendente hacia las paredes. Este comportamiento es coherente con una distribución parabólica del perfil de velocidad, que es lo esperado desde la perspectiva teórica. Finalmente, en la figura 17 se hace una ampliación del codo flexible de la parte superior, con el fin de ver la distribución de la velocidad del fluido de manera más detallada al interior del codo. Nótese que, al interior de las hendiduras generadas por el perfil corrugado del codo se ve cómo va velocidad del fluido es cero. El aire que circunda las paredes del codo corrugado genera un efecto “colchón” que disminuye las irregularidades de la superficie, lo cual en vez de generar turbulencias en la vecindad de las paredes del codo, lo que hace es facilitar un perfil de flujo uniforme a lo largo del mismo.

En la figura 16 se decidió incluir la distribución del mayado de la simulación, esto con el propósito de dar al lector una idea del nivel de resolución utilizado en cada una de las partes del modelo. La simulación fue realizada con un total de 617860 celdas, de 442463 celdas pertenecían al fluido. La simulación se hizo con un total de 3572 iteraciones, hasta que se evidenció convergencia en las variables físicas tomadas como parámetro, las cuales fueron en especial, velocidad y presión. El tiempo de cómputo superó las 6 horas y se hizo con un computador de cuatro núcleos de procesamiento, 16 GB de memoria RAM y una velocidad de cloqueo de 3,2 GHz. Todo lo anterior se da como un referente técnico del nivel de precisión utilizado en la simulación del dispositivo.

3.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CICLÓN

El principio de diseño del ciclón tiene que ver con los diámetros aerodinámicos de las partículas que desean captarse, puesto que las dimensiones del ciclón generan el cambio de velocidad y trayectoria en el aire que permite desacelerar las partículas hasta su situación de estancamiento. En segundo lugar, hay que realizar un análisis de cómo se forman las partículas sólidas en el humo de la soldadura, las cuales parten de los vapores metálicos y demás componentes del humo, los cuales, a diversas temperaturas van condenándose, formando núcleos de solidificación que generan diversos espectros de diámetros aerodinámicos de

las partículas dependiendo de los componentes de la soldadura, el flujo de calor en la soldadura, la pérdida energética de los humos a lo largo del trayecto y el patrón de flujo.

El estudio de la formación de partículas es sumamente complejo, por lo cual resulta complicado desarrollar un modelo analítico del fenómeno, esa es una de las razones por lo que resulta más simple y conveniente el uso de resultados obtenidos a partir de experimentos, los cuales de alguna forma permiten visualizar la relación entre las variables que inciden en la formación del material particulado presente en los humo de soldadura.

En este diseño se incluyó un ciclón con el propósito de reducir la carga sobre los filtros, y atrapar el material particulado más grande proveniente de los humos de soldadura.

Según el trabajo de Ennan¹ la distribución del diámetro de las partículas es función de la composición química del material base y el electrodo, del proceso, del diámetro del electrodo, del recubrimiento (o del gas de protección) y de la energía entregada a la soldadura, es decir, la tasa de generación de calor. Adicionalmente, la composición del electrodo también influye debido a la reactividad de los átomos metálicos gasificados, según el trabajo de Vishniakov². Básicamente, Ennan [7] describe tres clases de partículas, las cuales se clasifican en partículas ultrafinas, de menos de 0,1µm de diámetro, generadas por condensación de los elementos tanto del metal base como del metal de aporte. Le siguen las partículas de diámetro medio, de más de 0,1µm, las cuales se generan por procesos más mecánicos como salpicaduras microscópicas provenientes del material transferido a través del arco o procedente del charco de fusión. En último lugar están las partículas gruesas, las cuales superan el diámetro de 0,2 µm. Estas partículas se forman por la coagulación de las partículas ultrafinas, razón por la cual, raramente superan los 3 µm de diámetro.

¹ Ennan A.A; Kiro S.A; Oprya M.V; Vishniakov V.I. Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles. *Journal of Aerosol Science*. No 45. 2012.

² Vishniakov V. I; et al. *Formation of primary particle in welding fume*. *Journal of Aerosol Science*. No 58. 2013

Las variables que determinan la composición y el tamaño de las partículas de los humos de soldadura se mencionaron con anterioridad, esto implica que, existe un umbral relativamente grande de opciones en cuanto a las características de las partículas de los humos de soldadura, no obstante, es imposible hacer un estudio de todas las opciones posibles. Para este trabajo, se tomó como referencia el estudio de Ennan [7], el cual se realizó con electrodos de 4 mm de diámetro, con un recubrimientos basados en rutilo (TiO_2), ilmenita ($(\text{FeMn})\text{TiO}_3$) y carbonato de fluorita ($\text{CaCO}_3\text{--CaF}_2$). A estos electrodos se les aplicaron cargas energéticas que variaron entre 1 kJ/mm a 1,33 kJ/ mm con velocidades de desplazamiento de 300 mm/min; estas cargas produjeron tasa de generación de humo que va desde los 1,62 a 2,17 g/min.

La concentración de material particulado encontrada en los gases de extracción de la soldadura estuvo ubicada entre los 110 a 223 mg/m^3 . Con estos valores se tienen una referencia sensata de los tipos de partículas y las tasas de generación de humo; lo cual es una base para establecer el diseño y la selección de los elementos constitutivos del dispositivo.

Los resultados más interesantes del estudio de Ennan [7] se visualizan en la tabla 7 y en la figura 18. En la tabla 7 aparece la composición porcentual promedio de las partículas de humo emitidas por los electrodos del estudio. Con el fin de poder estimar la densidad media de las partículas, se realizó la ponderación de la densidad de las partículas usando su participación porcentual en la masa total. Esta ponderación permite estimar una densidad promedio para el material particulado de 6,11 kg/m^3 .

El histograma de la figura 18 presenta la información de la distribución del diámetro de las partículas en la porción inhalable del humo de soldadura. La serie roja representa el porcentaje de partículas en el rango estipulado en el eje horizontal, mientras que la serie azul presenta el porcentaje acumulado de las partículas en relación con el total.

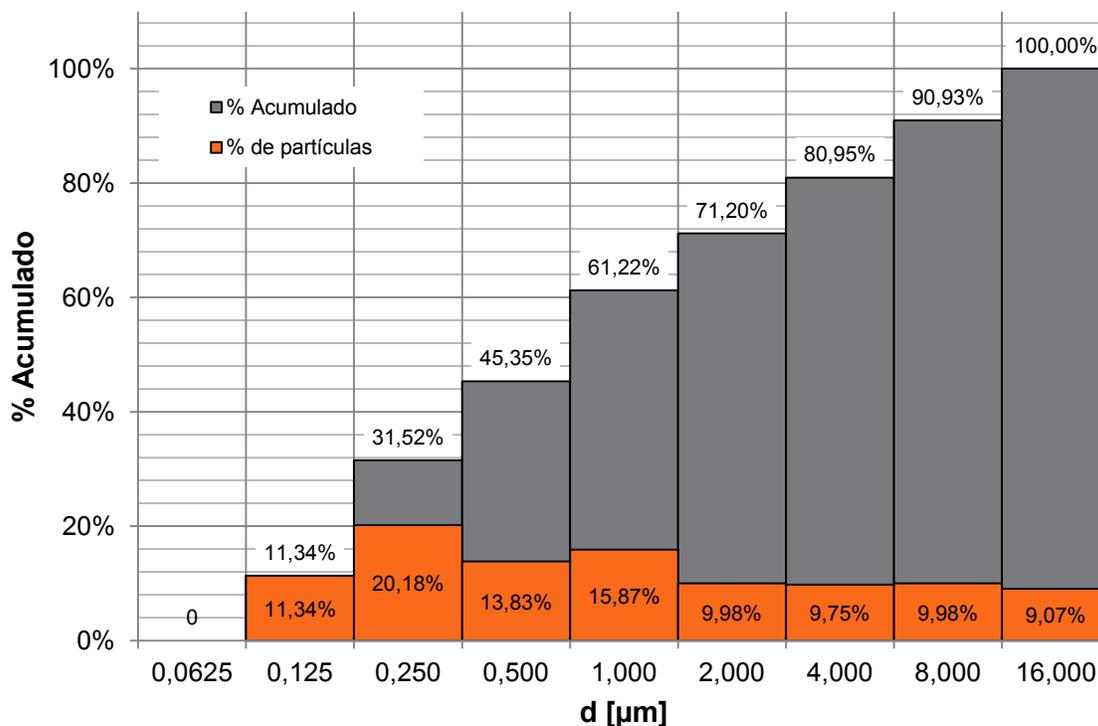
Al combinar la información procedente de la tabla 7 y de la figura 18, es posible obtener los parámetros necesarios para el diseño de ciclón, obteniendo los parámetros básicos necesarios, es decir, el espectro del material particulado y la densidad del mismo.

Tabla 7. Composición elemental promedio del material particulado en el humo de soldadura

Elemento	% (masa)	Densidad kg/m ³	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
Total	100,0	Total	6,11

Fuente: Ennan [7]

Figura 18. Distribución porcentual de diámetros en las partículas del humo de soldadura

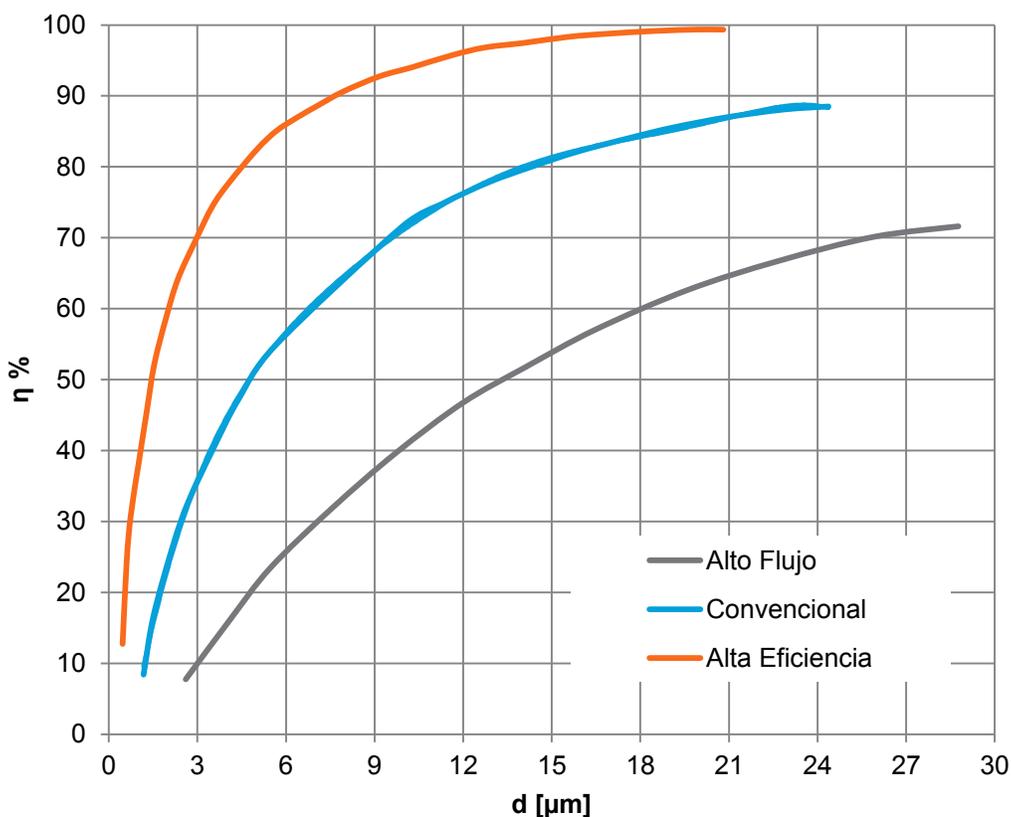


Fuente: Ennan [7]

Según Nazaroff [13], los ciclones son adecuados para la captación de partículas de diámetro mayor o igual a $1\mu\text{m}$, lo cual, según el histograma de la figura 18 representa el 54,65% de la totalidad de las partículas presentes en el humo de la soldadura. Adicionalmente, los ciclones se colocan antes de los elementos filtrantes para reducir la carga y ampliar la vida útil de los mismos, tal cual ocurre en este diseño.

Aunque se tiene un referente del porcentaje de captación de partículas que tiene el ciclón, es necesario tener en cuenta que los ciclones tienen cierta eficiencia en función de sus dimensiones y sus parámetros operacionales. En la figura 19 se presentan las curvas típicas de comportamiento de ciclones de alto flujo, convencionales y de alta eficiencia:

Figura 19. Eficiencia vs diámetro de partículas captadas en ciclones

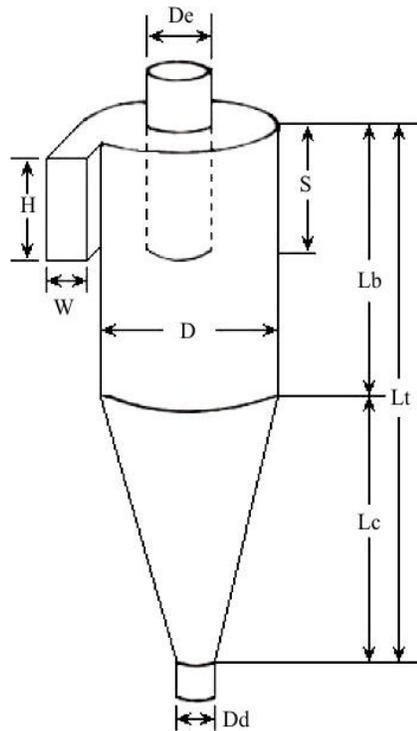


Fuente: Nazaroff et al [13]

Con el fin de captar la mayor parte de las partículas a través del ciclón y teniendo en cuenta que el ciclón no es el único elemento de retención del material particulado, se procede a diseñar un ciclón de alta eficiencia el cual pretende reducir la carga sobre los filtros de aire, los cuales actuarán en la retención del material particulado más pequeño.

Es necesario anotar que la gráfica de la figura 19 es una aproximación del comportamiento de los ciclones y tal como se establece Lapple [11], la capacidad de captación de los mismos es función principalmente de sus dimensiones y sus condiciones de operación. En la figura 20, se presentan las variables topológicas y las relaciones establecidas para cada tipo de ciclón según la clasificación otorgada en la figura 19:

Figura 20. Parámetros topológicos de los ciclones



Parámetro	AE	C	AF
H/D	0,5	0,5	0,44
W/D	0,2	0,25	0,21
De/D	0,5	0,5	0,4
S/D	0,5	0,625	0,5
Lb/D	1,5	2,0	1,4
Lc/D	2,5	2,0	2,5
Dd/D	0,375	0,25	0,25

AE: Alta Eficiencia
C: Convencional
AF: Alto Flujo

Fuente: Lapple [11] actualizado por Wang [19]

Con los parámetros dimensionales identificados, se procede a dar inicio al diseño propiamente dicho del ciclón. Las ecuaciones utilizadas para el diseño del ciclón fueron las presentadas por Lapple [11] actualizadas por Wang [19]. Como todo proceso de diseño, el diseño del ciclón se realizó iterando con las diferentes variables dimensionales hasta llegar a un resultado que fuera deseable en términos de dimensiones, captación de partículas y pérdidas de presión a través del dispositivo. Se tiene que, a mayor eficiencia en la captación, mayores pérdidas de presión, lo cual incrementa el consumo energético del extractor de humos, adicionalmente, el incremento de la eficiencia implica una mayor altura del cuerpo del ciclón, debido a que se aumentan los giros efectivos de las partículas dentro del ciclón. De acuerdo a los criterios anteriormente expuestos, se espera una eficiencia global superior al 50% y que permita capturar las partículas más grandes, es decir, las que poseen un diámetro superior a $1\mu\text{m}$, con una eficiencia cercana al 90%.

Después de varias iteraciones, en las que se evaluó tanto la caída de presión como la retención del material particulado, se optó por un diámetro D (según las convenciones de la figura 20) de 240 mm. Con las proporciones dadas en la tabla que acompaña a la figura 20 en la columna de alta eficiencia, se determinaron las dimensiones del ciclón así:

Tabla 8. Dimensiones del ciclón

Parámetro	D	H	W	De	S	Lb	Lc	Dd
Dimensión (mm)	240	106	50	96	120	336	600	96

Los cálculos concernientes al diseño operativo del ciclón, se presentan a continuación, realizados obviamente con las dimensiones de la tabla 8. Estos cálculos, pretenden determinar cuál es la capacidad real de retención del ciclón y la eficiencia de captación que se tiene para cada rango de diámetros. En primera instancia se calcula el número de vueltas efectivas de las partículas en el ciclón. Estas vueltas son las que dan las partículas para desacelerarse y perder velocidad de tal suerte que se retengan en el fondo del ciclón. Según Lapple [11] y Wang [19], el número efectivo de vueltas es:

$$N = \frac{1}{H} (Lb + Lc/2) \quad (8)$$

Donde N es el número de vueltas y los demás parámetros están referenciados en la figura 20. Para este caso particular $N=6,023 \approx 6$ vueltas efectivas. Con esta información y continuando con la metodología de los autores referenciados, se procede a calcular el tiempo de permanencia del gas (aire) en el vórtice generado para la desaceleración de las partículas. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \pi DN / V_i \quad (9)$$

En donde D es el diámetro del cuerpo del ciclón, N, el número de vuelta efectivas (anteriormente calculado) y V_i es la velocidad de entrada del aire al ciclón, la cual se obtiene con el área transversal de la sección de entrada del ciclón y el caudal de operación. Par este caso en particular, con H y W tomados de la tabla 8 y un caudal de $1200 \text{ m}^3/\text{h}$, se obtiene una velocidad de $62,63 \text{ m/s}$ y un Δt de $0,0725$ segundos. Este es el tiempo de permanencia del gas en el recorrido del vórtice. El siguiente paso es determinar el diámetro mínimo de captura del ciclón. En teoría, todas las partículas con un diámetro igual o mayor al diámetro mínimo de captura, deben ser colectadas con el 100% de eficiencia. La ecuación para determinar este parámetro es:

$$d_p = \left(\frac{9\mu T}{\pi N V_i (\rho_p - \rho_a)} \right)^{1/2} \quad (10)$$

En donde d_p es el diámetro mínimo de captación de las partículas, T es la longitud de la entrada del ciclón, la cual para este caso se tomó de 50 mm , μ es la viscosidad del aire y ρ_a y ρ_p son las densidades del aire y las partículas respectivamente. Para estos cálculos se tomaron los valores de 6114 kg/m^3 para la densidad de las partículas (según la ponderación realizada con los datos de la tabla 7), $1,184 \text{ kg/m}^3$ para la densidad del aire (condiciones atmosféricas) y

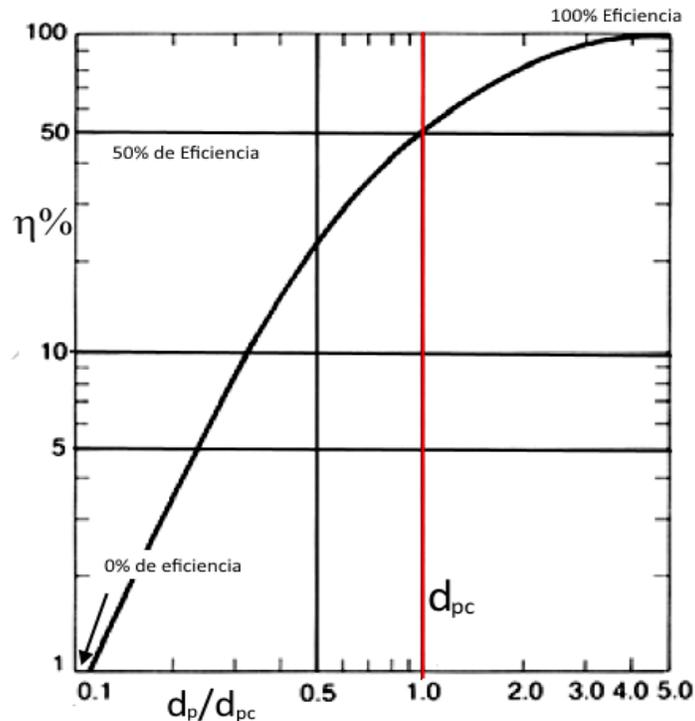
0,00001849 kg/m-s para la viscosidad del aire. Con esto valores, se obtuvo un d_p de 1,076 μm .

Lapple [11] desarrolló una relación semi-empírica para calcular el “diámetro de corte” para las partículas colectadas con un 50% de eficiencia. A este diámetro de corte le llamó d_{pc} y lo calculó con la siguiente ecuación:

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu T}{2\pi N V_i (\rho_p - \rho_a)} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Nótese que la diferencia entre la ecuación (10) y la ecuación (11) es la presencia del número 2 en el denominador. Para el ciclón diseñado, este parámetro tiene un valor de 0,7608 μm . Este término no es caprichoso, sino que corresponde a una curva desarrollada por Lapple [11] en donde se puede predecir la eficiencia del ciclón. La curva se presenta en la figura 21:

Figura 21. Curva de predicción de la eficiencia para el ciclón



Fuente: Lapple[11]

En el eje vertical se presenta la eficiencia de captación dependiendo del diámetro de las partículas, en el eje horizontal se muestra la relación entre el diámetro de las partículas y el parámetro d_{pc} . Según la curva de la figura 21, cuando el diámetro de la partícula es igual a d_{pc} se tiene una eficiencia del 50%, es decir, una de cada dos partículas es captada. A medida que el diámetro de las partículas aumenta, la eficiencia crece, de tal manera que a diámetros más grandes la eficiencia llega al 100%. Después de cierto diámetro, el cual según Lapple [11] es igual cinco veces d_{pc} , se tiene una eficiencia del 100%. Esta situación explica por qué se hace necesario calcular la eficiencia por cada fracción de las partículas que se encuentran en el espectro de captación. Para facilitar el cálculo de la eficiencia del ciclón para cada fracción para cada población de partículas y ponderar su aporte a la eficiencia general del dispositivo, se tiene la ecuación de la curva generada por Lapple [11], la cual se presenta a continuación:

$$\eta_j = \frac{1}{1+(d_{pc}/d_j)^2} \quad (12)$$

En donde η_j es la eficiencia para cada rango de partículas, y d_j es el diámetro promedio del rango. Aplicando esta ecuación a cada fracción de las partículas según su diámetro, se obtiene la eficiencia del ciclón para cada rango de diámetros. Con este procedimiento, es posible estimar la eficiencia global del ciclón. Utilizando los datos del histograma de la figura 18 y la ecuación (12) se obtuvieron las cifras presentes en la tabla 9:

Tabla 9. Eficiencia de captación del ciclón

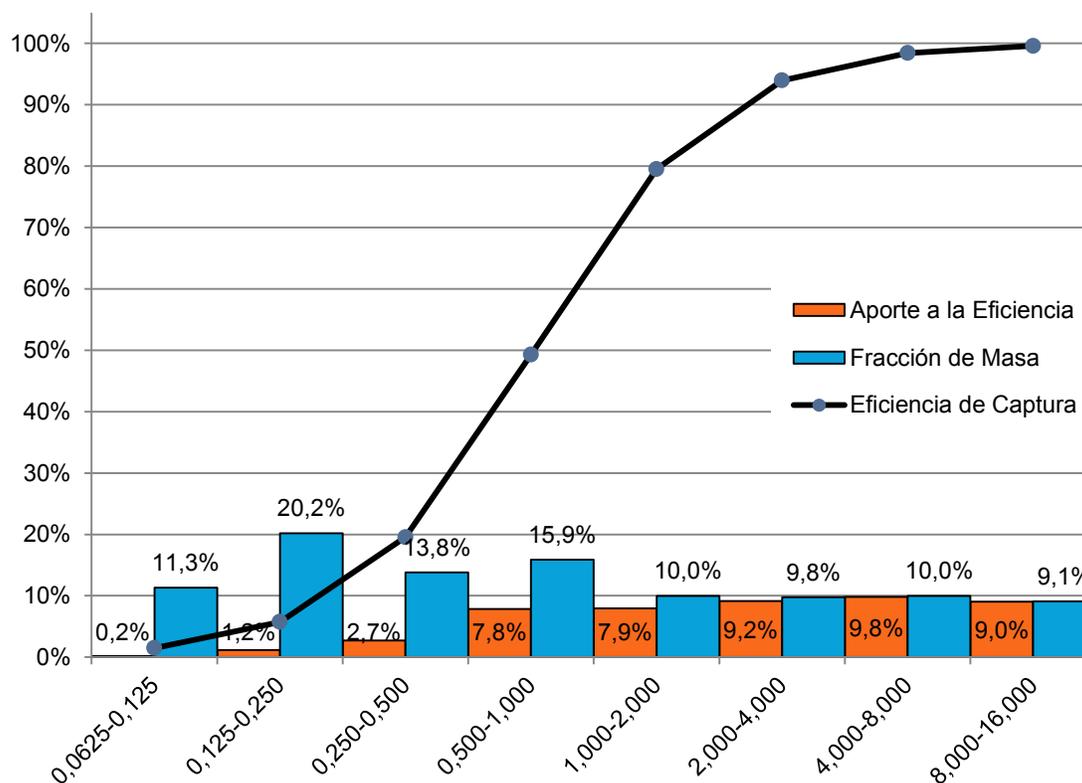
Rango	Promedio	Fracción de Masa	Eficiencia de Captura	Eficiencia Ponderada
0,0625-0,125	0,0938	11,34%	1,5%	0,170%
0,125-0,250	0,1875	20,18%	5,7%	1,156%
0,250-0,500	0,3750	13,83%	19,5%	2,704%
0,500-1,000	0,7500	15,87%	49,3%	7,823%

Tabla 9. Eficiencia de captación del ciclón (continuación)

Rango	Promedio	Fracción de Masa	Eficiencia de Captura	Eficiencia Ponderada
1,000-2,000	1,5000	9,98%	79,5%	7,936%
2,000-4,000	3,0000	9,75%	94,0%	9,161%
4,000-8,000	6,0000	9,98%	98,4%	9,819%
8,000-16,000	12,0000	9,07%	99,6%	9,034%
TOTAL		100,00%	TOTAL	47,803%

Según los cálculos realizados y presentados en la tabla 9, la eficiencia global del ciclón es del 47,8%, no obstante, es de resaltar que para diámetros superiores a 1µm, se tienen eficiencias que parten casi del 80% hasta un muy apreciable 99,6%. Lo anteriormente explicado se puede visualizar en la figura 22:

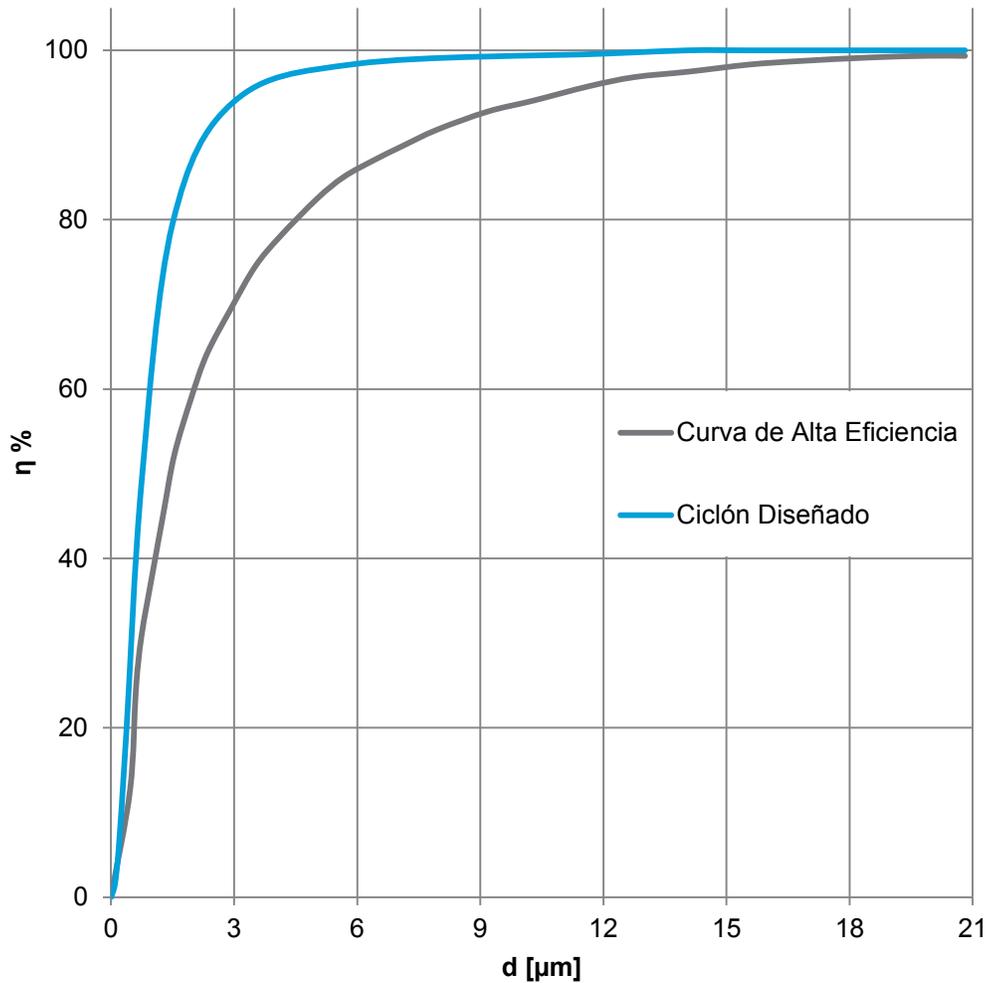
Figura 22. Eficiencia de captación del ciclón



Es notorio que la curva de eficiencia obtenida para el ciclón tiene una configuración muy similar a la presentada en la figura 21, corroborando que la estimaciones y los cálculos son coherentes.

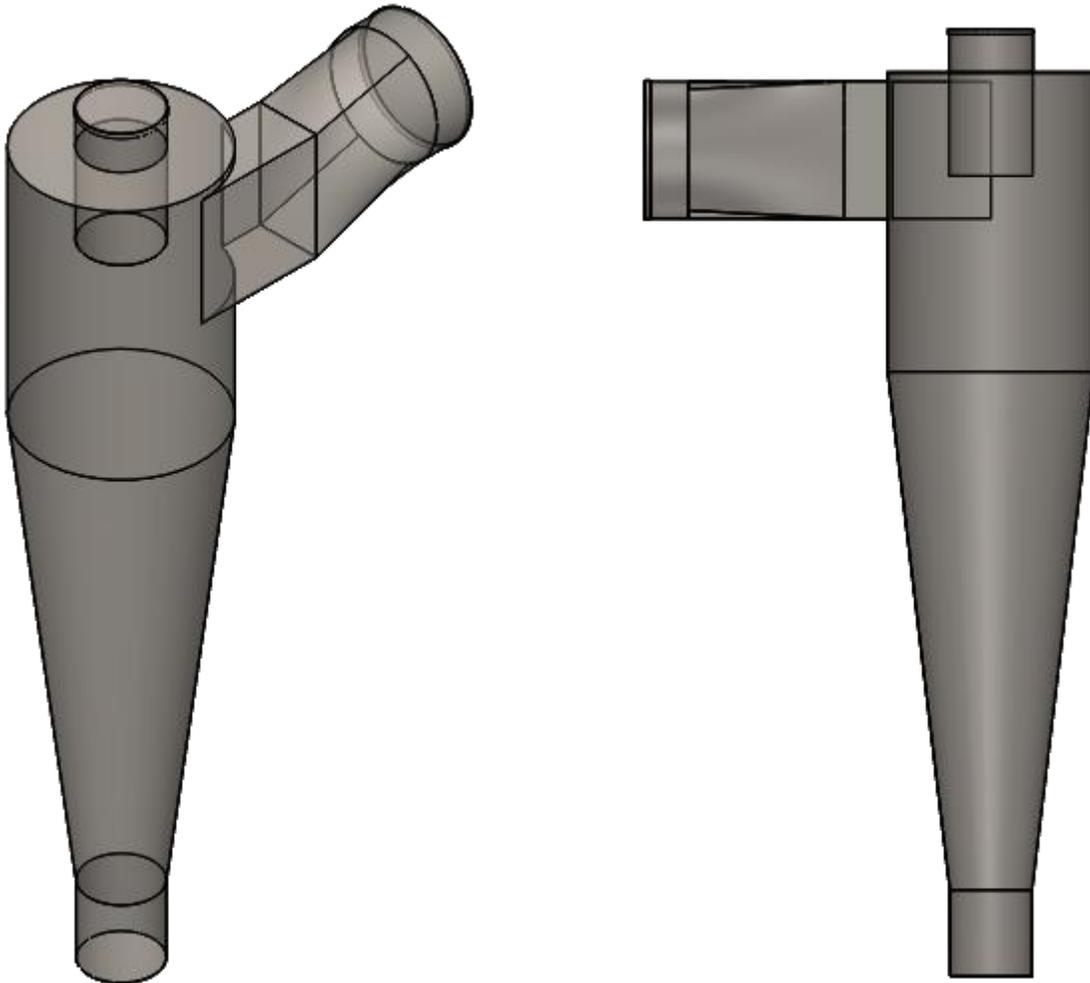
Al inicio del proceso de diseño, se precisó que el ciclón que se iba a proyectar era catalogado como de alta eficiencia. Tomando como referencia la curva presentada por la bibliografía consultada y expuesta en la figura 19, se hace una superposición de la eficiencia obtenida para el ciclón proyectado para comparar la coherencia de la curva, el resultado se muestra en la figura 23:

Figura 23. Comparación de las curvas del ciclón y la de alta eficiencia



La gráfica muestra claramente que los resultados obtenidos para el ciclón del proyecto, no sólo son coherentes, sino que superan el promedio sugerido por la literatura. Estos resultados viabilizan las etapas posteriores del proceso de diseño y simulación del ciclón.

Figura 24. Configuración del ciclón

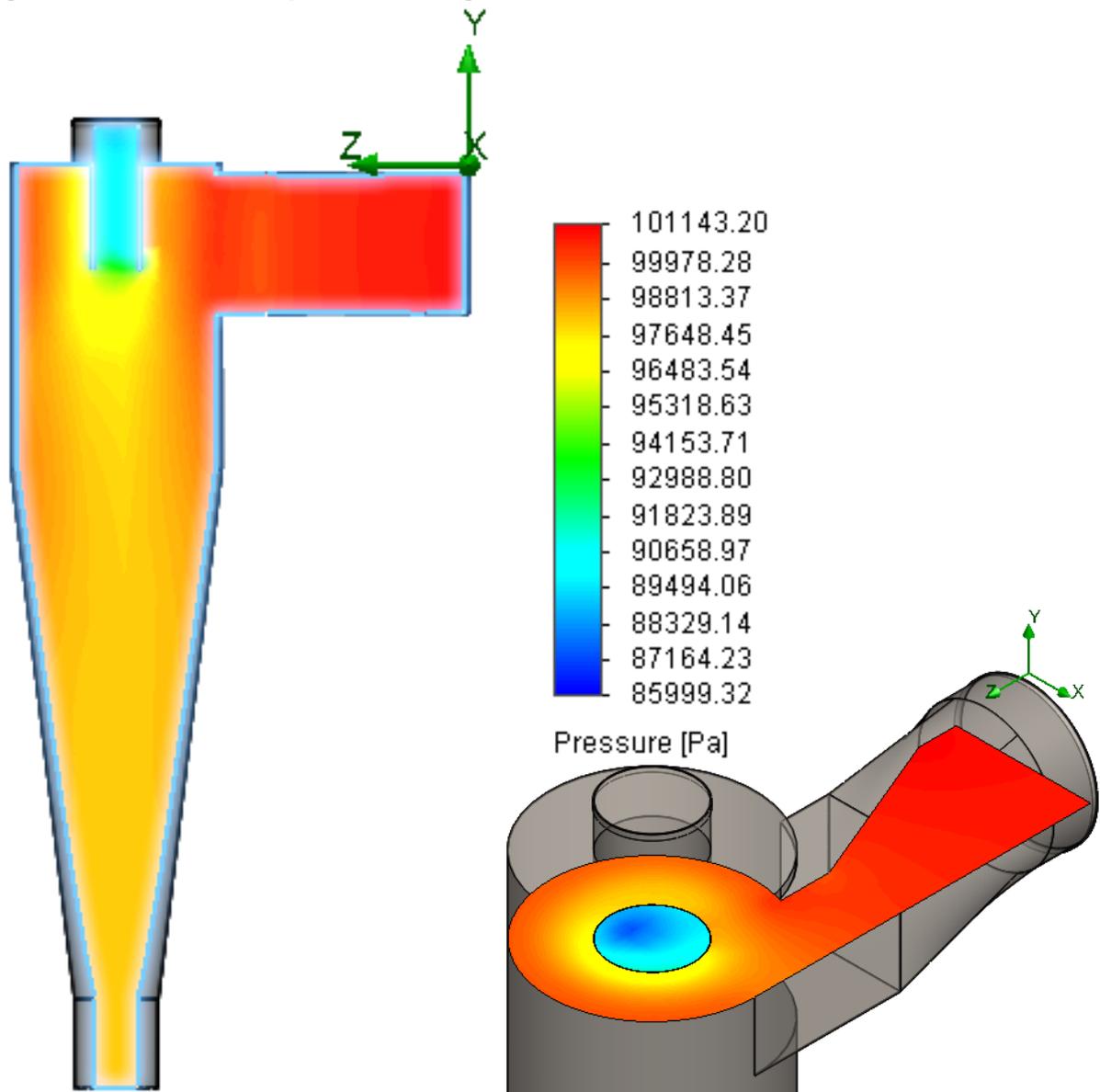


Los valores de la tabla 9 y los obtenidos a lo largo de los cálculos preliminares brindan los valores de referencia necesarios para la realización de las simulaciones. Las simulaciones se hicieron en varias etapas con el fin de determinar dos parámetros importantes, el primero, la caída de presión del fluido a

lo largo del ciclón y la segunda, la eficiencia de captación de las partículas del mismo.

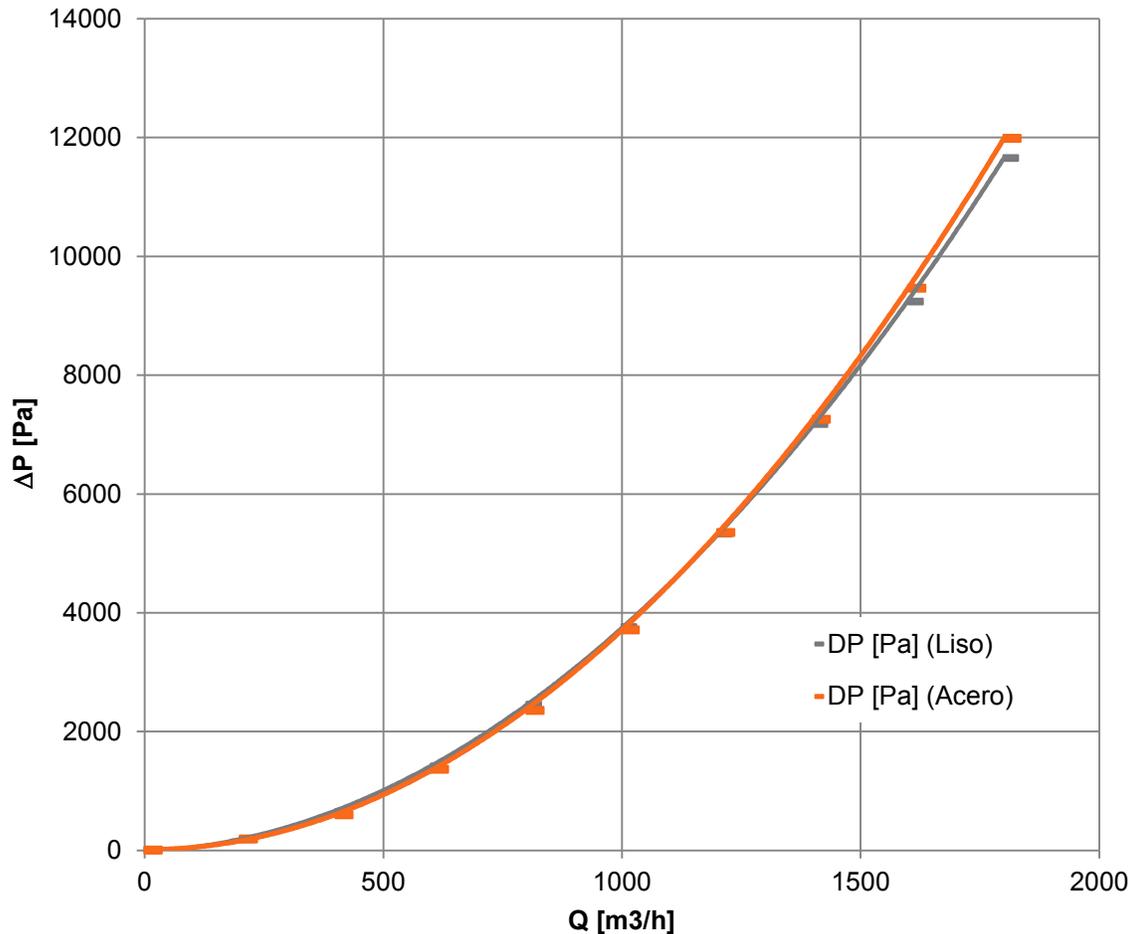
Para la caída de presión a lo largo del ciclón, se hicieron simulaciones variando el caudal de aire que atraviesa el dispositivo, comenzando desde los 200 m³/h hasta los 1800 m³/h. En un inicio, la simulación se hizo con material liso, luego, se hizo con acero y se trazaron las curvas de pérdidas de presión en el dispositivo para ambas circunstancias.

Figura 25. Distribución de presión a lo largo del ciclón



Con los datos obtenidos de las simulaciones, se trazaron las curvas de caída de presión en función del caudal, las cuales se presentan en la figura 26:

Figura 26. Caída de presión en función del caudal para el ciclón



Como se aprecia en la curva, las pérdidas con el acero son un poco más altas que con el material liso, lo cual era de esperarse, no obstante, la diferencia es poco significativa.

Después de simular la caída de presión en el ciclón, se procedió a simular el comportamiento del material particulado al interior del mismo. Debido al espectro variado de partículas, fue necesario hacer una simulación por cada grupo, debido a que para hacer el conteo de las partículas que pasaban a través de las fronteras del dominio, no era posible hacer la discriminación por diámetros como lo requiere el cálculo de la eficiencia. El diámetro aerodinámico es uno de los requerimientos

del software para poder hacer la inyección de partículas, el otro, es la densidad. La inyección de partículas se hace en una de las fronteras, en este caso, la entrada, y se hace la revisión de cuántas partículas atraviesan la salida del sistema. El balance entre el número de partículas a la entrada y a la salida, permite ver el porcentaje de captura realizado por el ciclón.

Para poder hacer una simulación realista, en principio se pensó en generar las misma cantidad de partículas que las que Ennan [7] mencionó en su estudio. La referencia menciona una concentración que varía de 110 mg/m^3 a 210 mg/m^3 , es decir, por cada metro cúbico de aire insuflado al sistema, se percibieron entre 110 a 210 miligramos de partículas. Con este parámetro se hizo una tabla para estimar el número de partículas inyectadas, la cual se muestra a continuación:

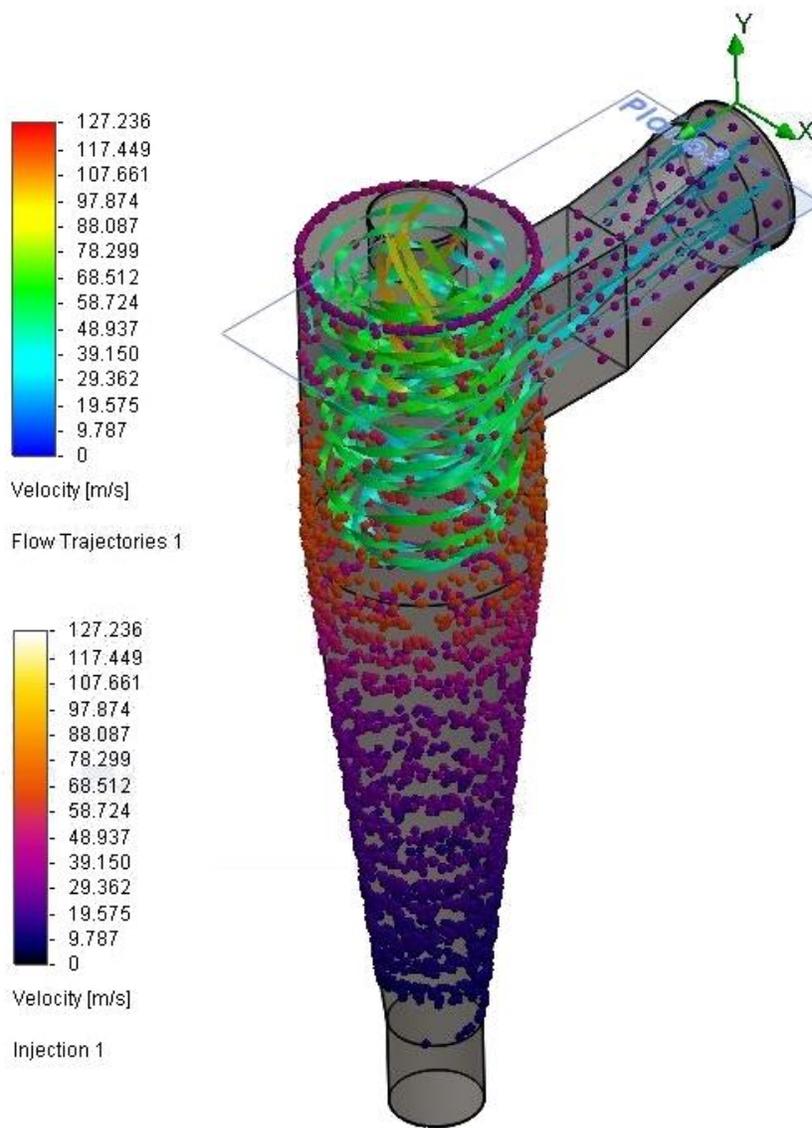
Tabla 10. Número de partículas requeridas para la simulación

Partículas		Material Generado [g/h]			Número de Partículas [1/h]		
		Concentración de Partículas [mg/m ³]			Concentración de Partículas [mg/m ³]		
d [μm]	%	210	110	166,5	210	110	166,5
0,125	11,34%	28,57	14,97	21,77	4,57E+15	2,39E+15	3,48E+15
0,25	20,18%	50,86	26,64	38,75	1,02E+15	5,33E+14	7,75E+14
0,5	13,83%	34,86	18,26	26,56	8,71E+13	4,56E+13	6,64E+13
1	15,87%	40,00	20,95	30,48	1,25E+13	6,54E+12	9,52E+12
2	9,98%	25,14	13,17	19,16	9,82E+11	5,14E+11	7,48E+11
4	9,75%	24,57	12,87	18,72	1,20E+11	6,28E+10	9,14E+10
8	9,98%	25,14	13,17	19,16	1,53E+10	8,04E+09	1,17E+10
16	9,07%	22,86	11,97	17,41	1,74E+09	9,13E+08	1,33E+09

Para cada diámetro, se calculó la masa de partículas que fluye en el sistema usando el porcentaje existente dentro del espectro y la concentración. Se tomaron tres cifras de concentración, la máxima, la mínima y la promedio. Con el caudal máximo de operación, multiplicado por la concentración, se obtienen el flujo particular en gramos por hora, consignado en el segundo bloque de la tabla 10. Tomando el volumen de las partículas y la densidad ponderada, se obtiene la masa de cada partícula. Con esa masa, se obtienen el flujo nominal de partículas por unidad de tiempo, el cual se observa en el tercer bloque de la tabla. Como puede verse es un número bastante elevado, lo cual se pensó como un inconveniente al hacer la simulación.

En principio se hicieron simulaciones de prueba con números mucho más pequeños de partículas, los cuales se fueron aumentando hasta llegar a los valores de la tabla 10. Lo que se observó es que los resultados porcentuales eran idénticos, es decir, el porcentaje de captación de las partículas inyectadas era el mismo aun variando la cantidad de partículas que se inyectaba en el sistema. Con ese hallazgo, se procedió a hacer la simulación con cada diámetro particular, según el histograma que se tomó como referencia. En la figura 27 se muestra una imagen tomada de las simulaciones realizadas con las partículas.

Figura 27. Simulación del comportamiento de las partículas en el ciclón



En la escala cromática superior, aparece la escala de velocidad del aire, las cintas, representan las trayectorias del gas al interior del ciclón. La escala cromática inferior representa la velocidad de las partículas. En esta imagen en particular, se ven algunas partículas en la parte superior del ciclón, esto porque el diámetro aerodinámico utilizado en esta simulación en especial fue el de 0,7608 μm , para el cual, según Lapple [11] debe presentar una eficiencia de recolección mínima del 50%.

Tabla 11. Eficiencias calculadas a partir de las simulaciones

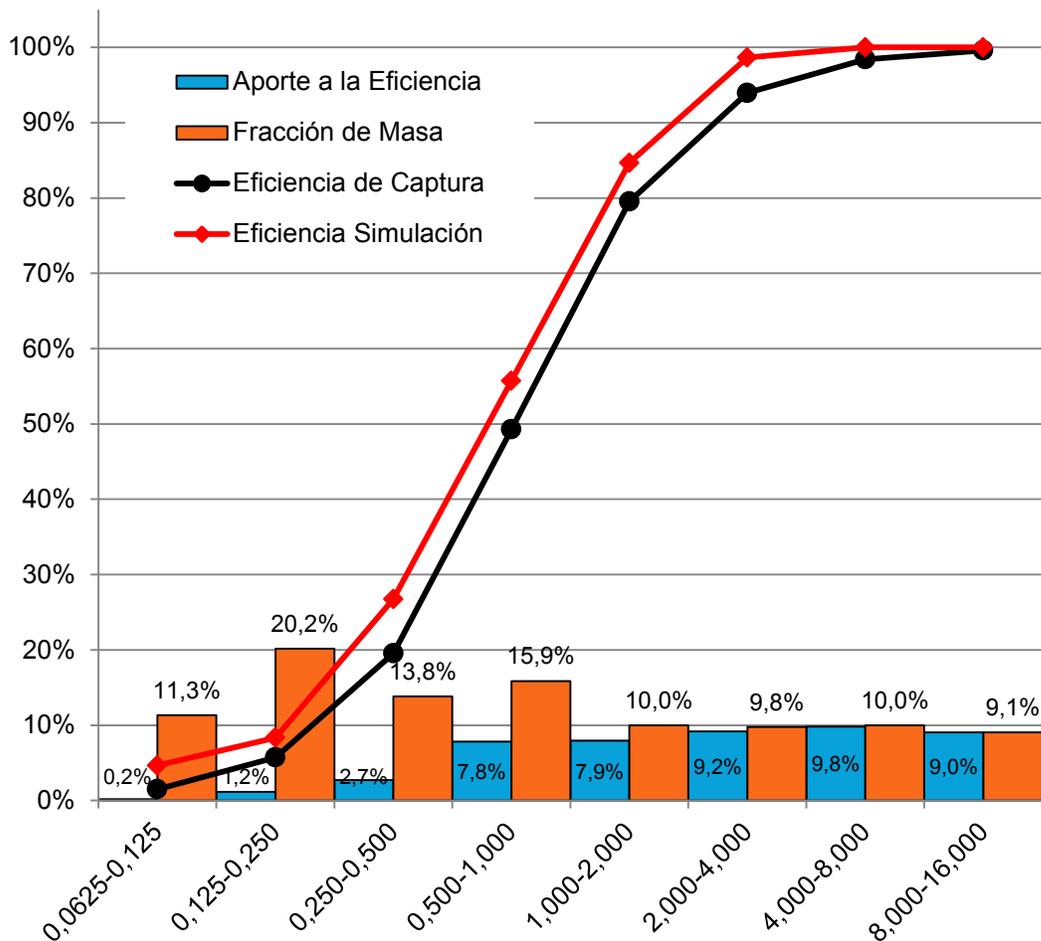
Rango	Promedio	Partículas Inyectadas	Partículas Recolectadas	Eficiencia
0,0625-0,125	0,094	100.000	4654	4,65%
0,125-0,250	0,188	100.000	8345	8,35%
0,250-0,500	0,375	100.000	26734	26,73%
0,500-1,000	0,750	100.000	55726	55,73%
1,000-2,000	1,500	100.000	84678	84,68%
2,000-4,000	3,000	100.000	98655	98,66%
4,000-8,000	6,000	100.000	100000	100,00%
8,000-16,000	12,000	100.000	100000	100,00%

En la tabla 11 se pueden ver las eficiencias obtenidas para cada conjunto de partículas según sus diámetros aerodinámicos. Si se comparan estas eficiencias con las obtenidas en a través de los cálculos (tabla 9), se ve que los resultados son bastante similares, no obstante, en el simulador las eficiencias siempre son un poco más altas.

Como se mencionó con anterioridad, a pesar de haber calculado cuál debía ser el número de partículas necesarias para obtener una concentración similar a la que se mencionó la bibliografía de referencia, se observó que, aun variando la cantidad de partículas a magnitudes más pequeñas, los resultados porcentuales de la captación eran prácticamente iguales, fue por ello que, con el fin de simplificar los cálculos, se usaron inyecciones de 100.000 partículas.

Con el fin de tener una visión comparativa de los resultados, usando los datos de la tabla 11, se construyó una curva de eficiencia discretizada superpuesta a la de la figura 22, la cual se muestra en la figura 28:

Figura 28. Comparación de los resultados obtenidos en la eficiencia del ciclón



Después de hacer los cálculos y las simulaciones respectivas, se concluye que el diseño del ciclón es satisfactorio, por lo cual puede procederse a la siguiente etapa de diseño que es la selección de los dispositivos de filtrado.

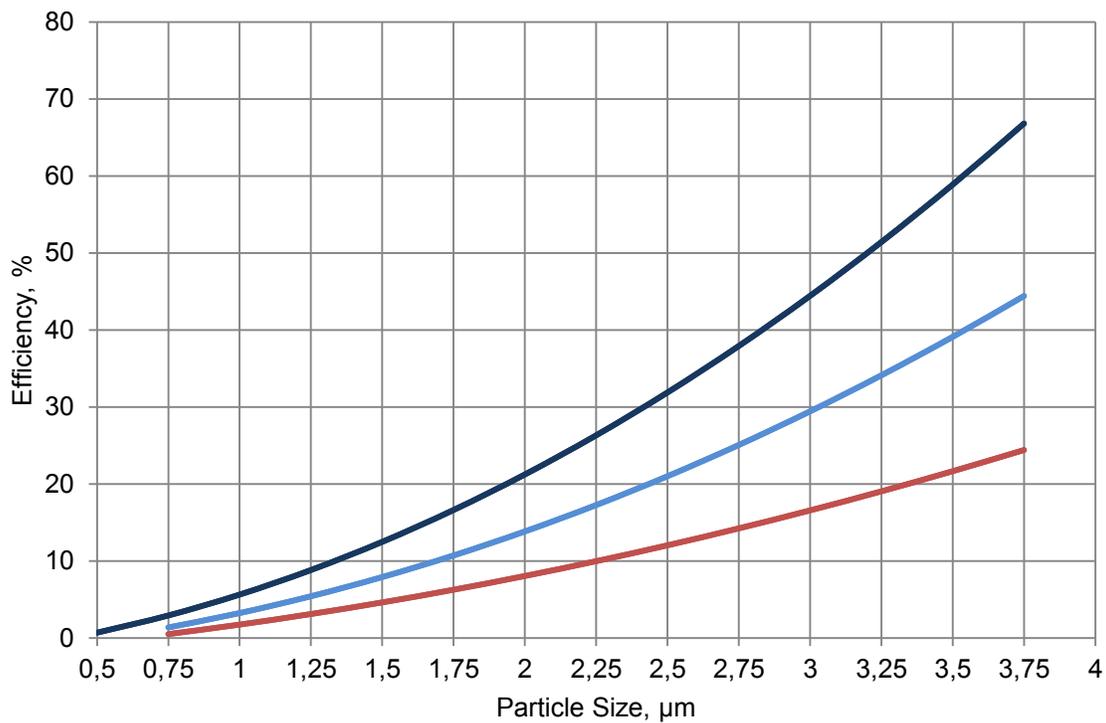
3.4 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FILTROS

Entendiendo que un porcentaje importante de las partículas no van a ser colectadas por el ciclón, es necesario implementar un sistema de filtrado que capte estas partículas, debido a que el aire que entra al sistema vuelve a ser reintegrado a la atmósfera y debe estar libre de partículas tóxicas inhalables. Partiendo de las eficiencias calculadas para el ciclón y del espectro particulado no captado, se tiene la base para la selección de los dispositivos de filtración.

La mayor parte de las partículas a captar tienen diámetros aerodinámicos inferiores a una micra, por lo tanto, es necesario seleccionar un filtro que tenga la capacidad de captación para estas partículas. Como este filtro es bastante fino, es necesario colocar un prefiltro con el fin de proteger y alargar la vida útil del filtro más fino. Con esta conclusión se tiene que la etapa de filtrado del sistema tiene dos fases, una con un filtro más grueso y la otra con un filtro más fino. En función de los requerimientos de los diámetros aerodinámicos de las partículas, se escogieron los siguientes filtros:

- ✓ **Prefiltro:** el prefiltro seleccionado es denominado Coarse Panel Filter de la casa Halton. En el Anexo 1 se presentan todas las características técnicas del filtro brindadas por el fabricante. La curva de eficiencia del filtro se presenta a continuación:

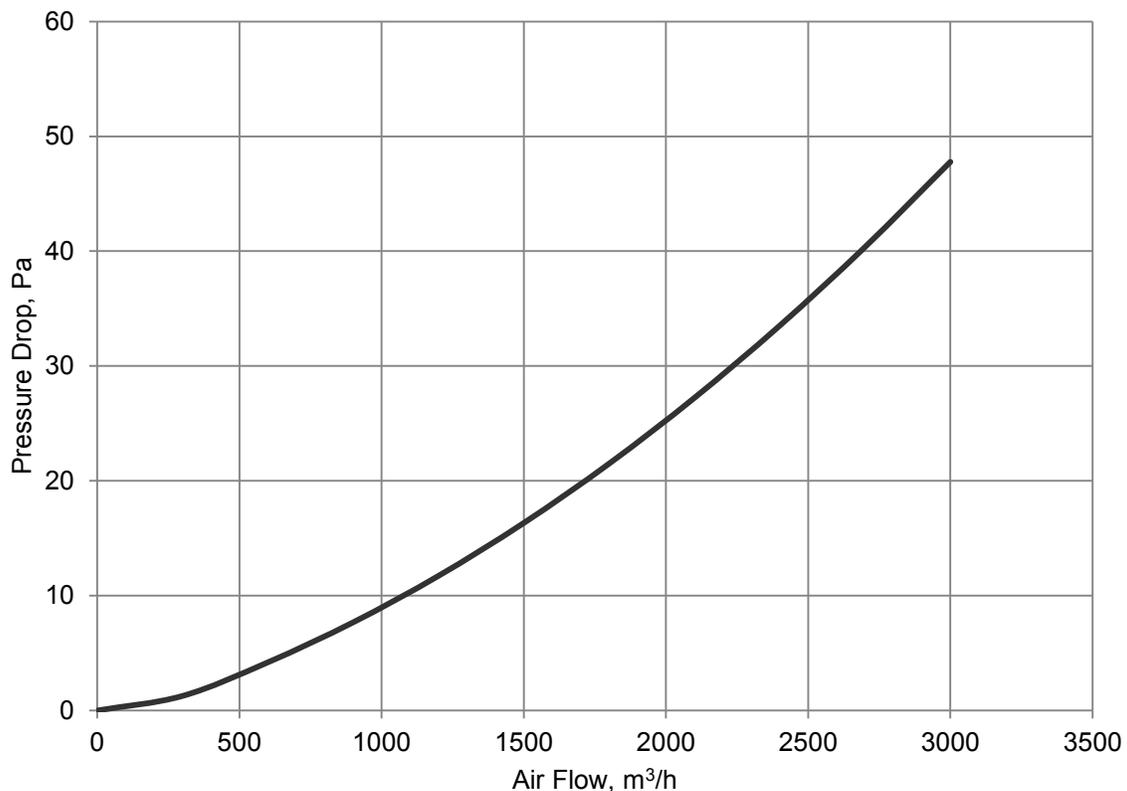
Figura 29. Curvas de eficiencia del prefiltro



Fuente: Halton Product Catalogue for Air Filtration p 23.

La curva muestra comportamientos interesantes del filtro. El eje horizontal presenta el diámetro aerodinámico de las partículas en micras, el eje vertical, la eficiencia en porcentaje. La curva de color azul oscuro muestra la eficiencia con un flujo de 1700 m³/h, la de color azul claro con un flujo de 1200 m³/h y la de color rojo presenta la eficiencia con un flujo de 700 m³/h. Al comparar ambas curvas se evidencia la dependencia de la eficiencia con el flujo e implícitamente, con la caída de presión, tal como se expresa en la curva de la figura 30:

Figura 30. Curva de caída de presión en función del caudal para el prefiltro



Fuente: Halton Product Catalogue for Air Filtration 2013 p. 23

Como se mencionó con anterioridad, el papel del prefiltro es el de proteger el filtro fino, el cual será más susceptible a taponamientos con partículas grandes, generando una caída de presión más amplia si no se coloca el prefiltro. A partir de la curva de la eficiencia de captación del ciclón (figuras 22 y 27), se infiere que la zona de trabajo de este 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%. Para diámetros de 5,8 micras en adelante,

extrapolando la eficiencia del filtro, se obtienen un 100% de capacidad de retención, lo cual es muy bueno para el filtro fino.

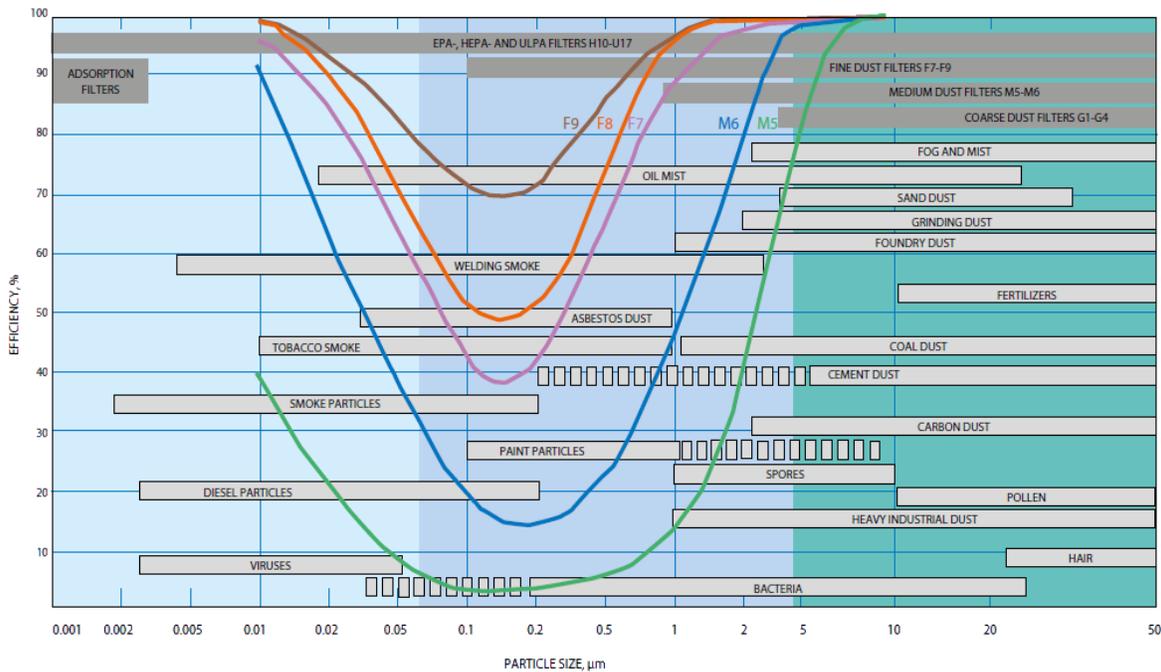
Con el fin de poder tener un comportamiento continuo de la caída de presión, se hizo la regresión de la curva, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{CF} = -1,091 + 0,00695Q + 0,0000031143Q^2 \quad (13)$$

En donde ΔP_{CF} es la caída de presión a través del filtro y Q es el caudal. Con esta curva, se procederá a construir la curva de todo el sistema de filtros y de todo el sistema en general.

- ✓ **Filtro Fino:** según el catálogo de Halton, para la filtración de humos de soldadura es necesario un filtro de clasificación H10 a U17, como lo muestra la figura 31, tomada del catálogo del fabricante.

Figura 31. Aplicación de los filtros según los requerimientos

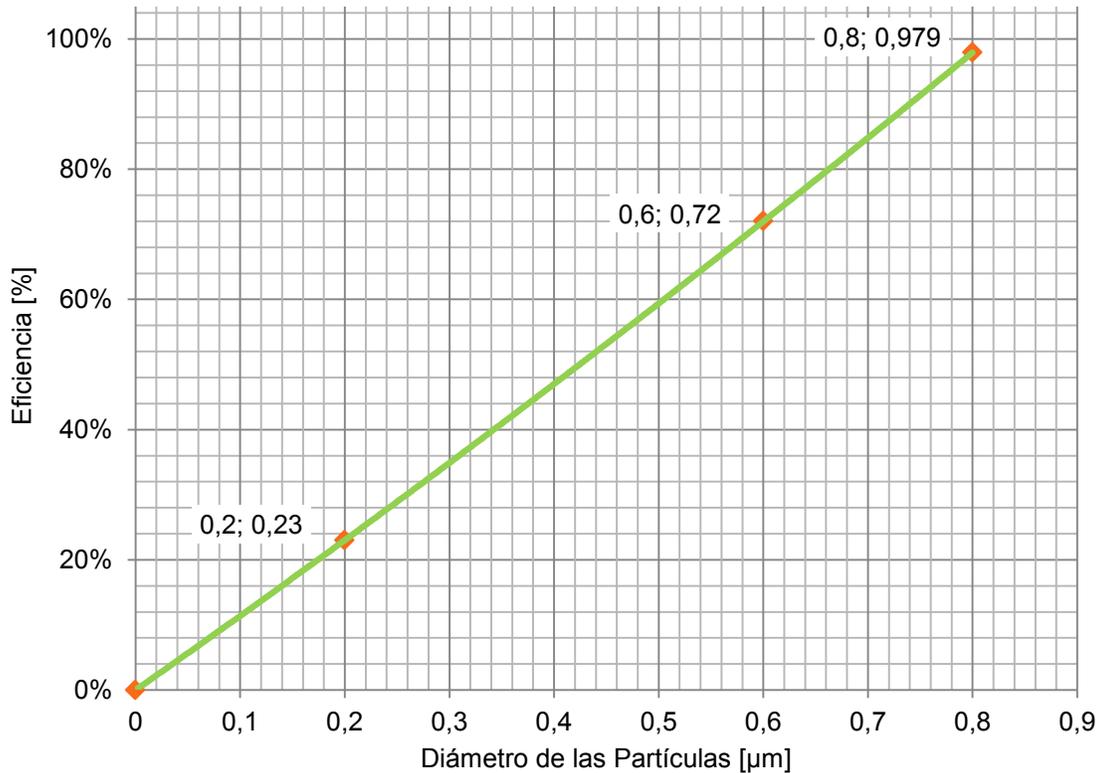


Fuente: Halton Product Catalogue for Air Filtration 2013 p. 6

Con esta base referencial, se eligió el filtro denominado Panel Ultra Fine Filter, del cual se presentan todas las características técnicas en el anexo. Para iniciar la

sustentación de la aplicación de este filtro, se muestra la curva de la eficiencia obtenida a partir de la información suministrada en el catálogo del fabricante.

Figura 32. Curva de eficiencia para el filtro fino



Fuente: Halton Product Catalogue for Air Filtration 2013 p. 32

En la ficha técnica proporcionada por el fabricante, aparecen los datos etiquetados en la gráfica. A partir de estos datos se hace una regresión obteniendo una curva parabólica, esto con el fin de poder interpolar la eficiencia para los diámetros ubicados en las inmediaciones de los datos suministrados. La eficiencia obtenida tiene el comportamiento trazado por la ecuación que se muestra a continuación:

$$\eta_{FF} = 0,1213d^2 + 1,1269d \quad (14)$$

En donde η_{FF} es la eficiencia del filtro fino y d es el diámetro de las partículas. El fabricante no da información acerca del caudal utilizado para construir la curva, por lo que esta se utiliza con el caudal de operación para realizar las estimaciones de la capacidad de captación.

Combinando los espectros de captación de los filtros y del ciclón, se puede construir la tabla de la eficiencia global del sistema, la cual se presenta a continuación:

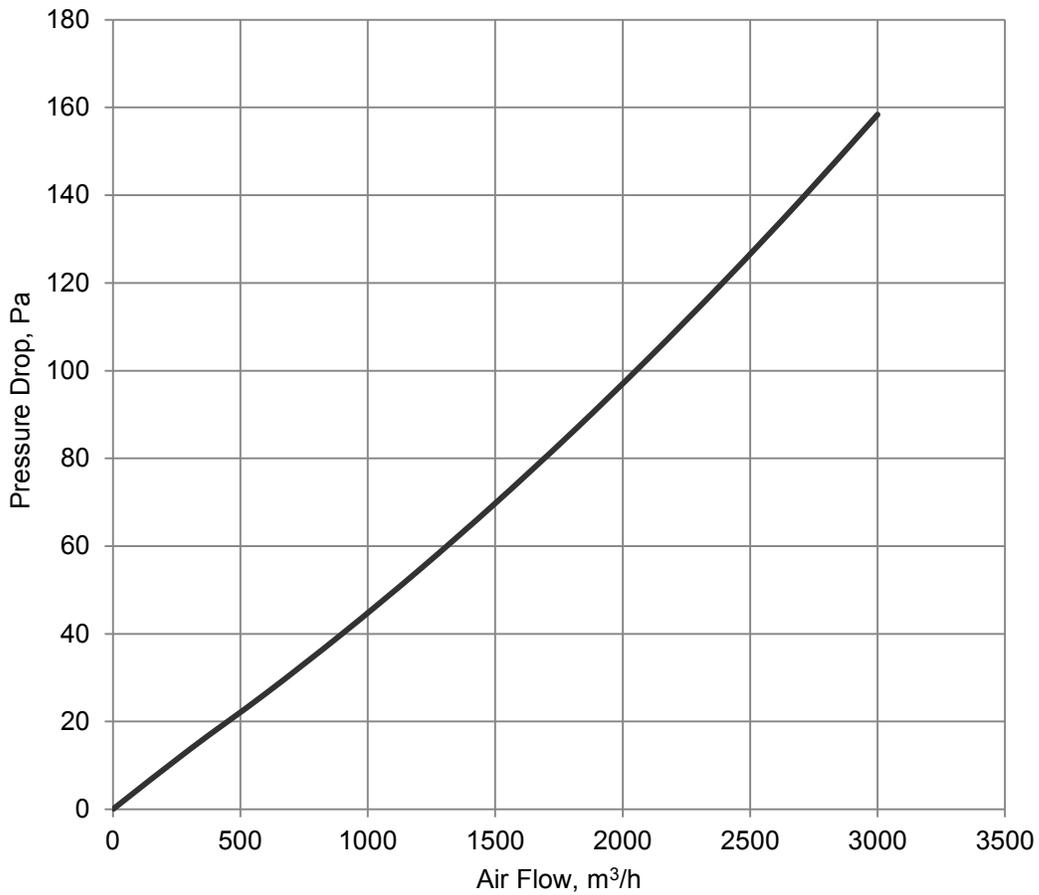
Tabla 12. Estimación de la eficiencia global del sistema de filtración

Rango	Promedio	Fracción de Masa	Eficiencia Ciclón	Eficiencia Prefiltro	Eficiencia Filtro Fino	Eficiencia del Sistema
0,0625-0,125	0,09	11,34%	1,496%	0,00%	10,67%	1,361%
0,125-0,250	0,19	20,18%	5,726%	0,00%	21,56%	5,257%
0,250-0,500	0,38	13,83%	19,546%	0,00%	43,96%	7,596%
0,500-1,000	0,75	15,87%	49,285%	1,37%	91,34%	15,185%
1,000-2,000	1,50	9,98%	79,539%	7,91%	100,00%	9,977%
2,000-4,000	3,00	9,75%	93,957%	29,44%	100,00%	9,751%
4,000-8,000	6,00	9,98%	98,418%	100,00%	100,00%	9,977%
8,000-16,000	12,00	9,07%	99,600%	100,00%	100,00%	9,070%
EFICIENCIA GLOBAL DEL SISTEMA						68,175%

La tabla 12 muestra la capacidad de captación total del sistema incluyendo filtros y ciclón. Se resaltaron especialmente los rangos de partículas en donde los filtros hacen su aporte más significativo con respecto al ciclón. Como puede verse, para los diámetros superiores a 2 micras, el ciclón es quien asume la mayor parte de la carga, sin embargo, para diámetros inferiores a la micra, los filtros hacen un aporte muy importante ya que ese rango presenta una eficiencia limitada por parte del ciclón. En general, puede anotarse que el sistema de filtros hace un aporte a la eficiencia global del sistema superior al 21%.

La siguiente tarea está en estimar la caída de presión a lo largo del segundo filtro, con el fin de construir la curva del sistema. Para este fin, se parte directamente de la curva que otorga el fabricante en la ficha técnica, posteriormente se hace una regresión para poder construir las ecuaciones que en última instancia permitan trazar la curva del filtro fino y de todos los componentes hasta ahora asociados al extractor. La figura 33 presenta la curva de la caída de presión del filtro fino en función del caudal.

Figura 33: Curva de caída de presión en función del caudal para el filtro fino



Fuente: Halton Product Catalogue for Air Filtration 2013 p. 32

Haciendo la regresión de la curva, se obtiene la siguiente ecuación:

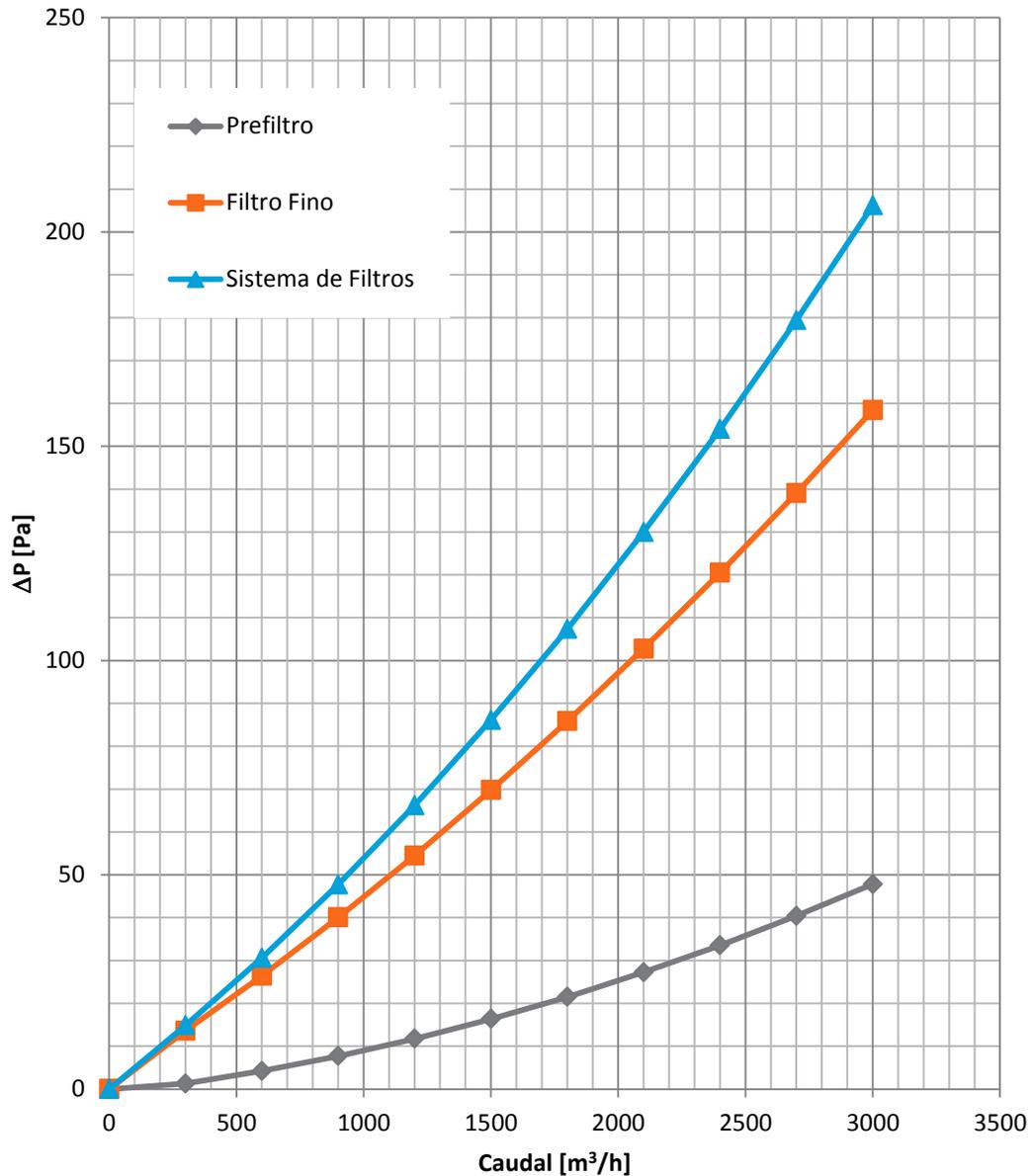
$$\Delta P_{FF} = 1,60028 + 0,03861Q + 0,00000455Q^2 \quad (15)$$

Donde ΔP_{FF} es la caída de presión en el filtro fino y Q es el caudal de aire.

A este punto del diseño, ya se han construido las curvas de caída de presión en función del caudal para todos los componentes del sistema. En primer lugar, se presentará el comportamiento del conjunto de filtros. Cada filtro hace un aporte a la caída de presión del sistema, con lo que se tiene que, el comportamiento combinado de los filtros será la suma de los aportes que cada uno de ellos haga a la caída de presión en la etapa de filtración. La figura 34 muestra la curva del

comportamiento de cada filtro y del conjunto, a partir de la información otorgada por el fabricante:

Figura 34: Curva de caída de presión en función del caudal para el sistema de filtros



Aunque la curva de la figura 34 es un insumo muy importante, se deseaba conocer un poco más acerca de cómo sería el comportamiento del gas y de las partículas al interior del sistema de filtros. Para ello se construyó una simulación intentando

reproducir de la manera más fiel posible el fenómeno con la limitada información disponible acerca de los filtros.

Para realizar una simulación de medios porosos en SolidWorks Flow Simulation (como es el caso de los filtros), es necesario especificar ciertas propiedades del material en función del modelo que se utilice para describir el fenómeno. Los parámetros comunes a todos los modelos son la porosidad efectiva del medio poroso, que se define como la fracción del volumen ocupada por los poros con respecto al volumen medio total y la permeabilidad, la cual se puede definir dentro de las tres opciones siguientes:

- ✓ **Isotrópica:** cuando la permeabilidad del medio es independiente de la dirección.
- ✓ **Unidireccional:** ocurre cuando la permeabilidad del medio se da en una sola dirección.
- ✓ **Ortotrópico:** corresponde al caso más general, cuando la permeabilidad medio varía con la dirección y está totalmente gobernada por un vector con sus tres componentes cartesianas.

Una vez seleccionada el tipo de resistencia, queda por definir el modelo para la resistencia al paso de fluido. De manera genérica, la resistencia al flujo del fluido está dada por la ecuación:

$$k = -\frac{\nabla P}{\rho \vec{V}} \quad (16)$$

Donde P , ρ , y \vec{V} son la presión, la densidad, y la velocidad, respectivamente. El coeficiente k se puede calcular de acuerdo con uno de los siguientes modelos:

$$k = \frac{\Delta P S}{\dot{m} L} \quad (17)$$

Donde ΔP es la diferencia de presión entre los lados opuestos de un sector con forma de paralelepípedo del cuerpo poroso, \dot{m} es la tasa de flujo de masa a través del cuerpo, S y L son el área de la sección transversal del cuerpo y la longitud en

la dirección seleccionada, respectivamente. ΔP se puede expresar como una función de \dot{m} , mientras que S y L son constantes. En lugar del flujo másico, se puede especificar caudal volumétrico, \dot{V} . En este caso SolidWorks Flow Simulation calcula el flujo másico a través de la relación $\dot{m}=\rho\dot{V}$.

$$k = \frac{A\vec{V}+B}{\rho} \quad (18)$$

Donde \vec{V} es la velocidad del fluido, A y B son constantes, ρ es el fluido densidad. Aquí, sólo es necesario especificar A y B , ya que \vec{V} y ρ son calculadas por el software.

$$k = \frac{\mu}{\rho D^2} \quad (19)$$

Donde μ y ρ son la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, D es el diámetro de poro. Aquí, sólo es necesario especificar D , ya que μ y ρ son calculados. La ecuación anterior puede presentar una variación al introducir el factor de fricción f , describiendo el caso más general. En ese caso, f , es un parámetro de entrada.

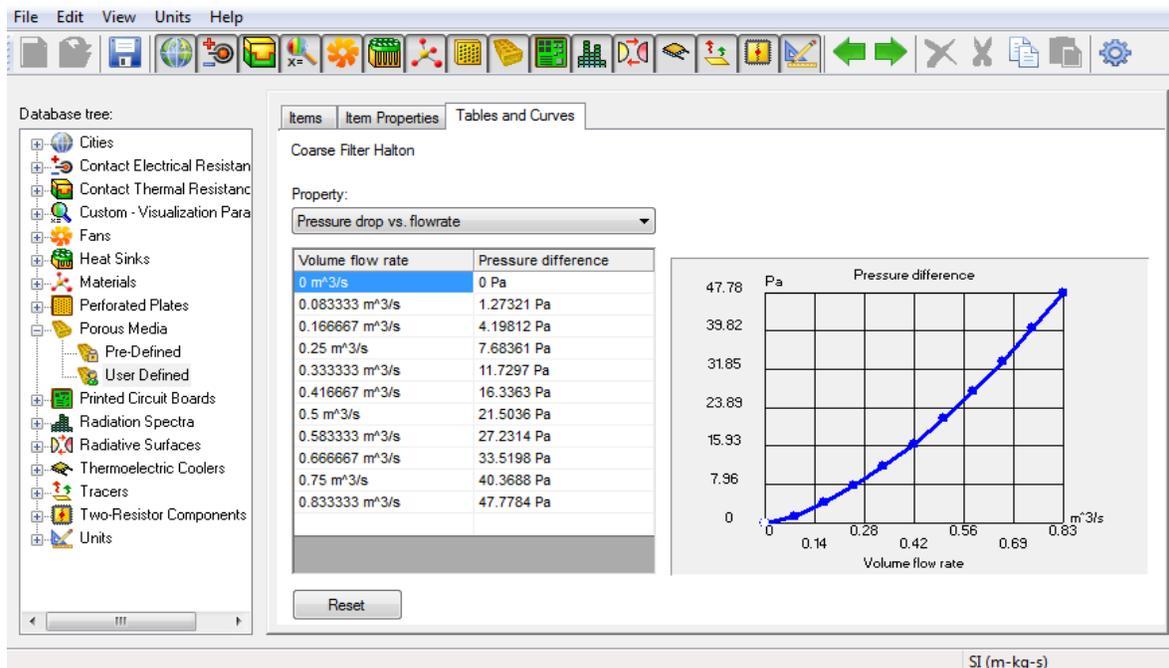
$$k = \frac{f\mu}{\rho D^2} \quad (20)$$

Dada la información disponible, se optó por el modelo de la ecuación (17) dado que la información disponible corresponde a la caída de presión, el área y el espesor de los filtros. Aunque se pudo modelar de manera coherente la caída de presión, la retención de las partículas era más complicada de simular, dado que no había forma de determinar exactamente los diámetros de los poros. En últimas se hizo la simulación con el fin de establecer el comportamiento del fluido dentro del compartimiento de los filtros en cuanto a presión y velocidad.

Para el desarrollo de la simulación se operó con una porosidad del 50% para cada filtro y se introdujeron las curvas de caída de presión dadas por el fabricante y las medidas de los filtros, como se muestra en la figura 35. El principal objetivo de esta simulación fue determinar la interacción del fluido con el sistema de filtración completo, incluyendo el compartimiento que contiene los filtros. Las curvas de la

figura 34 no están teniendo en cuenta los efectos de la caída de presión que se origina por el compartimento de los filtros, adicionalmente, los cambios en la trayectoria del fluido ejercen un aporte importante a la pérdida energética del sistema, lo cual es un aspecto importante a la hora de seleccionar el impulsor. Al finalizar la simulación para los diferentes caudales, se obtuvo una curva del sistema que efectivamente incluye las pérdidas asociadas a la circulación del fluido al interior del compartimiento.

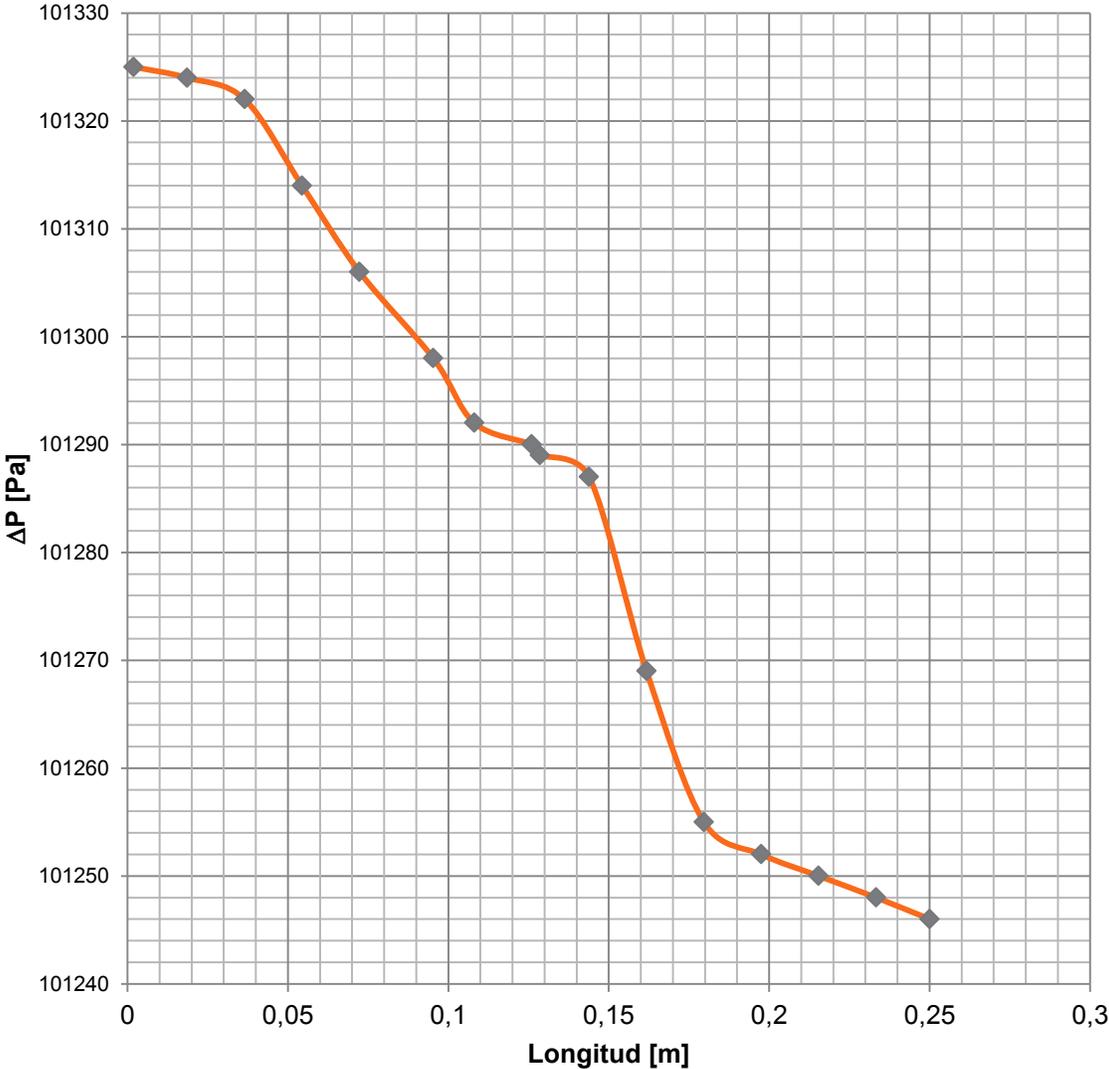
Figura 35. Introducción de la curva característica del filtro en SolidWorks Flow Simulation



La figura 36 se muestra el comportamiento de la presión a lo largo de una línea transversal imaginaria ubicada en el centro del compartimiento de los de filtros. Con el fin de evaluar la calidad de los resultados, se analizaron las características topológicas de la curva de la figura 36. En primer lugar, la primera parte de la curva presenta una zona casi horizontal, la cual es coherente con la entrada del aire antes de entrar en contacto con el filtro. Posteriormente se evidencia una pendiente descendente, correspondiente a la caída de presión asociada al primer filtro. Luego, se reduce esta pendiente y se observa una inclinación mucho más leve, lo cual debe representar el espacio existente entre ambos filtros, donde el fluido no encuentra una resistencia importante. Más adelante, la pendiente es mayor que la primera, lo cual es lógico si se piensa que el segundo filtro debe

ofrecer una caída de presión más grande que el primero. Por último, la pendiente de nuevo decrece, representando la pérdida de presión del aire al salir del compartimento. A la luz de este análisis se encuentra que los resultados son coherentes y lógicos.

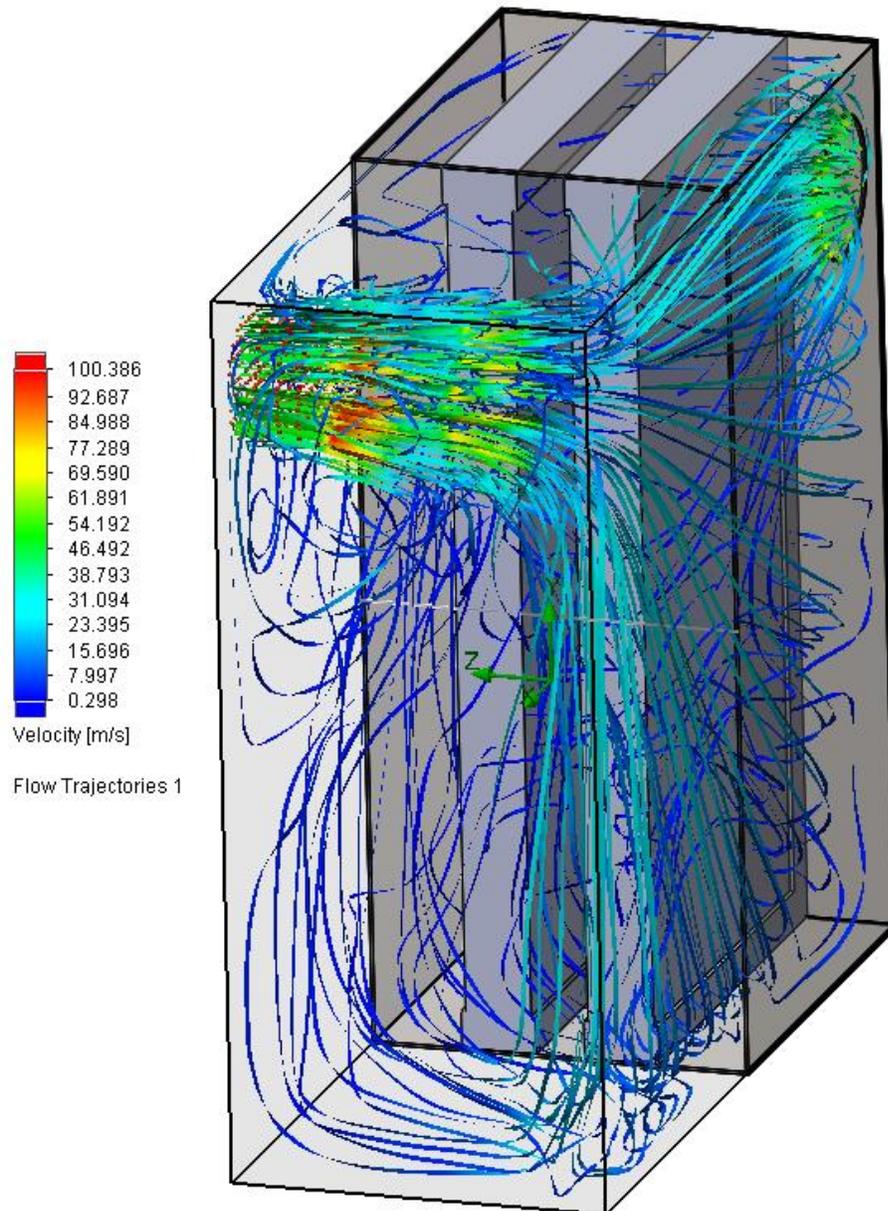
Figura 36. Comportamiento de la presión a lo largo de la línea transversal de la caja de filtros a 1200 m³/h



La figura 37 presenta una imagen de una las simulaciones realizadas en la que se incluyó el trazado de las líneas de flujo con el fin de visualizar el comportamiento de las trayectorias del aire y su desaceleración al entrar en contacto con los filtros,

así como las posibles influencias de los cambios bruscos de trayectoria que se dan al interior del compartimiento.

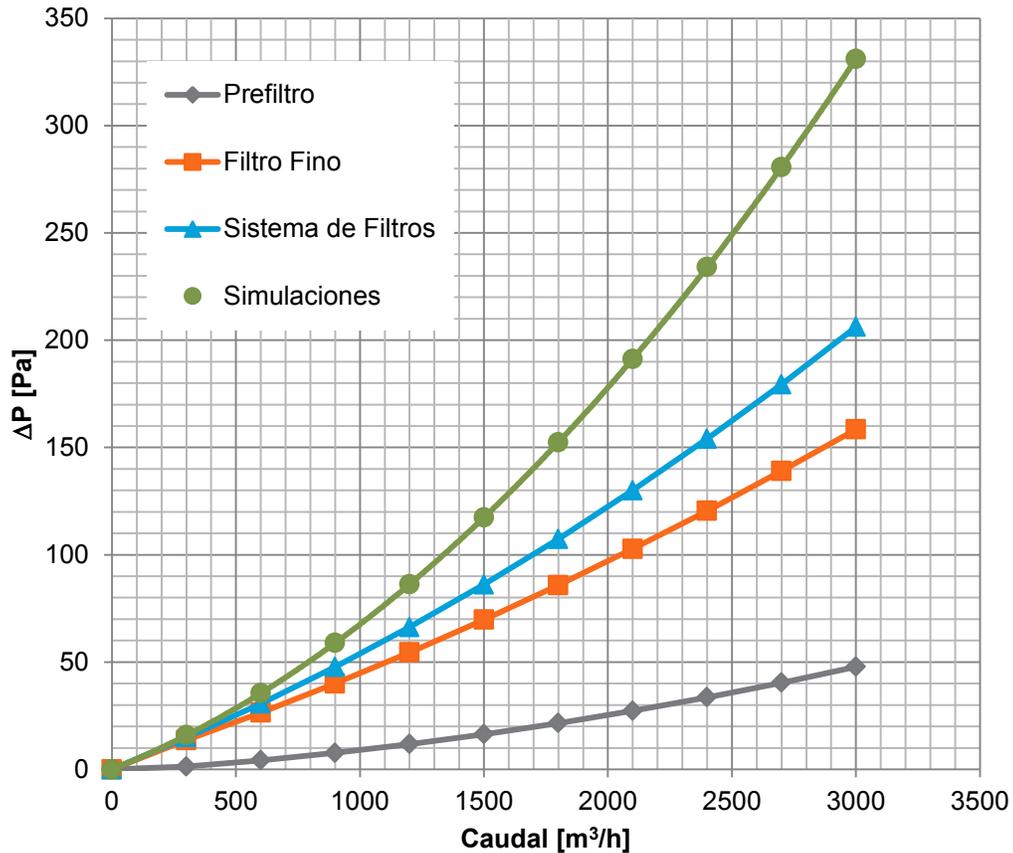
Figura 37. Imagen de la simulación de los filtros



Es importante resaltar como en la gráfica de la simulación de la figura 37 las líneas de flujo del aire muestran recirculación parcial del fluido al interior del compartimiento, efecto deseable si se busca maximizar la captación de material particulado.

Con los datos obtenidos de la simulación, se construyó la curva del sistema de filtros, teniendo en cuenta que, la simulación permitió incluir el comportamiento del aire al interior del compartimento de los filtros.

Figura 38. Curva de las simulaciones del sistema de filtración



La figura 38 hace la comparación de las curvas de los filtros con la curva de los filtros instalados dentro del compartimento. Nótese el incremento en la caída de presión por efecto del compartimento de los filtros. La ecuación que describe el comportamiento del sistema de filtrado con respecto al caudal, obtenida a través de una regresión lineal usando EES se muestra a continuación:

$$\Delta P = 0,091 + 0,0461Q + 0,00002142Q^2 \quad (21)$$

Con la información construida hasta el momento, es posible elaborar una curva que describa el comportamiento del sistema completo, teniendo así los datos necesarios para la selección del impulsor del fluido.

3.5 SELECCIÓN DEL IMPULSOR

A partir de los comportamientos establecidos a través de las simulaciones para el ducto, el ciclón y los filtros, se construyó una tabla que permite trazar la curva del sistema completo, paso previo a la selección del impulsor. La tabla mencionada se presenta a continuación:

Tabla 13. Caída de presión en función del caudal para el sistema

Caudal Q[m ³ /h]	Ducto ΔP [Pa]	Ciclón ΔP [Pa]	Filtros ΔP [Pa]	Total ΔP [Pa]
0	0	0	0	0
200	11,48	188,094	10,16366595	209,74
400	48,00	594,44	21,94995207	664,39
600	102,32	1359,84	35,44949361	1497,61
800	193,35	2354,29	50,66229057	2598,30
1000	277,61	3709,26	67,58834294	4054,47
1200	429,96	5347,62	86,22765073	5863,81
1400	555,81	7254,62	106,5802139	7917,01
1600	678,51	9460,34	128,6460326	10267,50
1800	867,04	11985,4	152,4251066	13004,84

En la tabla 13 se destaca el punto de operación del sistema, el cual desde el inicio fue establecido en 1200 m³/h. Para este punto se tiene una caída de presión de 5863,81 Pa, según la información de la tabla. El paso siguiente es la construcción de la curva del sistema, la cual se presenta en la figura 39, resaltando el punto de operación.

La demanda de cabeza es alta a un caudal relativamente reducido, por lo tanto el impulsor más recomendable es un impulsor centrífugo. Con la curva del sistema construida se procede a buscar en los catálogos industriales un impulsor que se adapte a los requerimientos del sistema con la mayor eficiencia posible. Este proceso es iterativo ya que consiste básicamente en superponer la curva del sistema con la curva del impulsor hasta encontrar el dispositivo adecuado.

Para este sistema, el impulsor seleccionado es el CX 4500 de Soler y Palau, con las características más relevantes listadas en la tabla 14³:

³ En el Anexo 2 se presentan las características técnicas completas del dispositivo.

Figura 39. Curva del sistema

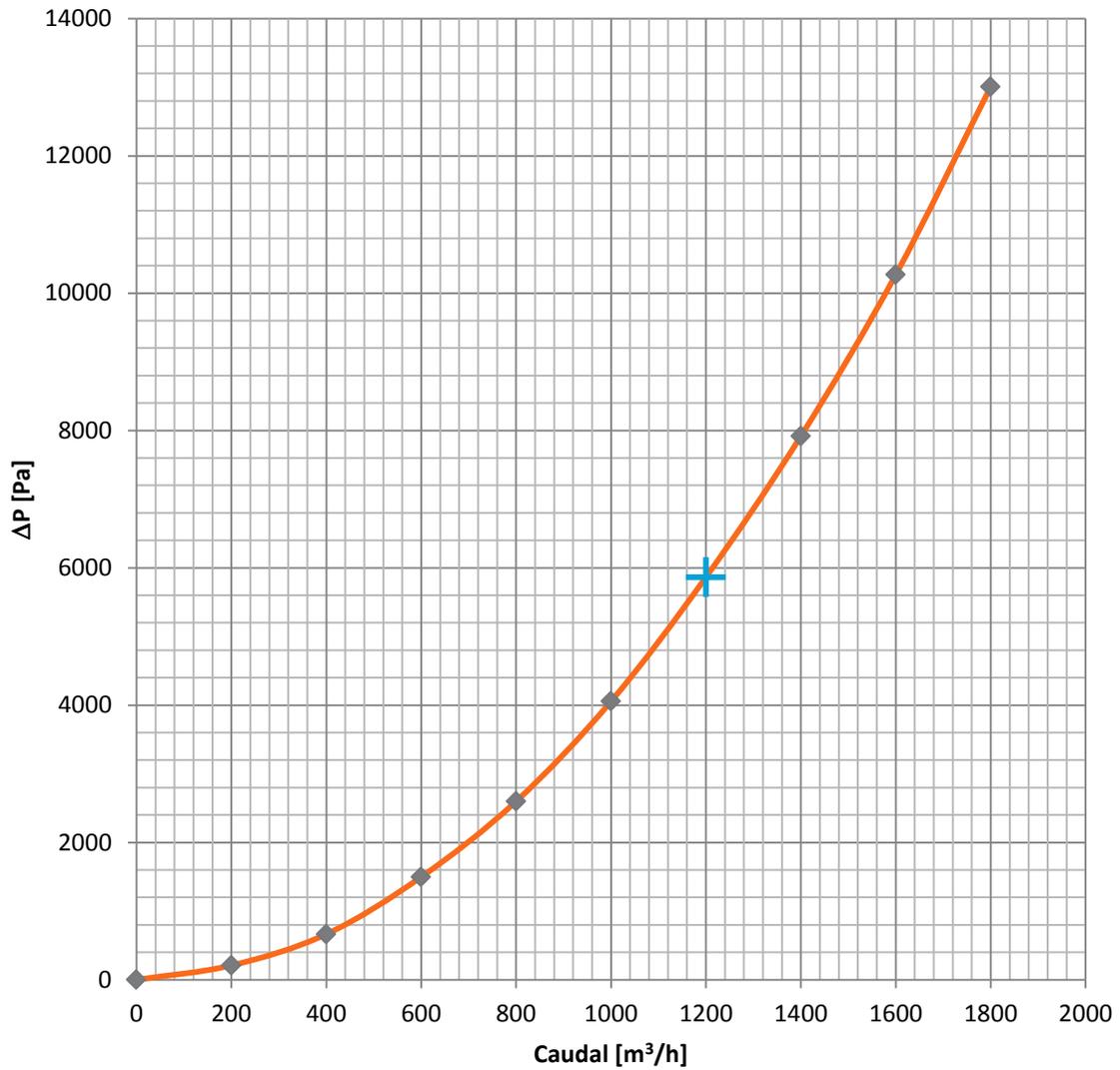


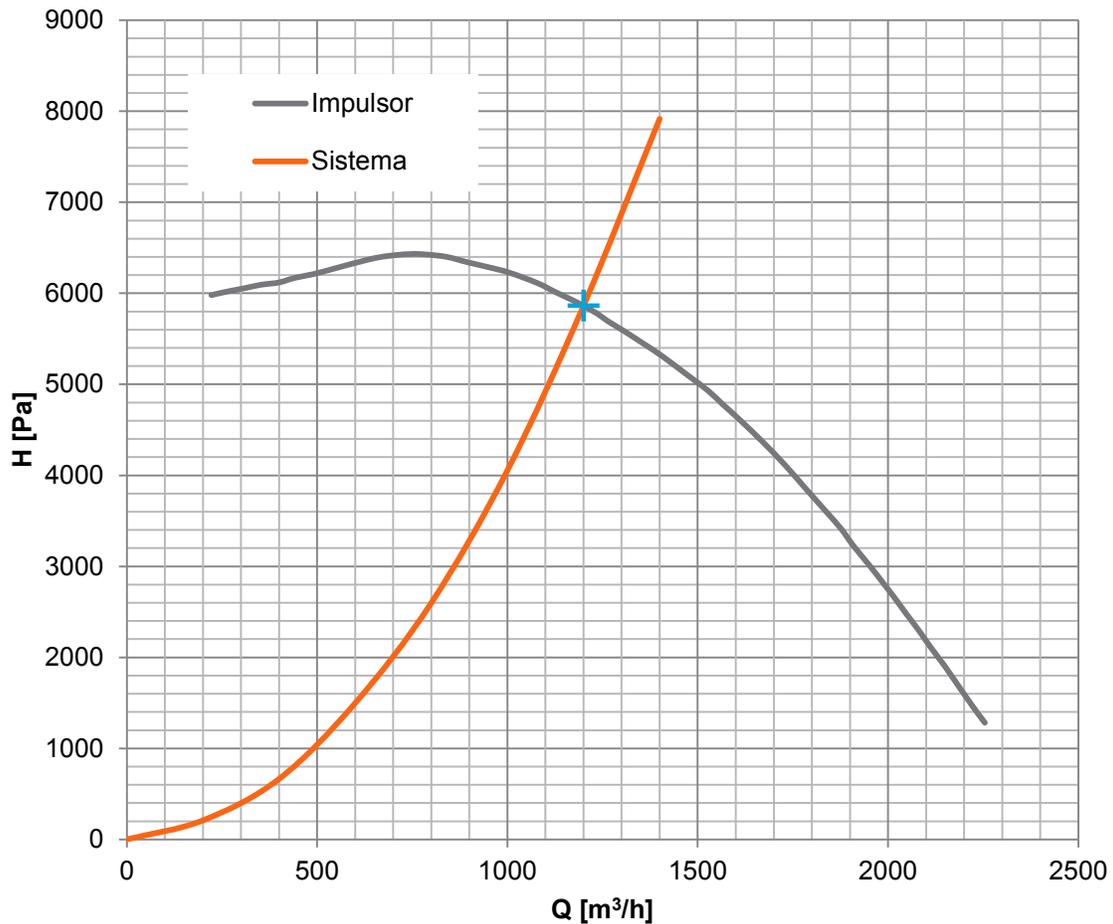
Tabla 14. Datos técnicos del impulsor

Ítem	Valor	Ítem	Valor
Modelo	CMC40	Velocidad de Giro	2370 RPM
Fabricante	Soler & Palau	Punto de Operación	1200 m³/h
Tamaño Nominal	400 mm		5864 Pa
Diámetro Nominal	400 mm	Potencia Demandada	3,4 kW

Fuente: Catálogo de Productos Soler y Palau 2012. P 68.

Con la información suministrada por el fabricante, se superpone la curva del impulsor sobre la del sistema para verificar el punto de operación. Esto se muestra en la figura 40:

Figura 40. Curvas del sistema y del impulsor superpuestas



Fuente: Catálogo de Productos Soler y Palau 2012. P 68 y datos propios

Después de tener esta información, se procede a hacer un análisis energético del dispositivo para determinar si efectivamente el punto de operación corresponde al punto de mejor desempeño. Para esto, se hace necesario calcular la eficiencia del dispositivo, a partir de la potencia adiabática y la curva de potencia real proporcionada por el fabricante. Tomando como datos de referencia condiciones normales (20 °C y 1 Atm.), debido a que las curvas de potencia suministradas por el fabricante se trazó con esos parámetros, se calculan las potencias adiabáticas y las eficiencias para cada punto. Los resultados de los cálculos mencionados se presentan en la tabla 15.

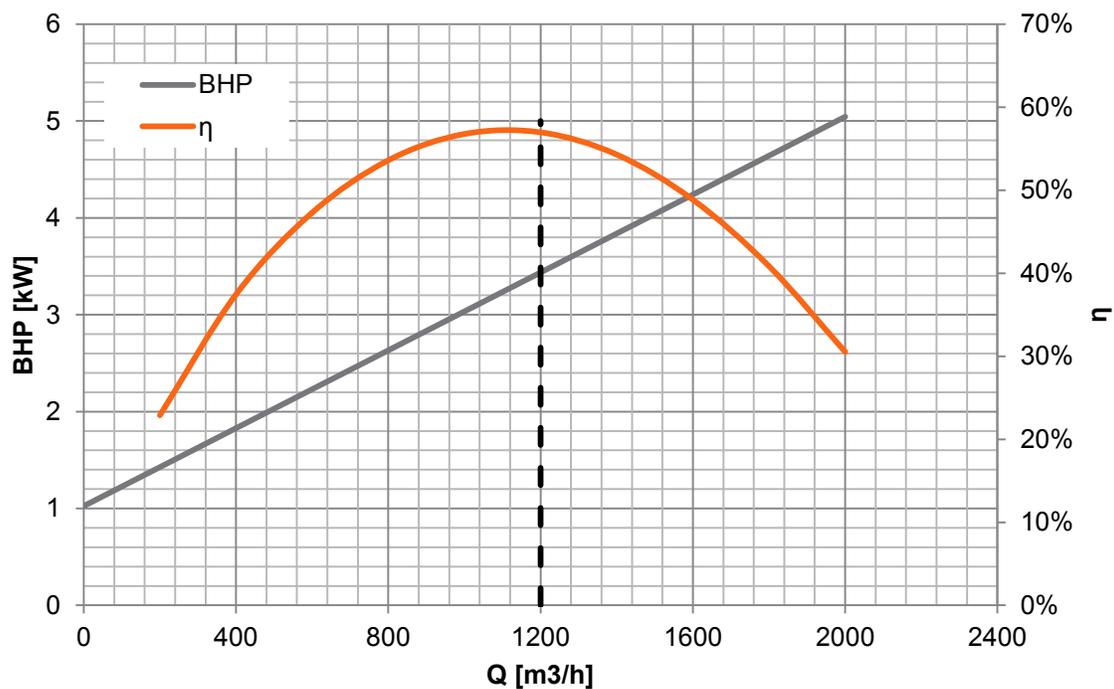
Tabla 15. Cálculos de potencia y eficiencia para el impulsor

Q [m ³ /h]	H [Pa]	WHP [kW]	BHP [kW]	η
0	5510,07	0,00	1,02	0,00%
200	5882,90	0,33	1,43	22,89%
400	6174,35	0,68	1,83	37,45%
600	6345,36	1,06	2,23	47,30%
800	6365,73	1,41	2,63	53,60%
1000	6214,08	1,72	3,03	56,78%
1200	5877,83	1,96	3,44	56,97%
1400	5353,26	2,08	3,84	54,29%
1600	4645,45	2,07	4,24	48,86%
1800	3768,34	1,90	4,64	40,85%
2000	2744,65	1,54	5,04	30,53%

Fuente: Catálogo de Productos Soler y Palau 2012. P 68 y cálculos propios

Con los datos de la tabla 15 se construye la figura 41, donde se representan la potencia y la eficiencia del dispositivo de manera conjunta:

Figura 41. Curvas de potencia y eficiencia para el impulsor



Como puede verse gráficamente y cuantitativamente en la tabla, el punto de operación del sistema coincide con el punto de mejor desempeño del impulsor, esto implica que la selección es correcta y que se culmina a fase de diseño funcional del dispositivo.

4. DISEÑO ESTRUCTURAL

4.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para el diseño estructural de este dispositivo, se tuvo de entrada una concepción constructiva, pensando en proyectos de investigación que se generen como consecuencia de este trabajo y en las limitaciones que se puedan encontrar en talleres modestos como el de la Universidad Tecnológica de Pereira. Así mismo, se pensó en la simplicidad del diseño, en el bajo peso de la estructura y en la posibilidad de tener un conjunto lo más compacto posible, construido con materiales y procesos accesibles en la ciudad de Pereira. Como se podrá observar en el capítulo, algunos de los componentes y las disposiciones que se constituyeron a partir del capítulo anterior, se replantearon en el marco de un proceso iterativo de diseño, pensando precisamente en las consideraciones mencionadas anteriormente.

4.2 DISEÑO CONSTRUCTIVO DE LA BOCA DE ASPIRACIÓN Y EL DUCTO

Desde el capítulo 3 se tuvo ya la idea general de la configuración de la campana y el ducto, no obstante, en este capítulo se describirán algunos aspectos concernientes con la estructura de estos elementos. La campana se diseñó para ser construida a partir de lámina calibre 18 ($t=1,2124$ mm), los ductos tienen 1,5 m de longitud y son de PVC, livianos, baratos y muy comunes en el mercado. El tubo flexible fue seleccionado según catálogo, presente en el Anexo 3. Para darle rigidez al tubo de la aspiración, se diseñaron elementos estructurales que abrazan al tubo y se unen con tornillos de mariposa. Para el acople de la campana de aspiración con el primer ducto y el acople de entre los dos ductos, se usó un simple acople articulado tal como se muestran en las figuras 42 y 43. Para el acople del segundo ducto con la estructura del dispositivo, se diseñó un conjunto que permitiera la rotación parcial del ducto completo, el cual se muestra de forma detallada en la figura 44. Nótese el niple de metal intermedio que es el que ancla el ducto de aspiración a la estructura, liberando de la carga a los tubos de PVC. En cuanto a la capacidad de soporte de carga de los elementos, se hizo un análisis simple con los tubos de PVC, los cuales son los elementos menos resistentes del sistema. Asumiendo que un solo tubo soportará la totalidad de la carga como una viga en Cantilever (6 kg), se hicieron los cálculos utilizando el

software EES. En las figuras 45 y 46 se presentan las ecuaciones usadas en EES y los respectivos resultados:

Figura 42. Acople entre la campana de aspiración y el primer ducto

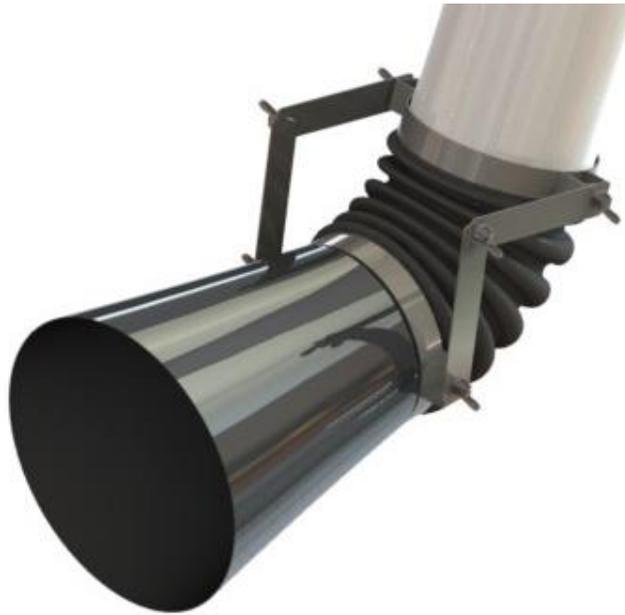


Figura 43. Acople entre el primer y el segundo ducto



Figura 44. Acople entre el conjunto de aspiración y la estructura



Figura 45. Ecuaciones usadas en EES para el cálculo de la resistencia de los tubos de PVC

Esfuerzo en tubo PVC a flexión

$$M = L \cdot W$$

$$W = p \cdot g$$

$$L = 1,5 \text{ [m]}$$

$$p = 6 \text{ [kg]}$$

$$g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Momento de Inercia:

$$d = 154,08 \cdot \left| 0,001 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right|$$

$$d_i = 152,4 \cdot \left| 0,001 \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right|$$

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (d^4 - d_i^4)$$

Cálculos de Esfuerzos

$$S = M \cdot \frac{d}{I}$$

$$S_y = 40,7 \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{N/mm}^2} \right|$$

$$N = \frac{S_y}{S}$$

Cálculos de deformación

$$E = 2410 \cdot \left| 1000000 \cdot \frac{\text{Pa}}{\text{N/mm}^2} \right|$$

$$y = 1 / 3 \cdot W \cdot \frac{L^3}{E \cdot I}$$

Figura 46. Resultados obtenidos en EES en el cálculo de la resistencia de los tubos de PVC

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

d = 0,1541 [m]	d _i = 0,1524 [m]	E = 2,410E+09 [Pa]	g = 9,8 [m/s ²]
I = 0,000001187 [m ⁴]	L = 1,5 [m]	M = 88,2 [N·m]	N = 3,555
p = 6 [kg]	S = 1,145E+07 [N/m ²]	S _y = 4,070E+07 [Pa]	W = 58,8 [N]
y = 0,02312 [m]			

No unit problems were detected.

EES suggested units (shown in purple) for I .

Calculation time = ,0 sec.

Como se puede apreciar, el caso más extremo resulta con un factor de seguridad superior a los 3,5 y una deflexión del tubo ligeramente superior a los 20 mm, lo cual indica que no es necesario implementar un brazo tutor paralelo para dar rigidez al ducto de aspiración. En la figura 47 se presenta versión final del tubo de aspiración incluyendo el acople a la estructura principal.

Figura 47. Versión final del sistema de aspiración completa



4.3 DISEÑO CONSTRUCTIVO DEL CICLÓN

A partir de los modelos del capítulo 3, se determinaron las dimensiones del ciclón. Para la construcción del mismo, se seleccionó chapa de acero calibre 18. En la figura 48 se presentan las dimensiones constructivas del ciclón y en la figura 49 una vista explosionada de la propuesta constructiva. Las asas y flejes de soporte a la estructura se colocarán una vez la disposición se identifique en el conjunto, en el numeral del diseño del bastidor. En cuanto a la resistencia mecánica del ciclón, no se hicieron mayores análisis porque el ciclón no soporta esfuerzos mecánicos importantes, lo cual reduce su diseño a las características funcionales desde la perspectiva de los fluidos.

Figura 48. Dimensiones constructivas del ciclón

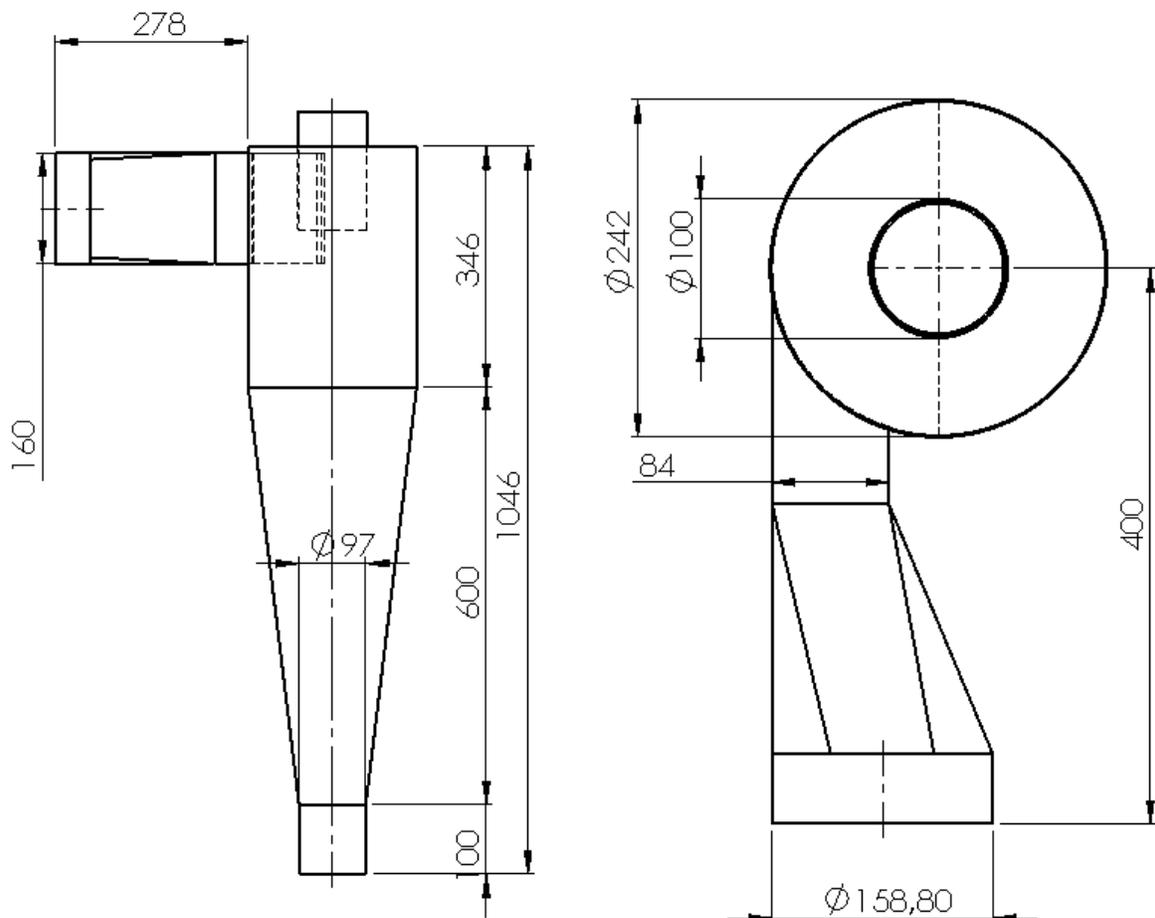


Figura 49. Vista explosionada del ciclón (propuesta constructiva)

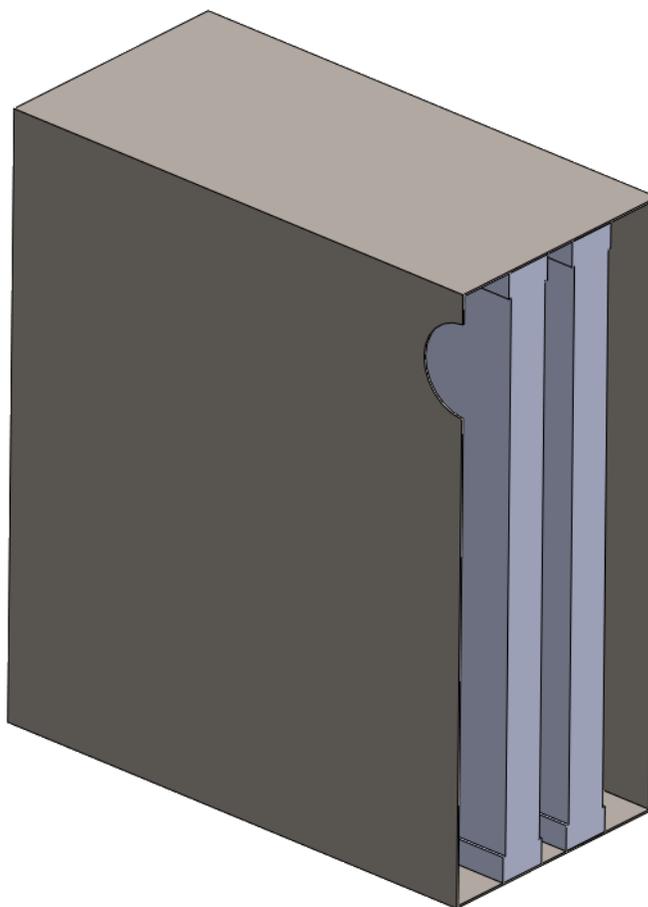


Dentro de las consideraciones que deben hacerse en la construcción del ciclón está en primer lugar la hermeticidad, pues las fugas pueden alterar los patrones de flujo y liberar aire contaminado, en segundo lugar, la integridad geométrica, respetando las formas concebidas en el diseño.

4.4 DISEÑO CONSTRUCTIVO DE LA CAJA DE FILTROS

En el capítulo 3 se modeló la caja con los filtros como una sección cúbica con conexiones frontal y posterior. La base para el diseño se ilustra en la figura 50:

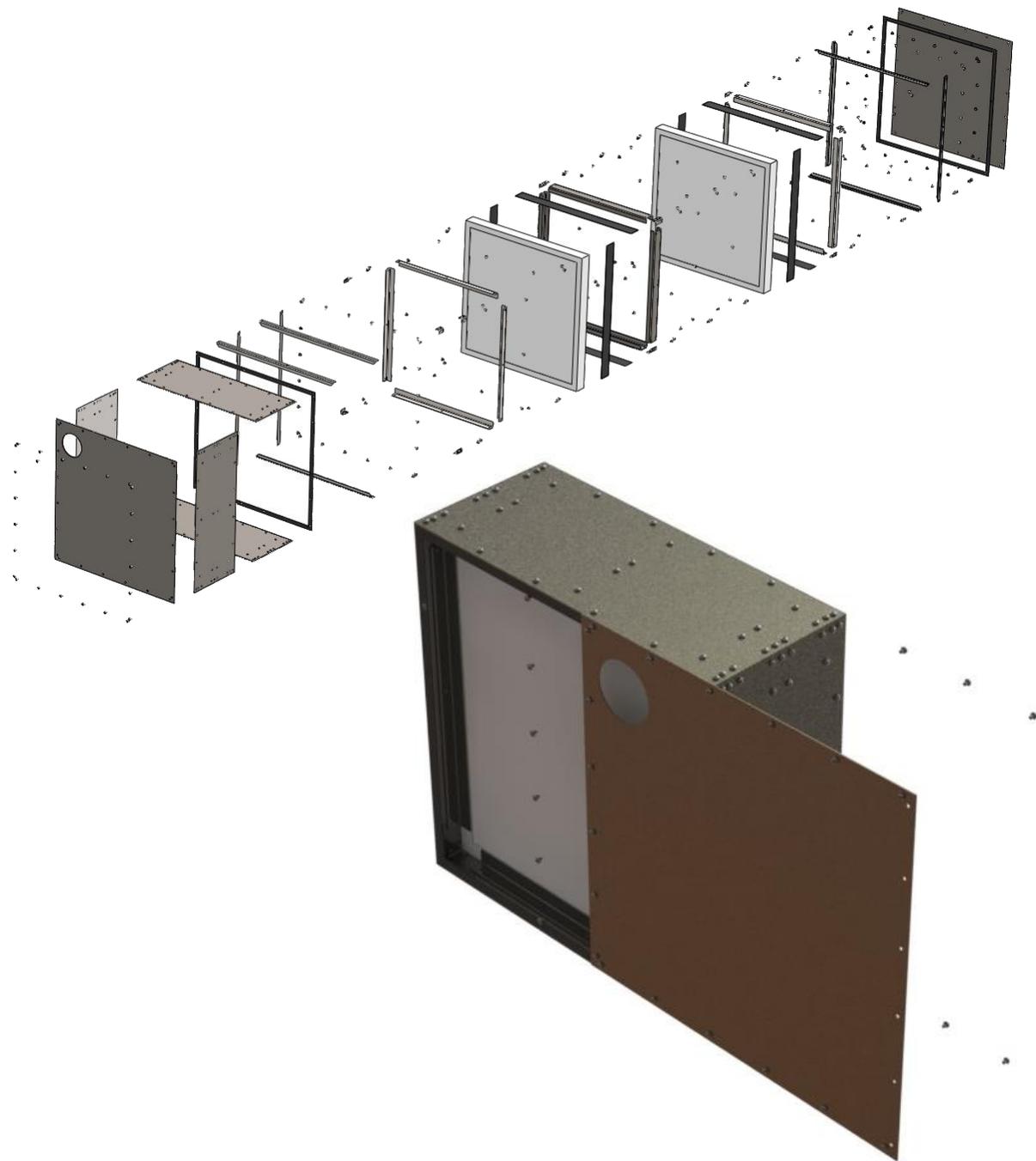
Figura 50. Concepción inicial de la caja de filtros



Sobre este concepto se desarrolló una propuesta constructiva que se basaba en la ausencia de soldaduras, la minimización del uso de lámina y la facilidad constructiva. Estas consideraciones llevaron al desarrollo del diseño que se presenta en la figura 51. Como se podrá apreciar en dicha figura, se pensó en la total sujeción de los elementos con tornillos para lámina, en la estanqueidad y en un ensamble funcional adecuado. Luego de terminar la propuesta se hicieron algunas evaluaciones en cuanto al peso, la complejidad y el número de componentes, lo cual hizo que se repensara el diseño. Con esta premisa, se decidió reconfigurar el diseño en función de la disposición del conjunto, lo cual

obligaba a decidir el diseño final en contexto, por lo tanto se pospuso la versión final del diseño de la caja de filtros hasta el siguiente numeral.

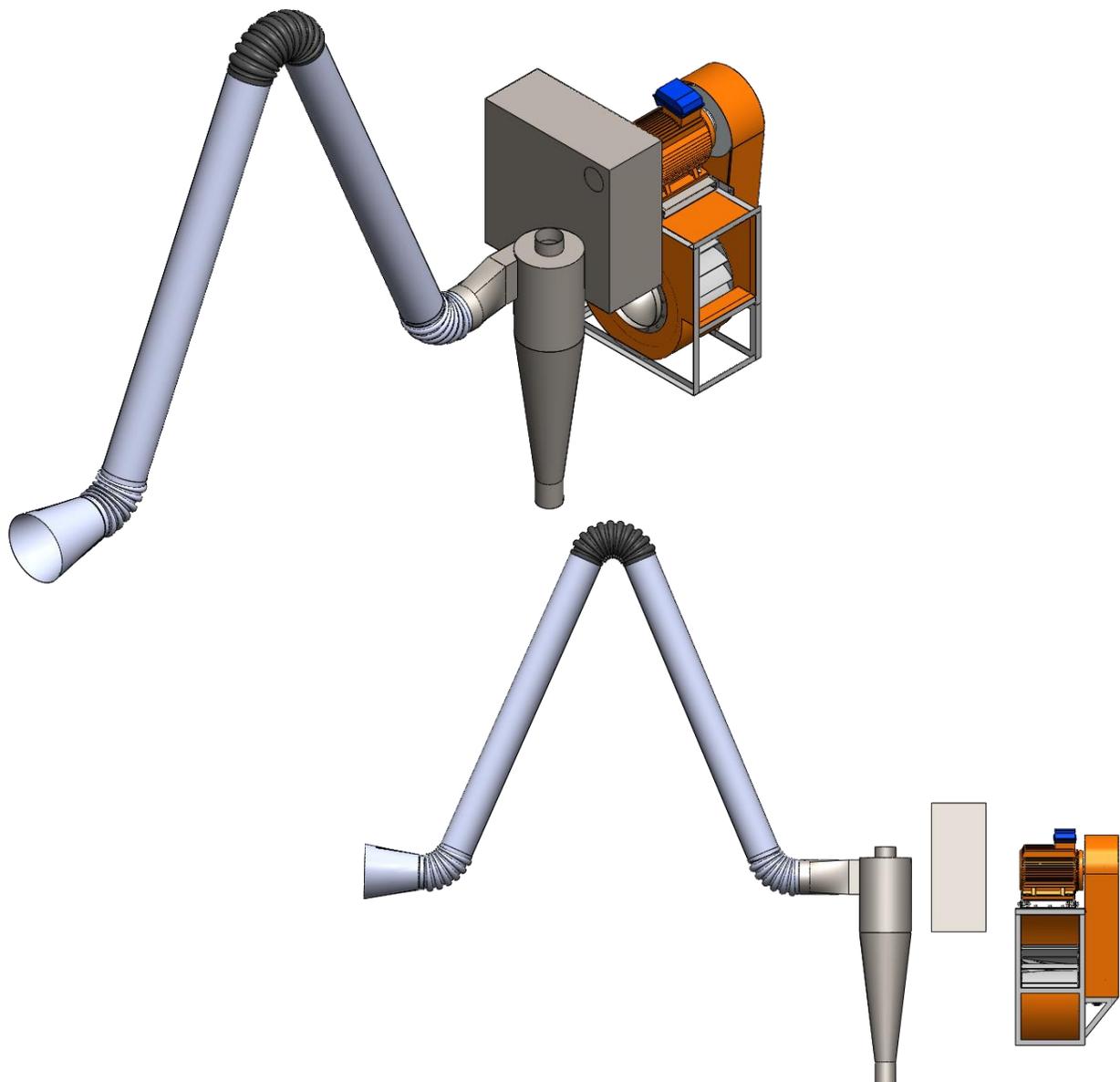
Figura 51. Primera propuesta constructiva para la caja de filtros



4.5 DISPOSICIÓN INTERNA DE LOS COMPONENTES

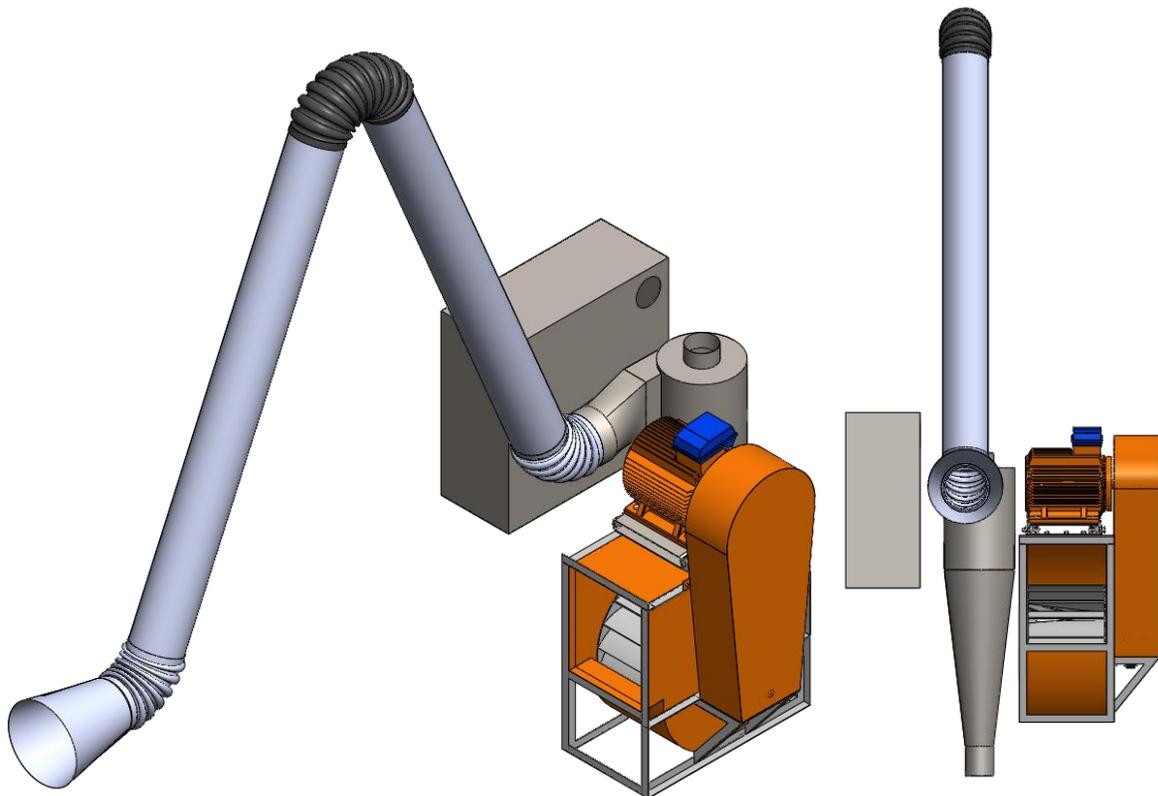
El diseño de la estructura depende principalmente de la disposición espacial de los componentes. Una de las consideraciones iniciales es la reducción del espacio y la minimización de ductos de conexión. El ciclón y el impulsor de fluido tienen conexiones fijas, por lo que el comodín es la caja de los filtros. En principio se colocaron todos los componentes en un ensamblaje de prueba inicial para analizar las variantes presentes. Algunas de las disposiciones se muestran a continuación:

Figura 52. Primera disposición espacial de componentes



Con la configuración de la figura 52 se evidenció el problema de la conexión con el oído de aspiración del ventilador. La diferencia de diámetros obliga a extender mucho la distancia entre el ventilador y la caja de filtros. La conexión superior de la caja ayuda a reducir distancia, sin embargo el tamaño de los filtros es fijo, por lo que no puede extenderse la caja hacia abajo. Con esto en mente se pensó en una segunda configuración que permitiera ampliar de forma natural la distancia entre la caja de filtros y el ventilador sin necesidad de incrementar el espacio bruto del dispositivo. Por ello se colocó al ciclón en medio y a ambos lados el ventilador y la caja de filtros, como se muestra a continuación:

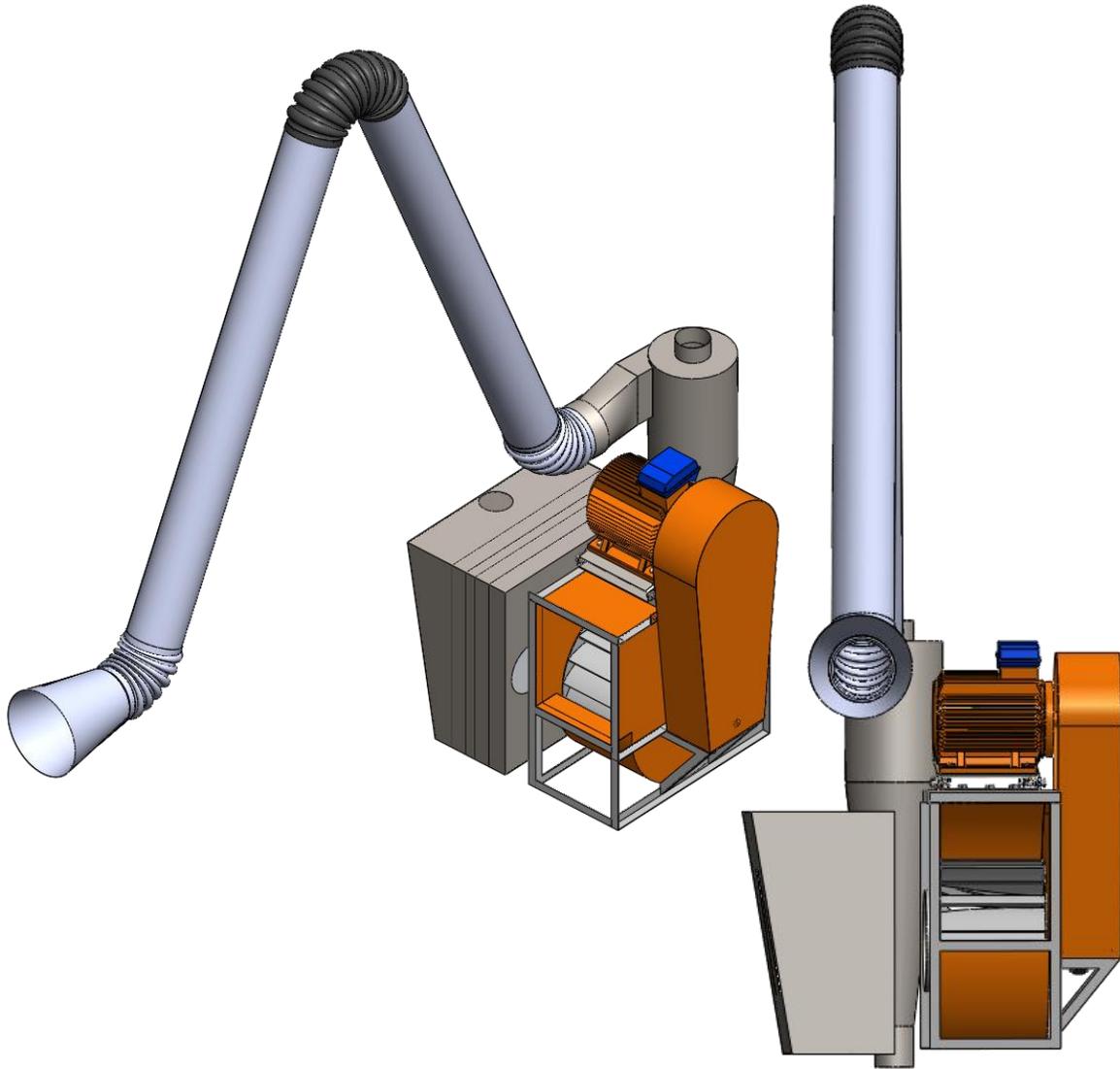
Figura 52. Segunda disposición espacial de componentes



Con esta disposición se logró aumentar la distancia entre la caja de filtros y el ventilador, sin embargo, queda el problema de tener mínimo dos cambios de trayectoria bruscos (90°) ya sea en la conexión de la caja de filtros al ciclón o en la conexión de la caja de filtros al ventilador, además de, al no poder conectar directamente el ventilador a la caja de filtros, hay que emplear una reducción. Frente a estas dos dificultades se planteó la posibilidad de rediseñar la caja de

filtros para que esta actuara en sí misma como un codo, optimizando el espacio. La disposición pensada se presenta a continuación:

Figura 53. Tercera disposición espacial de componentes



Como puede verse, la caja de filtros recibe una modificación para hacerla trapezoidal y así tener una entrada lateral. Con estos elementos surgía la necesidad de buscar las variantes para dar la mejor configuración para la entrada lateral. En ese orden de ideas se plantearon dos opciones y se compararon con la versión inicial de la caja de filtros para determinar si las pérdidas y la el comportamiento interno del fluido era mejor o peor, pues en últimas, no se desea

afectar de manera negativa el desempeño del dispositivo. Las configuraciones que se analizaron se muestran a continuación:

Figura 54. Comportamiento del fluido en la configuración inicial

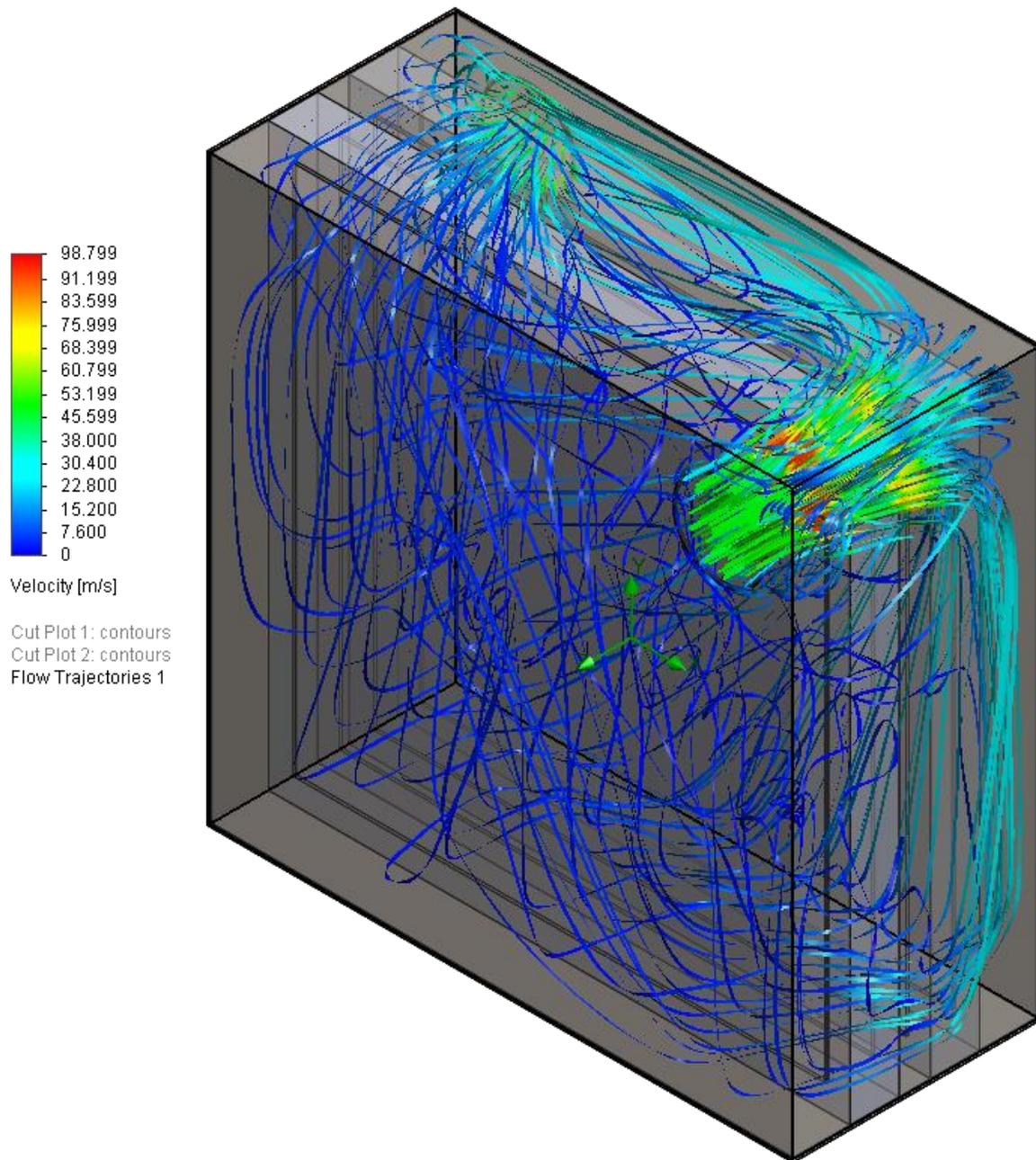


Figura 55. Comportamiento del fluido en la configuración de entrada lateral superior

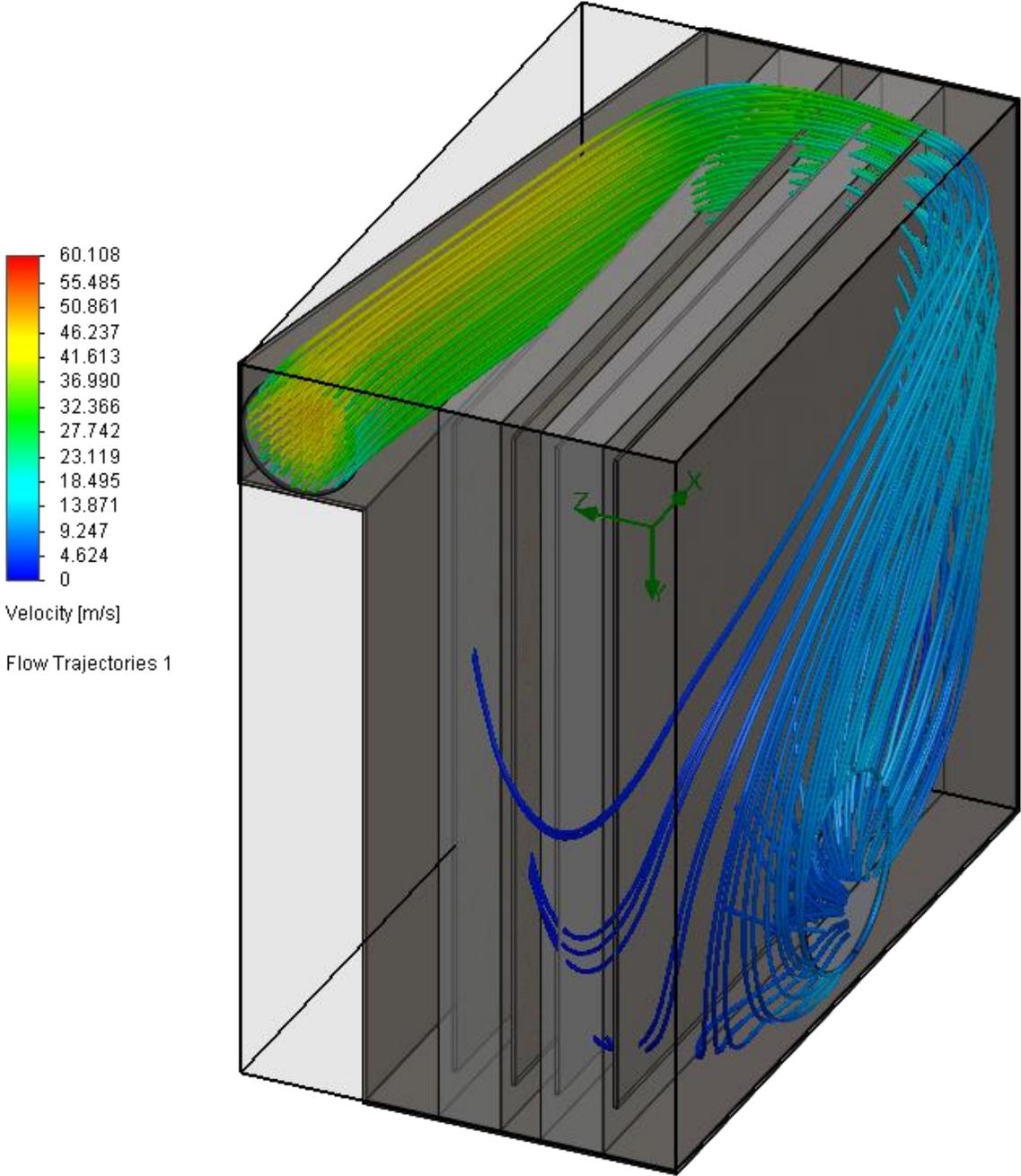
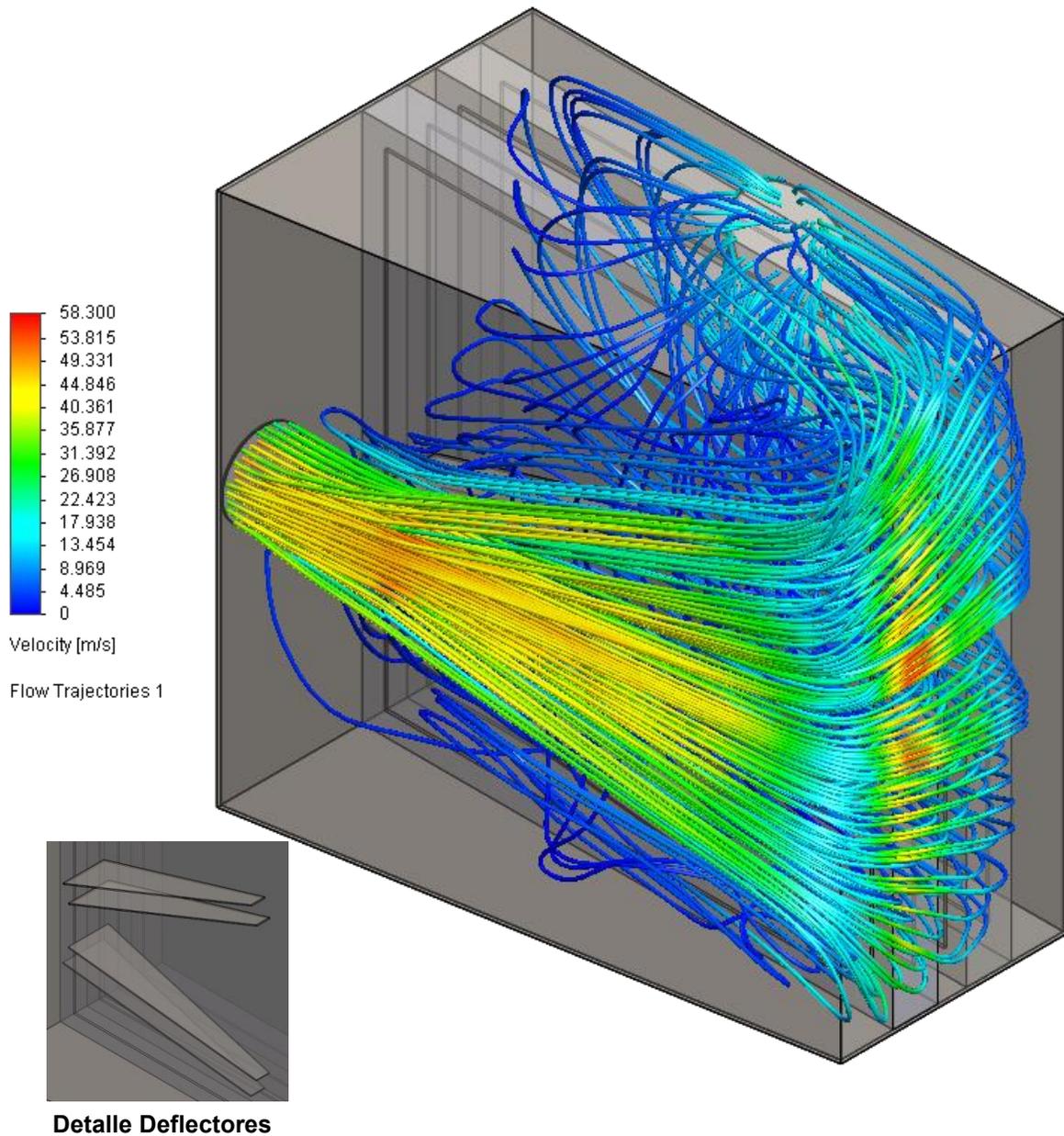


Figura 56. Comportamiento del fluido en la configuración de entrada lateral centralizada



Como puede verse en las trayectorias de flujo, las configuraciones de las figuras 55 y 56 presentan velocidades más bajas, por lo tanto, menores pérdidas, lo cual favorece la decisión de cambiar la forma en la que el flujo entra a la caja de filtros. En segunda instancia, el comportamiento del fluido es menos errático, disminuyendo la turbulencia al interior de la caja de filtros. Ahora bien, el criterio de decisión entre la configuración de la figura 55 y la figura 56 se basa en el

aprovechamiento del área del filtro. La configuración de la figura 55 manifiesta un patrón de flujo que ataca de manera muy puntual al filtro, desaprovechando un porcentaje importante del área, la configuración de la figura 56 presenta una menor velocidad y un patrón de flujo más amplio, aprovechando mejor el filtro. Esto se logró gracias a los deflectores colocados en la tapa frontal, los cuales, distribuyen el flujo de manera uniforme a lo ancho de la sección, aprovechando mejor el área del filtro. Con estos hallazgos se determina que la disposición espacial de la figura 53 y el diseño de la caja de filtros de la figura 56 son los más indicados para el dispositivo. Con estos elementos ya se puede continuar con el diseño de la caja de filtros y de la estructura que soporta todo el dispositivo.

En aras de ser coherentes con el paso anterior, se presenta el diseño modificado de la caja de filtros. Nótese la reducción en la tornillería y la forma trapezoidal.

Figura 57. Caja de filtros modificada

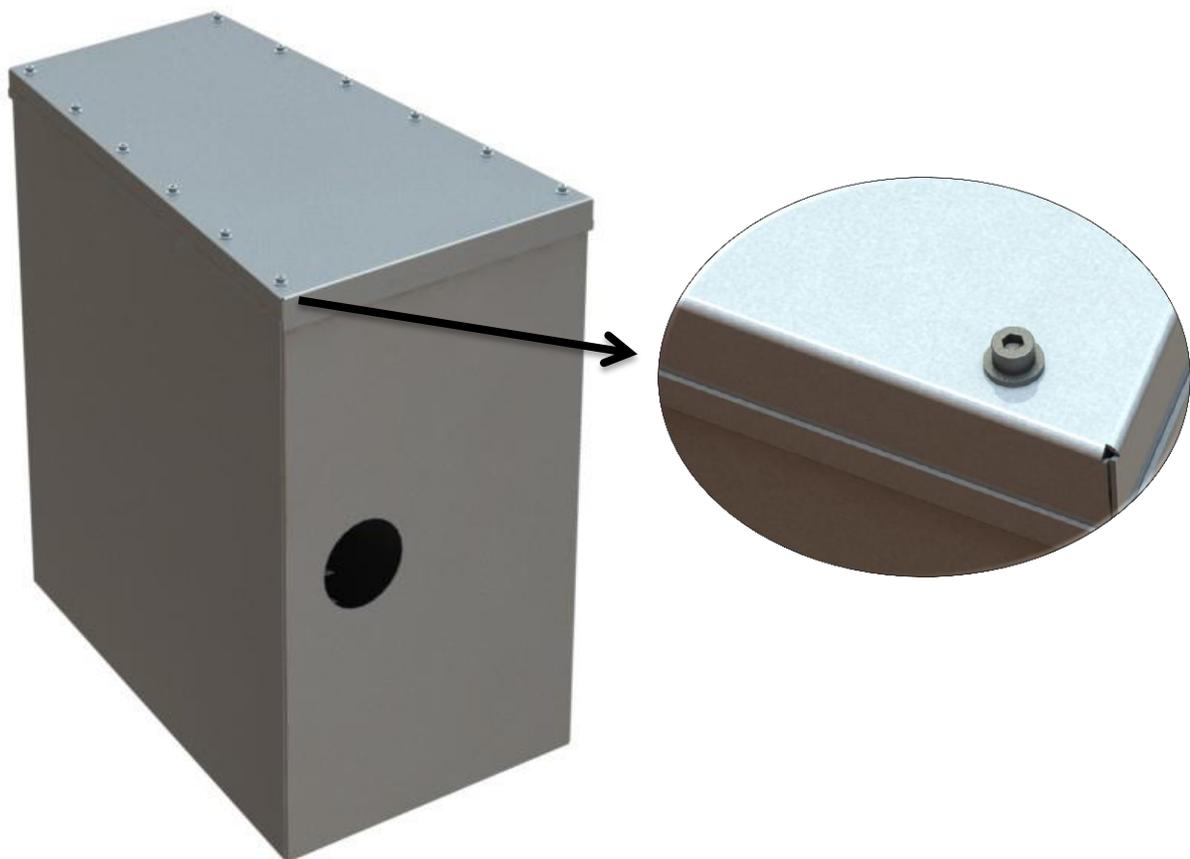
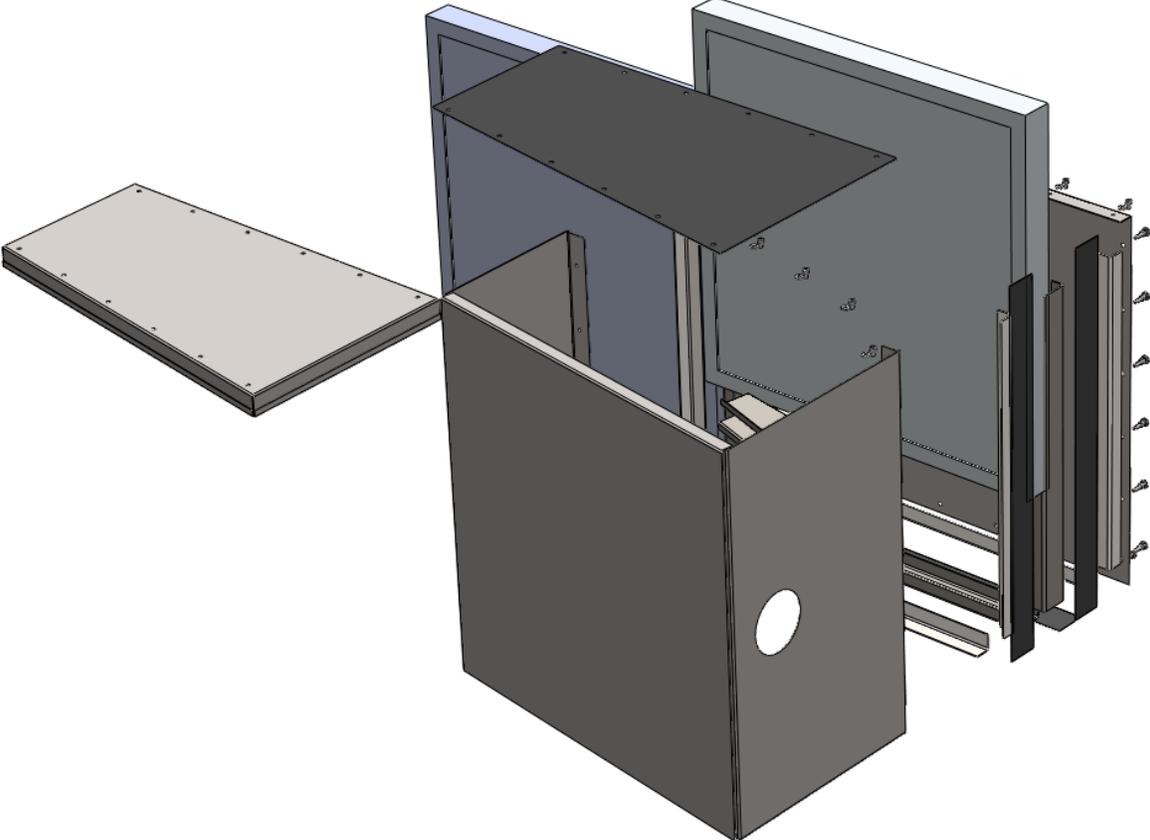
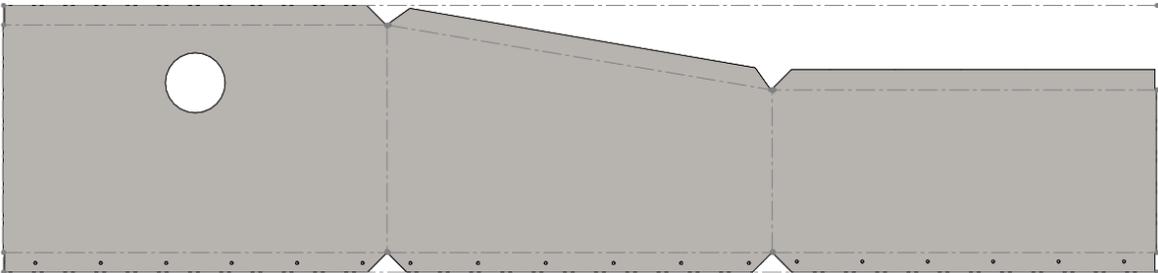


Figura 58. Caja de filtros modificada en explosión



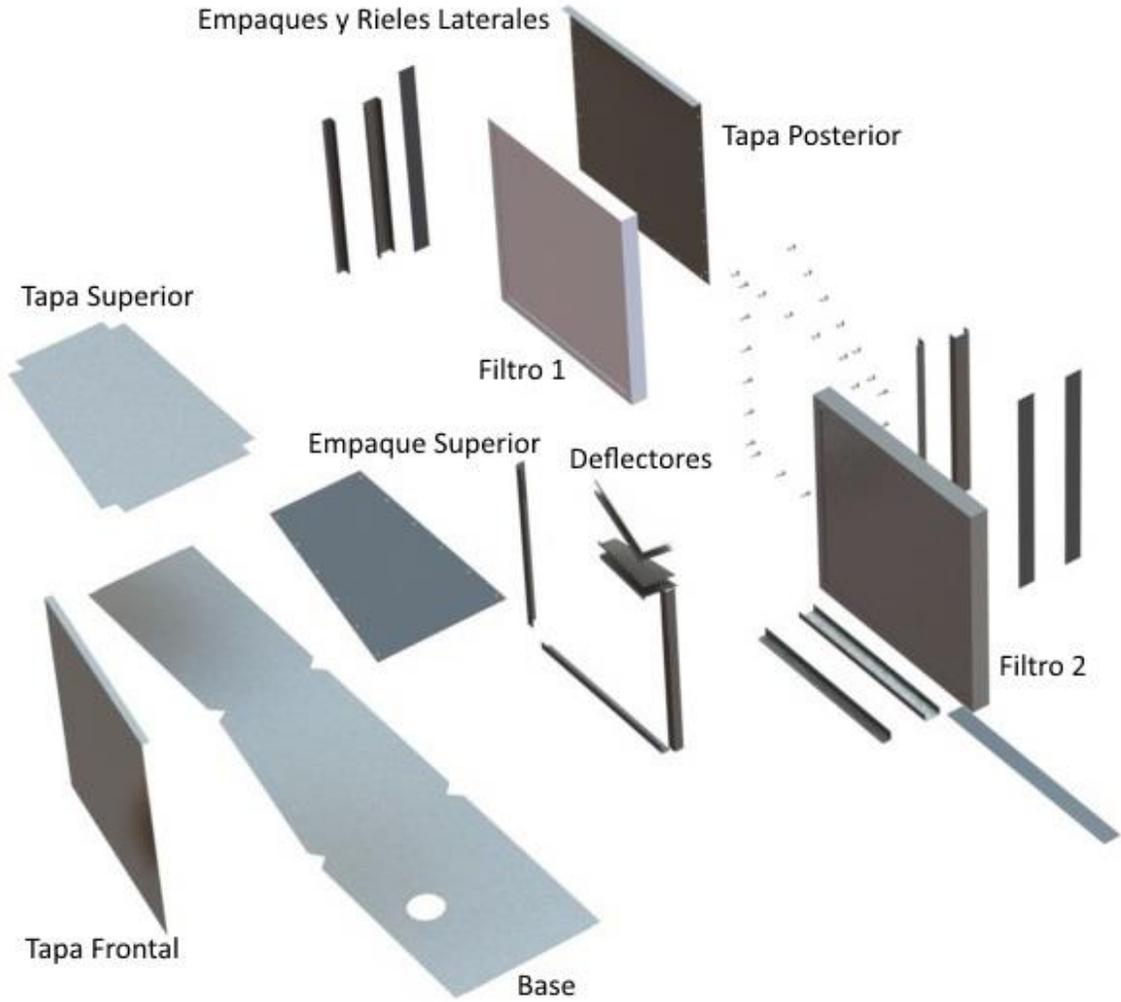
Como puede verse en la figura 58, la caja de filtros redujo su complejidad considerablemente, con respecto al diseño anterior, esto porque se decidió utilizar soldaduras para sujetar los canales y rieles internos, también se usó una pieza de lámina con dos pliegues para reducir la necesidad de cierres atornillados. La figura 59 muestra dicha base.

Figura 59. Base desplegada de la caja de filtros



Las tapas frontal y posterior no se incluyeron en este desarrollo para reducir el consumo de lámina. Estas se montan a la estructura con soldadura y tornillos respectivamente. La tapa superior se diseñó para que generara estanqueidad y sellara la unidad con tornillos. El despiece y las partes de lámina desplegadas se muestran a continuación:

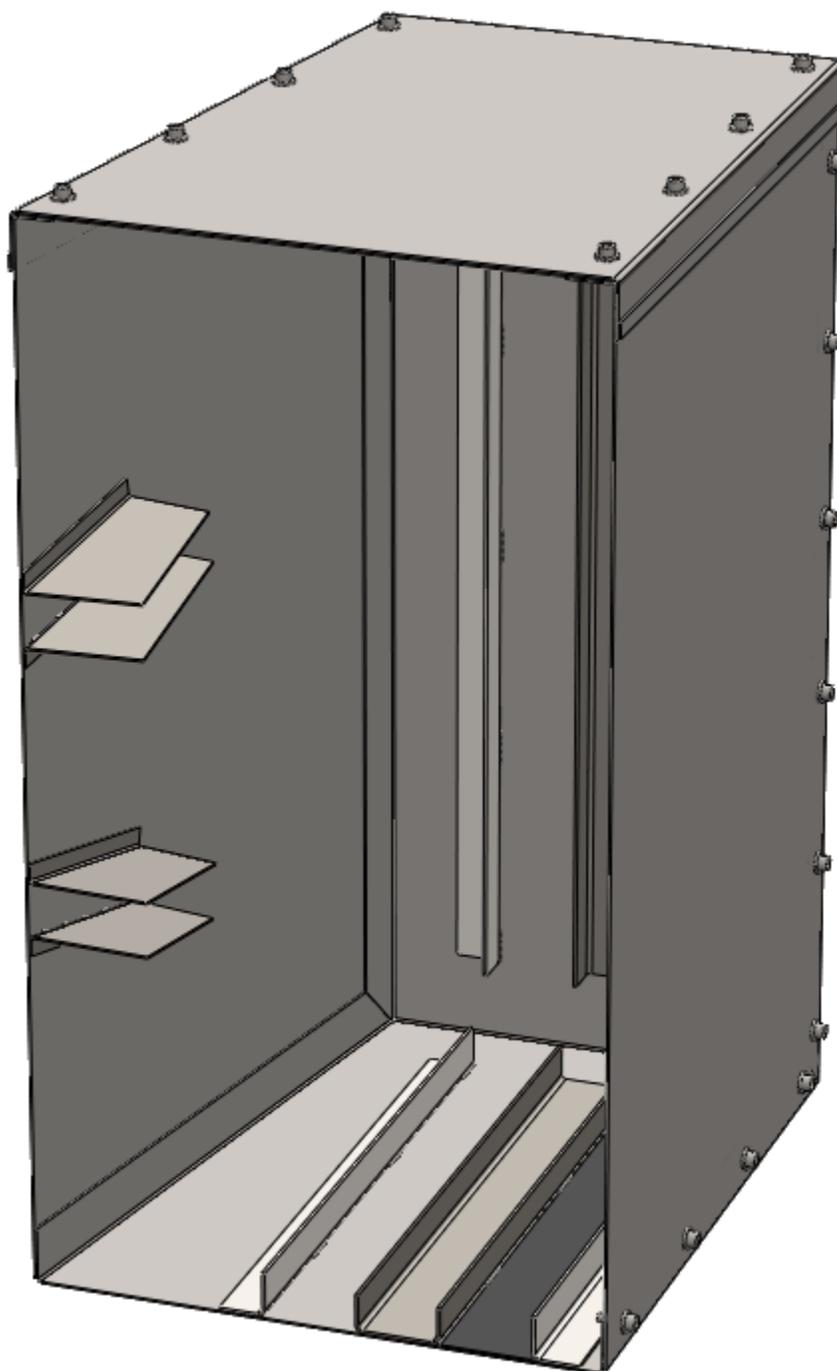
Figura 60. Despiece de la caja de filtros



En la siguiente figura se muestra el ensamble de manera interna. En tres de las paredes se colocaron empaques y rieles para garantizar la estanqueidad del sistema. Todo aquello que no va atornillado se ensambla con cordones de

soldadura, esto con el fin de reducir el número de piezas, reducir el peso y simplificar el ensamble.

Figura 61. Sección en corte de la caja de filtros



Con la caja de filtros actualizada, ya es posible continuar con el ensamble interno completo y el diseño de la estructura.

4.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

Como se mencionó en el numeral anterior, era necesario definir el arreglo de los componentes antes de definir la estructura de soporte. En la figura 62 se muestra la disposición final de los elementos del extractor:

Figura 62. Disposición final de los componentes del extractor



En la figura se observa que el ciclón y la caja de filtros fueron conectadas con tubo flexible de 100 mm de diámetro, la caja de filtros fue conectada al impulsor a través de un accesorio de aspiración que provee el fabricante, un conducto bridado que viene listo para el montaje en el ventilador. Con las medidas de este accesorio se perfora la tapa frontal de la caja de filtros del sistema. La distancia entre la caja de filtros u el ventilador es de 30 cm, espacio justo, para acomodar en medio el ciclón y así obtener una configuración muy compacta. Nótese que al ventilador no van reducciones ni cambios de trayectoria, lo cual minimiza las pérdidas, teniendo en cuenta que al cambiar el diseño de la caja de filtros se obtuvo una mejora en el rendimiento.

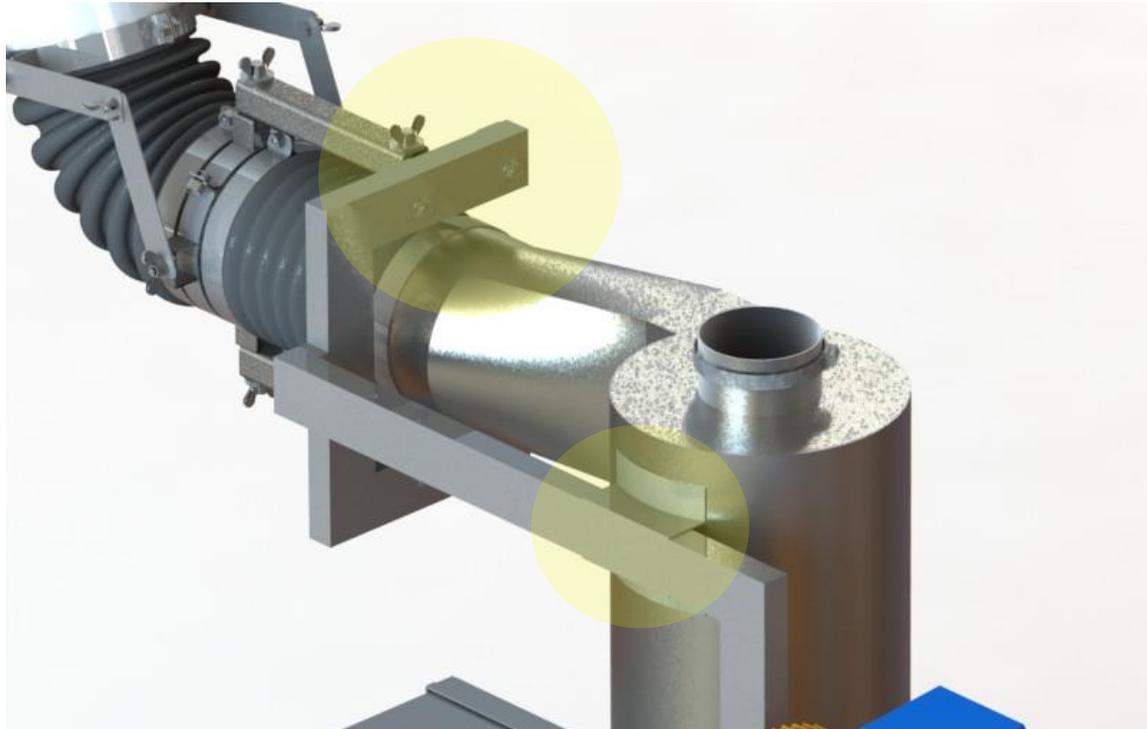
Sobre la configuración de la figura 62 se montó una estructura de tubería cuadrada de 2"X1"X0,4" la cual está sobre diseñada, pero dimensionalmente está acorde con la contextura del sistema. La versión final de la estructura se presenta a continuación:

Figura 63. Estructura de soporte para el extractor de humos



En la base se anclan el ventilador y la caja de filtros, en el brazo superior se anclan el ciclón el brazo aspirador. Obsérvese el detalle de las bridas de sujeción del ciclón y los orificios de anclaje para el brazo.

Figura 64. Detalles de sujeción de los elementos del extractor



Como se mencionó anteriormente, la estructura está sobre diseñada, esto se corroboró con un estudio de elementos finitos realizado sobre el marco. En la figura 65 se muestra la distribución de factor de seguridad para la estructura concentrando el peso del ciclón y el ducto aspirador en el extremo del brazo de soporte. Finalmente, a la estructura se añadieron las ruedas para poder darle movilidad al sistema. En las figuras 66 y 67 se presentan los diseños finales para el extractor. Como accesorio se colocó un respirador para proteger la salida del ventilador, con el fin de evitar accidentes con el rotor del mismo. La unión del marco del ventilador, la caja de filtros y el ciclón a la estructura se hace a través de soldadura, lo único que va atornillado es el ducto de succión. Como puede verse en la figura anterior, se colocaron 4 soportes para la caja de filtros. La caja no se unión directamente a la base de la estructura para poder dar un espacio y retirar con facilidad la tapa superior y así cambiar los filtros con facilidad.

Figura 65. Distribución de factor de seguridad para la estructura del extractor

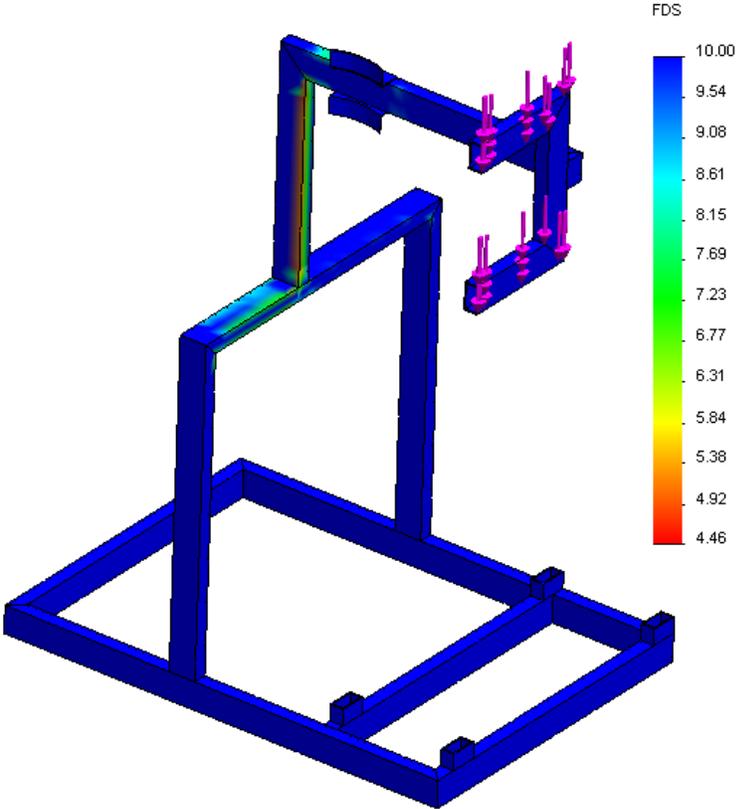


Figura 66. Extractor completo (renderizado 1)



Figura 67. Extractor completo (renderizado 2)



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este proyecto permitió fortalecer las capacidades aplicadas a la simulación CFD y al diseño integrado a este ítem. No obstante se identificaron las siguientes situaciones concernientes al desarrollo de este proyecto en las que podría ser conveniente profundizar o reflexionar.

- ✓ La simulación de medios porosos sigue siendo muy compleja para ser ejecutada con los el paquete CFD que se usó en este trabajo. Aunque se pudo modelar la caída de presión, el comportamiento del material particulado sigue estando fuera del alcance del software.
- ✓ Muchas de las condiciones reales de los materiales y el medio como la rugosidad, las características dinámicas del ventilador y de los demás dispositivos incrementan demasiado la complejidad de los modelos y no se pueden concatenar de manera adecuada con los modelos más simples, no obstante, los resultados obtenidos a lo largo de este proyecto poseen la calidad requerida para obtener un diseño confiable y aterrizado.
- ✓ Cuando se realizó este proyecto, se descubrió la dificultad y la complejidad que existe en cada uno de los dispositivos asociados al extractor. De hecho, se recomienda ampliar los resultados de este trabajo desarrollando trabajos subsecuentes en el análisis de ciclones, sistemas de filtración y ductos flexibles, así como la simulación CFD de turbomáquinas.
- ✓ Al revisar la bibliografía concerniente al material particulado proveniente de los humos de soldadura, se encontraron algunos trabajos que ha ahondado en el asunto, sin embargo, es un tema que todavía se puede considerar inexplorado desde el punto de vista del desarrollo de métodos de captación de partículas diferentes a los convencionales.

En lo que respecta a los aspectos constructivos del dispositivo, el metal es un material accesible, no obstante, la fibra de vidrio, por ejemplo, puede generar alternativas interesantes en la construcción del ciclón y la caja de filtros. En este trabajo no se propusieron esos materiales por tratar de hacer un diseño más robusto y directo.

Una de las limitaciones que se detectaron a la hora de realizar el trabajo fue la capacidad de cómputo. Integrar por ejemplo todos los dispositivos en una sola simulación generaría un modelo demasiado grande, requiriendo una gran capacidad de cómputo, no disponible en la Facultad de Ingeniería Mecánica. El uso de la tecnología CFD implica por ejemplo, la identificación de alternativas de cómputo, como los clústeres de procesamiento.

Aunque la solución desarrollada es apta para su uso en espacios confinados, la misma estructura es adecuada para la extracción puntual a través de sistemas centralizados en cabinas de soldadura. Se propone por ejemplo, el uso de la tecnología CFD para desarrollar trabajos de investigación concernientes al diseño de sistemas de extracción centralizados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHRAE Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2009
- [2] ASHRAE Applications. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2011
- [3] ASHRAE Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- [4] AWS-ANSI F3.2M/F3.2:2001. Ventilation Guide for Welding Fume. American Welding Society. 2001.
- [5] AWS-ANSI Z49.1:2012. Safety in Welding, Cutting and Allied Processes. American Welding Society. 2012.
- [6] C. Cooper; F. Alley. Air Pollution Control: A design Approach. Second Edition. Waveland Press. 649 pp.
- [7] Ennan, A; *et al.* Particle Size Distribution of Welding Fume and its Dependency on Conditions of Shielded Metal Arc Welding. Journal of Aerosol Science 64 (2013). Pp 103-110.
- [8] HALTON Corp. Halton Product Catalogue for Air Filtration. 2013. 71 pp.
- [9] Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales. El soldador y los Humos de Soldadura. Disponible en www.osalan.net . Mayo de 2009. 44 pp.
- [10] Jetkins, N; Pierce, G; Eagar, W. Particle Size Distribution of Gas Metal and Flux Cored Arc Welding Fumes. Welding Research 2005. Pp 156-163.
- [11] Lapple, C. E. Processes use many collector types. Chemical Engineering 58. 1951. Pp. 144-151

- [12] Mantilla Angel, *et al.* Asma Ocupacional: Un Problema Social Invisible y Creciente. Revista Ciencia y Trabajo. Año 9 Número 23 Marzo de 2007. pp. 13-19.
- [13] Nazaroff R, Alvarez-Cohen D. Gaseous Emission-Control Technologies. Air Quality Tecnology. Pp 400-444. 2006.
- [14] Oprya, M. *et al.* Size Distribution and Chemical Properties of Welding Fumes of Inhalable Particles. Journal of Aerosol Science 45 (2012). Pp 50-57.
- [15] SENA, Mesa Sectorial de Soldadura. Soldadura: Caracterización Ocupacional. Noviembre 2010. 120 pp.
- [16] SolidWorks Corp. SolidWorks Flow Simulation Technical Reference. Octubre 2011. 184 pp.
- [17] Vishnyakov, V.I; *et al.* Formation of Primary Particles in Welding Fume. Journal of Aerosol Science 58 (2013). Pp 9-16
- [18] Von Ruden, Dennis. Using Ventilation Blowers in Confined Spaces. Workers Health International. Vol 35. Febrero de 1997. pp. 41-46.
- [19] Wang, Lingjuan. Theoretical Study of Cyclone Design. Philosophical Doctor Dissertation. Texas University. 2004. P. 31.

7. ANEXOS

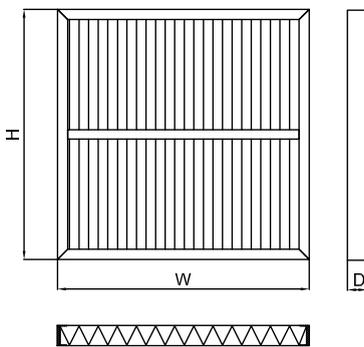
1. PANEL COARSE FILTER DATA SHEET
2. PANEL ULTR FINE FILTER DATA SHEET
3. CMC 40 DATA SHEET
4. RUBBER HOSE DATA SHEET
5. PLANOS CONSTRUCTIVOS Y DE ENSAMBLE

PANEL COARSE FILTER

G4 W-line

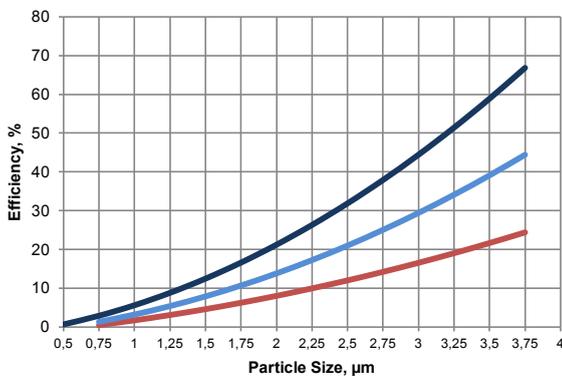


Dimensions



Technical specifications

Particle size (mm) as a function of initial efficiency (%).



Air flow rate – Pressure drop
 1) 1700 m³/h
 2) 1200 m³/h
 3) 700 m³/h

Code key
 ST – Filter Type – Frame type – Width – Height – Depth – Construction – Filter Class – Filter Material – Material Quality
 Example: ST-WF-P-592-592-48-H02-G4-S-P
 FilterType: WF
 FrameType: C = Cardboard
 P = Plastic
 M = Metal
 Width: (mm)
 Height: (mm)
 Depth: Depth 25mm, 46mm (48mm), 96mm
 Construction: H01 = Glue around on dirty air side
 H02 = Glue around on both sides
 H21 = Glue on one side of frame, metal grid on clean air side
 H00 = No glue or metal grid
 H20 = Metal grid on back side of frame, no glue
 H30 = Metal grid on back side of frame, metal bars on dirty side
 FilterClass: G4
 FilterMaterial: S = Synthetic
 MaterialQuality: P = Premium

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.

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 ³ /h):	50%

Structure

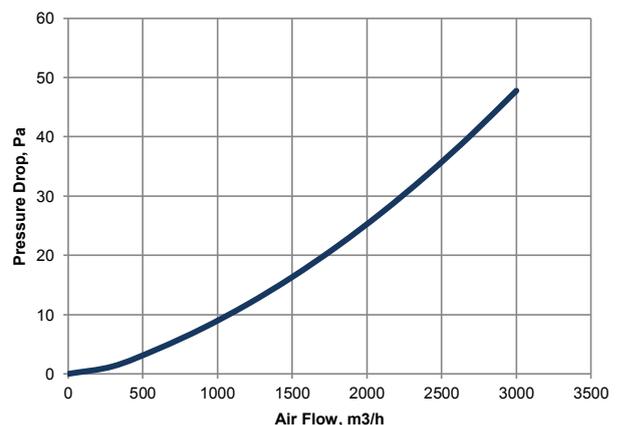
Filter media pleats are supported by thin hot-melt glue traces holding the filter pack firmly in shape. Filter media designed specifically for pre-filtering applications, enables stable air flow through the filter and a low pressure loss.

Sizes

Halton W-line panel filters are available in standard and customized sizes. The main frame depths are 25 mm, 46 mm and 96 mm. As per special order, filters can be manufactured with tailored dimensions.

Air flow rate – Pressure drop curve

Size of tested filter, 592x592x48



PANEL COARSE FILTER - G4 W-line

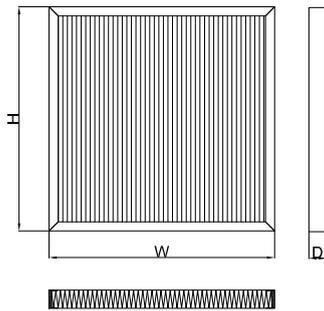


PANEL ULTRA FINE FILTER

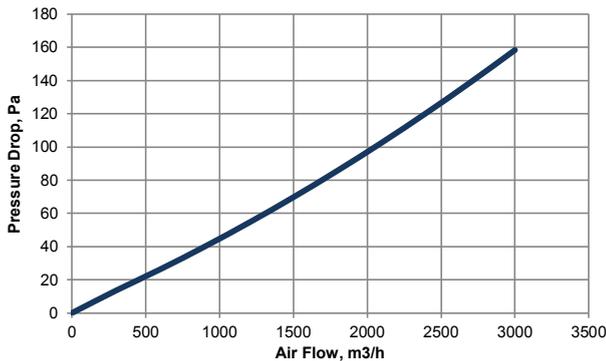
Minipleated model



Dimensions



Air flow rate – Pressure drop curve



Sizes

Halton panel filters are available in standard and customized sizes. The main frame depths are 48 mm and 96 mm.

Technical values

Halton code	Dimensions WxHxD mm	Filter class, EN779:2002	Flow rate		
			m³/h	m³/s	Pa*
ST-WF-P-592-592-48-v-U15-GF-	592x592x48	U15	1900	0.53	118
ST-WF-P-592-592-96-y-U15-GF-	592x592x96	U15	3400	0,94	177

Code key: ST - Filter Type – Frame type – Width – Height – Depth – Construction – Filter Class – Filter Material – Material Quality
 Filter Type: WF
 Frame Type: P = Plastic
 Width: Width in (mm)
 Height: Height in (mm)
 Depth: 48mm, 96mm
 Construction: H02 = Glue on two/four sides
 Filter Class: U15
 Filter Material: GF = Glass fibre
 Material Quality: P = Premium

Frame: EN15805 standard sizes and custom-made special sizes available

* Initial pressure loss for given flow rate

General characteristics

Class ultra-fine filters can remove from the air particles, which are indiscernible to the eye. This class separates, to some extent, also cigarette smoke and bacteria.

Typical applications

Ultra-fine panel filters are suitable for ventilation units, which have limited space for filters.

The filter will remain at the specified performance level, even in difficult environmental conditions, through the whole service life.

Materials

Ultra-fine panel filters are manufactured of micro glass/synthetic fibre having high dust holding capacity and high resistance to humidity. The filter media is framed by plastic frame, which makes filters completely incinerable.

Operating range

Max. operating temperature:	70°C
relative humidity:	Max. 100%
Final pressure drop recommended for filter replacement:	250 Pa
Initial efficiency:	0.2 µm – 23%
	0.6 µm – 72%
	0.8 µm – 98%

Structure

Filter media pleats are supported by thin hot-melt glue traces holding the filter pack firmly in shape. Filter media designed specifically for applications with small depth possibility.

PANEL ULTRA FINE FILTER



CMC-20



PRESION	VELOCIDAD	.25" /6.3 mm.		.375" /9.5 mm.		.5" /12.7 mm..		.625" /15.8 mm.		.75" /19 mm.		1" /25.4 mm.	
CAUDAL	SALIDA	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
(CFM) - M 3/H	FPM												
200/340	320	700	0.015	950	0.030	950	0.032	1065	0.035	1180	0.04	1340	0.060
357/607	571	818	0.045	1005	0.065	1035	0.066	1124	0.075	1224	0.08	1364	0.134
514/874	822	936	0.074	1060	0.099	1120	0.110	1184	0.134	1269	0.134	1425	0.134
671/1141	1073	1054	0.104	1117	0.134	1205	0.134	1200	0.134	1366	0.134	1510	0.134
828/1408	1324	1174	0.134	1257	0.134	1335	0.134	1410	0.134	1481	0.134	1614	0.268
985/1674	1576	1335	0.134	1409	0.134	1479	0.134	1546	0.134	1610	0.268	1733	0.268
1142/1941	1827	1503	0.134	1568	0.268	1631	0.268	1692	0.268	1751	0.268	1863	0.402
1299/2208	2078	1675	0.268	1734	0.268	1791	0.268	1846	0.402	1900	0.402	2004	0.402
1456/2475	2329	1850	0.402	1903	0.402	1955	0.402	2006	0.402	2055	0.536	2151	0.536
1613/2742	2580	2027	0.402	2076	0.536	2123	0.536	2170	0.536	2216	0.536	2305	0.671
1770/3009	3832	2206	0.536	2251	0.671	2295	0.671	2338	0.671	2380	0.805	2463	0.805
1927/3276	3083	2387	0.805	2428	0.805	2469	0.805	2509	0.939	2548	0.939	2626	0.939
2084/3543	3334	2568	0.939	2606	0.939	2644	1.073	2682	1.073	2719	1.073	2791	1.207
2241/3810	3585	2750	1.207	2786	1.207	2822	1.207	2857	1.341	2891	1.341	2960	1.475
2398/4077	3836	2933	1.341	2967	1.475	3000	1.475	3033	1.609	3066	1.609	3130	1.743
PRESION	VELOCIDAD	1.25" / 31.7 mm.		1.5" /38.1 mm.		1.75" /44.4 mm.		2" / 50.8 mm.		2.5" /63.5 mm.		3" /76.2 mm.	
CAUDAL	SALIDA	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
(CFM) - M 3/H	FPM												
200/340	320	1484	0.134	1625	0.134	1754	0.134	1874	0.134	2095	0.134	2294	0.268
357/607	571	1513	0.134	1649	0.134	1775	0.134	1892	0.134	2109	0.268	2305	0.268
514/874	822	1567	0.134	1697	0.134	1818	0.268	1932	0.268	2142	0.268	2334	0.402
671/1141	1073	1643	0.134	1766	0.268	1882	0.268	1991	0.268	2194	0.402	2380	0.536
828/1408	1324	1737	0.268	1853	0.268	1963	0.402	2067	0.402	2261	0.536	2441	0.536
985/1674	1576	1848	0.268	1956	0.402	2059	0.402	2158	0.536	2344	0.536	2516	0.671
1142/1941	1827	1970	0.402	2072	0.402	2169	0.536	2262	0.536	2439	0.671	2604	0.805
1299/2208	2078	2103	0.536	2198	0.536	2289	0.671	2377	0.671	2545	0.805	2703	0.939
1456/2475	2329	2243	0.671	2332	0.671	2418	0.805	2501	0.805	2661	0.939	2811	1.073
1613/2742	2580	2391	0.805	2474	0.805	2555	0.939	2634	0.939	2785	1.073	2928	1.341
1770/3009	3832	2544	0.939	2622	0.939	2698	1.073	2773	1.073	2916	1.341	3053	1.475
1927/3276	3083	2701	1.073	2775	1.207	2847	1.207	2917	1.341	3053	1.475	3184	1.743
2084/3543	3334	2862	1.341	2932	1.341	3000	1.475	3067	1.609	3196	1.743	3321	2.012
2241/3810	3585	3027	1.475	3092	1.609	3157	1.743	3220	1.877	3343	2.012	3462	2.280
2398/4077	3836	3194	1.743	3256	1.877	3317	2.012	3277	2.146	3495	2.280	3608	2.548

CMC-40

PRESION	VELOCIDAD	.25" /6.3 mm.		.375" /9.5 mm.		.5" /12.7 mm.		.525" /15.8 mm.		.75" /19 mm.		1" /25.4 mm.	
CAUDAL	SALIDA	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
(CFM) - M 3/H													
706/1200	466					600	0.136	670	0.136	730	0.136	830	0.136
1059/1800	699			580	0.136	650	0.136	710	0.136	760	0.136	860	0.272
1412/2400	932	570	0.136	640	0.136	700	0.136	760	0.272	810	0.272	900	0.272
1765/3000	1165	650	0.136	710	0.136	760	0.272	810	0.272	860	0.272	950	0.408
2118/3600	1398	730	0.272	780	0.272	830	0.272	880	0.408	930	0.408	1010	0.544
2471/4200	1631	820	0.272	860	0.408	910	0.408	950	0.544	1000	0.544	1070	0.680
2824/4800	1864	910	0.408	950	0.544	990	0.544	1030	0.680	1070	0.680	1140	0.816
3176/5400	2096	1000	0.680	1040	0.680	1080	0.816	1110	0.816	1150	0.952	1220	1.088
3529/6090	2329	1090	0.816	1130	0.952	1160	0.952	1200	1.088	1230	1.088	1290	1.224
3882/6600	2562	1180	1.088	1220	1.088	1250	1.224	1280	1.360	1320	1.360	1370	1.496
4235/7200	2795	1280	1.360	1310	1.496	1340	1.496	1370	1.632	1400	1.632	1460	1.904
4588/7800	3028	1380	1.632	1410	1.768	1430	1.904	1460	1.904	1490	2.040	1540	2.312
4941/8400	3261	1470	2.040	1500	2.176	1530	2.312	1550	2.312	1580	2.448	1630	2.720
5294/9000	3494	1570	2.448	1600	2.584	1620	2.720	1650	2.856	1670	2.992	1720	3.128
5647/9600	3727	1670	2.992	1690	3.128	1720	3.264	1740	3.400	1760	3.536	1810	3.672
PRESION	VELOCIDAD	1.25" /31.7 mm.		1.5" /38.1 mm.		1.75" /44.4 mm.		2" / 50.8 mm.		2.5" /63.5 mm.		3" /76.2 mm.	
CAUDAL	SALIDA	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
(CFM) - M 3/H													
706/1200	466	920	0.272	1010	0.272	1080	0.408	1160	0.544	1290	0.680	1410	0.816
1059/1800	699	950	0.272	1030	0.408	1110	0.544	1180	0.544	1310	0.680	1430	0.952
1412/2400	932	990	0.408	1070	0.544	1140	0.544	1210	0.680	1330	0.952	1450	1.088
1765/3000	1165	1030	0.544	1110	0.680	1180	0.680	1250	0.816	1370	1.088	1480	1.360
2118/3600	1398	1090	0.680	1160	0.816	1230	0.816	1290	0.952	1410	1.224	1520	1.496
2471/4200	1631	1150	0.816	1210	0.952	1280	1.088	1340	1.224	1460	1.496	1570	1.768
2824/4800	1864	1210	0.952	1280	1.088	1340	1.224	1400	1.360	1510	1.768	1610	2.040
3176/5400	2096	1280	1.224	1340	1.360	1400	1.496	1460	1.632	1570	2.040	1670	2.312
3529/6090	2329	1360	1.496	1410	1.632	1470	1.768	1530	1.904	1630	2.312	1730	2.584
3882/6600	2562	1430	1.768	1490	1.904	1540	2.040	1590	2.312	1690	2.584	1790	2.992
4235/7200	2795	1510	2.040	1570	2.312	1620	2.448	1670	2.584	1760	2.992	1850	3.400
4588/7800	3028	1600	2.448	1650	2.720	1690	2.856	1740	3.128	1830	3.536	1920	3.944
4941/8400	3261	1680	2.856	1730	3.128	1770	3.264	1820	3.536	1910	3.944	1990	4.388
5294/9000	3494	1770	3.400	1810	3.672	1860	3.808	1900	4.080	1980	4.388		
5647/9600	3727	1850	3.944	1900	4.216	1940	4.488	1980	4.624				



CMC-60

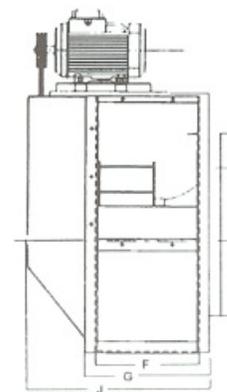
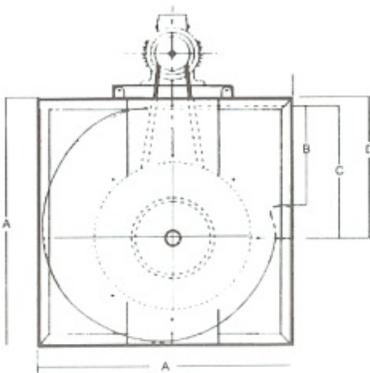
PRESION CAUDAL	VELOCIDAD SALIDA	26" /6.3 mm.		376" /9.6 mm.		6" /12.7 mm.		626" /16.6 mm.		76" /19 mm.		1" /26.4 mm.	
(CFM) - M 3/H		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
3412/5950	1143	540	0.272	570	0.408	600	0.408	630	0.544	660	0.544	710	0.680
3882/6600	1301	590	0.408	620	0.408	650	0.544	680	0.680	700	0.680	750	0.952
4353/7400	1459	650	0.544	680	0.544	700	0.680	730	0.816	750	0.816	800	1.088
4824/8200	1650	710	0.680	740	0.816	760	0.816	780	0.952	800	1.088	850	1.224
5294/9000	1774	780	0.816	800	0.952	820	1.088	840	1.088	860	1.224	900	1.496
5765/9800	1932	840	1.088	860	1.088	880	1.224	890	1.360	910	1.496	950	1.768
6235/10600	2090	900	1.224	920	1.360	940	1.496	950	1.632	970	1.768	1000	2.040
6706/11400	2248	960	1.494	980	1.632	1000	1.768	1010	1.904	1030	2.040	1060	2.312
7176/12200	2405	1030	1.904	1040	2.040	1060	2.176	1070	2.312	1090	2.448	1120	2.720
7647/13000	2563	1090	2.176	1100	2.312	1120	2.448	1130	2.584	1150	2.720	1170	3.128
8118/13800	2721	1150	2.584	1170	2.720	1180	2.856	1190	2.992	1210	3.264	1230	3.536
8588/14600	2878	1220	2.992	1230	3.264	1240	3.400	1250	3.536	1270	3.672	1290	3.944
9059/15400	3036	1280	3.536	1290	3.672	1310	3.944	1320	4.080	1330	4.216	1350	4.488
9529/16200	3194	1350	4.080	1360	4.216	1370	4.488	1380	4.624	1390	4.760	1410	5.168
10000/17000	3352	1410	4.760	1420	4.896	1430	5.032	1440	5.304	1450	5.440	1480	5.848
PRESION CAUDAL	VELOCIDAD SAUDA	1.26" / 31.7 mm.		1.6"/36.1 mm.		1.76" /44.4 mm.		2" / 60.8 mm.		2.6" /63.6 mm.		3" /76.2 mm.	
(CFM) - M 3/H		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	HP	RPM	HP
3412/5800	1143	770	0.952	820	1.088	870	1.224	920	1.360	1010	1.768	1100	2.040
3882/6600	1301	800	1.088	850	1.224	900	1.496	940	1.632	1030	2.040	1110	2.448
4353/7400	1459	840	1.224	890	1.496	930	1.632	970	1.904	1050	2.312	1130	2.720
4824/8200	1650	890	1.496	930	1.632	970	1.904	1010	2.040	1080	2.584	1160	2.992
5294/9000	1774	940	1.632	970	1.904	1010	2.176	1050	2.448	1120	2.856	1190	3.400
5765/9800	1932	990	1.904	1020	2.176	1050	2.448	1090	2.720	1160	3.264	1220	3.808
6235/10600	2090	1040	2.176	1070	2.448	1100	2.720	1130	2.992	1200	3.536	1260	4.216
6706/11400	2248	1090	2.584	1120	2.856	1150	3.128	1180	3.400	1240	3.944	1300	4.624
7176/12200	2405	1150	2.992	1180	3.264	1200	3.536	1230	3.808	1290	4.488	1350	5.032
7647/13000	2563	1200	3.400	1230	3.672	1260	3.944	1290	4.352	1340	4.896	1390	5.576
8118/13800	2721	1260	3.808	1290	4.080	1310	4.488	1340	4.760	1390	5.440	1440	6.120
8588/14600	2878	1320	4.352	1340	4.624	1370	5.032	1390	5.304	1440	5.984	1490	6.800
9059/15400	3036	1380	4.896	1400	5.304	1430	5.576	1450	5.984	1490	6.664	1540	7.480
9529/16200	3194	1440	5.440	1460	5.848	1480	6.256	1510	6.664	1550	7.344		
10000/17000	3352	1500	6.120	1520	6.528	1540	6.936						

CMC-80

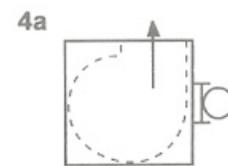
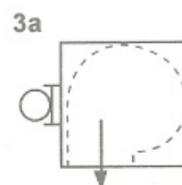
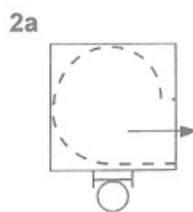
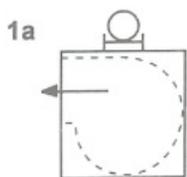
PRESION CAUDAL	VELOCIDAD SAUDA	26" /6.3 mm.		376" / 9.6 Mm.		6" /12.7 mm.		626" /16.6 mm.		76"/19 mm.		1" /26.4 mm.	
(CFM) - M 3/H	FPM	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP
3500/5950	661	284	0.134	320	0.268	353	0.402	385	0.402	416	0.536	473	0.671
4514/7674	853	328	0.268	357	0.402	385	0.536	413	0.536	439	0.671	489	0.939
5528/9398	1045	377	0.402	402	0.536	426	0.671	449	0.805	472	0.939	516	1.207
6542/11121	1236	429	0.671	450	0.805	471	0.939	492	1.073	512	1.207	551	1.475
7556/12845	1428	483	0.939	501	1.073	520	1.207	538	1.341	556	1.475	591	1.743
8570/14569	1620	538	1.207	555	1.341	571	1.475	587	1.743	604	1.877	635	2.146
9584/16293	1812	594	1.609	609	1.743	624	1.877	639	2.146	653	2.280	682	2.682
10598/18017	2003	651	2.012	664	2.280	678	2.414	691	2.682	705	2.816	731	3.218
11612/19740	2195	708	2.682	721	2.816	733	3.084	745	3.218	758	3.487	782	3.889
12626/21464	2387	766	3.353	777	3.487	789	3.755	800	4.023	812	4.157	834	4.694
13640/23188	2578	824	4.023	834	4.291	845	4.559	856	4.828	866	5.096	887	5.498
14654/24912	2770	882	4.962	892	5.230	902	5.498	912	5.766	922	6.035	941	6.571
15668/26636	2962	940	6.035	950	6.303	959	6.571	968	6.839	977	7.107	996	7.644
16682/28359	3154	999	7.241	1008	7.510	1016	7.778	1025	8.046	1034	8.314	1051	8.985
17696/30083	3345	1057	8.448	1066	8.851	1074	9.119	1082	9.387	1091	9.789	1107	10.326
PRESION CAUDAL	VELOCIDAD SALIDA	1.35"/31.7 mm.		1.6"/38.1 mm.		1.75"/44.4 mm.		2" / SO.8 mm.		2" / 63.5 mm.		3" /76.2 mm.	
(CFM) - M 3/H	FPM	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP	RPM	HP
3500/5950	661	527	0.939	577	1.073	625	1.341	670	1.475	754	1.877	833	2.280
4514/7674	853	537	1.207	582	1.475	625	1.609	667	1.877	745	2.414	818	2.950
5528/9398	1045	559	1.475	599	1.743	639	2.012	676	2.280	749	2.950	817	3.487
6542/11121	1236	589	1.743	626	2.012	661	2.414	696	2.682	762	3.353	825	4.023
7556/12845	1428	625	2.146	658	2.414	691	2.816	722	3.218	784	3.889	842	4.694
8570/14569	1620	666	2.548	696	2.950	725	3.353	755	3.755	811	4.559	866	5.364
9584/16293	1812	710	3.084	738	3.487	765	3.899	792	4.291	844	5.230	895	6.035
10598/18017	2003	757	3.621	783	4.157	888	4.559	933	4.962	881	5.900	928	6.839
11612/19740	2195	806	4.425	830	4.828	853	5.230	876	5.766	921	6.705	965	7.778
12626/21464	2387	856	5.096	878	5.632	900	6.169	921	6.705	964	7.644	1005	8.851
13640/23188	2578	908	6.035	928	6.571	949	7.107	969	7.644	1009	8.717	1048	9.923
14654/24912	2770	961	7.107	980	7.644	999	8.108	1018	8.717	1055	9.923	1092	11.130
15668/26636	2962	1014	8.314	1032	8.851	1050	9.387	1068	10.058	1103	11.264	1138	12.471
16682/28359	3154	1068	9.521	1085	10.192	1102	10.862	1119	11.399	1153	12.740		
17696/30083	3345	1123	10.996	1139	11.667	1155	12.337						

CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES PRINCIPALES

DIMENSIONES mm											
Modelo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
CMC - 20	520	210	287	306	253	204	255	∅320	60	383	60
CMC - 40	835	336	444	471	390	320	396	∅515	60	565	60
CMC - 60	1110	490	609	649	510	455	557	∅742	65	785	60
CMC - 80	1490	653	827	864	720	600	702	∅704	80	956	75



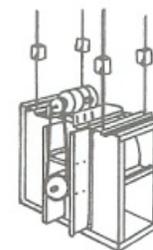
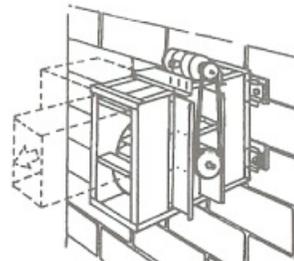
POSICIONES DE DESCARGA



ACCESORIOS OPCIONALES

- Guarda de protección en succión y descarga.
- Base antivibratoria.
- Protección de bandas y cubremotor.
- Puerta de inspección.
- Tubo para drena.
- Recubrimiento especial.

VERSATILIDAD DE MONTAJE



مۆشەبە

Rubber Hose



ST 120 VP*

Gasoline vapor recovery hose

Temp. Range: -40°F to 140°F

Applications: Gasoline vapor recovery only

Construction: Nitrile rubber, rigid PVC helix, smooth bore, corrugated O.D., static grounding wire

Note: Static wire must be properly imbedded during fitting installation and tested to assure proper static grounding of hose to a grounded system.

Inside Dia. Inches	Outside Dia. Inches	Pitch Inches	Minimum Bend Radius 72°F, Inches	Working Pressure 72°F, P.S.I.	Vacuum Rating 72°F, In Hg	Weight Lbs/Ft	Standard Length Ft
2	2.36	0.39	3.0	20	29.8	0.61	60,100
3	3.46	0.59	3.5	10	29.8	1.00	60,100
4	4.57	0.65	5.0	10	29.8	1.70	60,100

Rubber Hose



180 AR*

Heavy-duty abrasion resistant suction and discharge hose

Temp. Range: -40°F to 140°F

Applications: Heavy-duty abrasion resistant suction hose for vacuum trucks or handling abrasives such as crushed rock, sand, pea gravel, cement powder, dry fertilizer, iron ore and grains

Construction: SBR rubber blended with static carbon black, rigid PVC helix, smooth bore, corrugated O.D.

Features: Lightweight and flexible. Extremely abrasion resistant. Static dissipating with no grounding wire. Consult factory for specific applications.

Note: This hose was not designed for bulk handling such as unloading of rail cars.

Inside Dia. Inches	Outside Dia. Inches	Pitch Inches	Minimum Bend Radius 72°F, Inches	Working Pressure 72°F, P.S.I.	Vacuum Rating 72°F, In Hg	Weight Lbs/Ft	Standard Length Ft
1 1/4	1.57	0.33	2.0	45	29.8	0.31	100
1 1/2	1.82	0.35	2.0	45	29.8	0.37	100
2	2.35	0.39	2.5	40	29.8	0.50	100
2 1/2	2.95	0.56	2.5	35	29.8	0.88	100
3	3.50	0.59	3.0	35	29.8	1.10	100
3 1/2	4.11	0.64	4.0	30	29.8	1.35	100
4	4.63	0.65	4.5	30	29.8	1.77	50,100
5	5.76	0.87	5.0	30	28.0	2.47	50,100
6	6.73	0.87	9.2	30	28.0	3.08	50,100
7	7.83	0.87	14.0	30	27.0	4.10	50
8	9.04	0.91	15.0	30	27.0	5.65	50
10	11.18	1.00	30.0	28	25.0	8.88	20
12	13.31	1.18	40.0	25	25.0	10.43	20

* Over flexing or repeated flexing of hose within 18" of fitting is a common cause of hose failure. Installing a 12" - 14" section of our Banding Coil at the end of the hose should be considered.

Kanflex will not be responsible for damage to hose due to over flexing.

Rubber Hose

180 BL*

Lightweight abrasion resistant blower and suction hose

Temp. Range: -40°F to 140°F

Applications: Designed for suction and light blowing of lightweight abrasives such as rockwool, fiberglass, sawdust, grain, insulation and cement dust

Construction: SBR rubber blended with static carbon black, rigid PVC helix, smooth bore, corrugated O.D.

Inside Dia. Inches	Outside Dia. Inches	Pitch Inches	Minimum Bend Radius 72°F, Inches	Working Pressure 72°F, P.S.I.	Vacuum Rating 72°F, In Hg	Weight Lbs/Ft	Standard Length Ft
2 1/2	2.91	0.56	2.5	18	25.0	0.71	100
3	3.44	0.59	3.0	13	23.0	0.92	100
4	4.53	0.65	4.0	10	20.0	1.50	50,100
5	5.63	0.87	5.0	8	15.0	1.68	50,100
6	6.67	0.87	9.0	8	15.0	2.40	50,100
7	8.71	0.87	10.0	8	15.0	3.00	50
8	8.98	0.91	12.0	8	15.0	4.40	50



180 HR*

High temperature abrasion resistant suction hose

Temp. Range: -40°F to 220°F

Applications: Heavy-duty suction applications where high temperature and abrasion are factors such as vacuum trucks or the handling of fly ash, crushed rock, sand, pea gravel or cement powder

Construction: EPDM rubber, polyethylene helix, metal helical wire, smooth bore, corrugated O.D.

Features: Lightweight and flexible. Integral wire helix can be grounded. External helix provides easy drag. Rated up to 220°F.

Inside Dia. Inches	Outside Dia. Inches	Pitch Inches	Minimum Bend Radius 72°F, Inches	Working Pressure 72°F, P.S.I.	Vacuum Rating 72°F, In Hg	Weight Lbs/Ft	Standard Length Ft
4	4.69	0.65	5.5	30	29.8	1.75	50,100
6	6.83	0.87	9.8	30	28.0	3.46	50,100
8	9.13	0.87	15.0	30	27.0	6.00	50



Rubber Hose

* Over flexing or repeated flexing of hose within 18" of fitting is a common cause of hose failure. Installing a 12" - 14" section of our Banding Coil at the end of the hose should be considered.

Kanfex will not be responsible for damage to hose due to over flexing.

Rubber Hose



180 MV*

Abrasion resistant medium-duty suction and discharge hose

Temp. Range: -40°F to 140°F

Applications: Designed for numerous applications such as grain and roof vacuums

Construction: SBR rubber with carbon black, rigid PVC helix, smooth bore, corrugated O.D.

Inside Dia. Inches	Outside Dia. Inches	Pitch Inches	Minimum Bend Radius 72°F, Inches	Working Pressure 72°F, P.S.I.	Vacuum Rating 72°F, In Hg	Weight Lbs/Ft	Standard Length Ft
5	5.75	0.87	5.0	8	18.0	2.00	50,100
6	6.73	0.87	9.0	8	18.0	2.70	50,100

Rubber Hose



220 RS*

All weather suction and discharge hose

Temp. Range: -40°F to 140°F

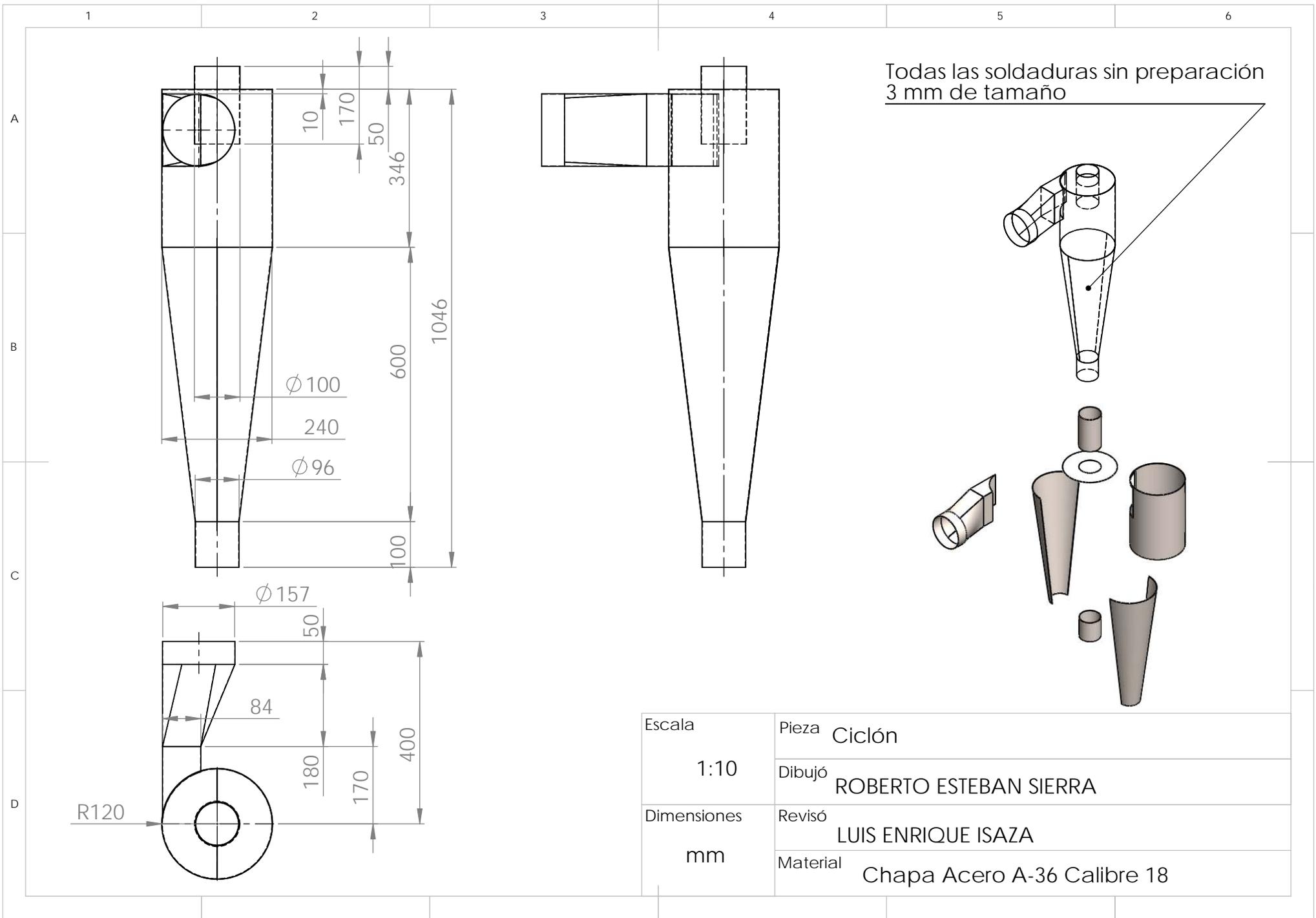
Applications: Heavy-duty liquid suction hose for use in construction dewatering, liquid waste, cesspool cleaning, septic handling, agricultural applications and marine use

Construction: SBR rubber, rigid PVC helix, smooth bore, smooth O.D.

Inside Dia. Inches	Outside Dia. Inches	Pitch Inches	Minimum Bend Radius 72°F, Inches	Working Pressure 72°F, P.S.I.	Vacuum Rating 72°F, In Hg	Weight Lbs/Ft	Standard Length Ft
1½	1.85	0.35	3.0	50	29.8	0.50	100
2	2.40	0.39	4.0	50	29.8	0.74	100
2½	2.99	0.56	5.0	50	29.8	1.01	100
3	3.50	0.59	6.0	43	29.8	1.30	100
4	4.57	0.65	9.0	38	29.8	2.01	100
6	6.69	0.87	15.0	23	28.0	3.37	60,100

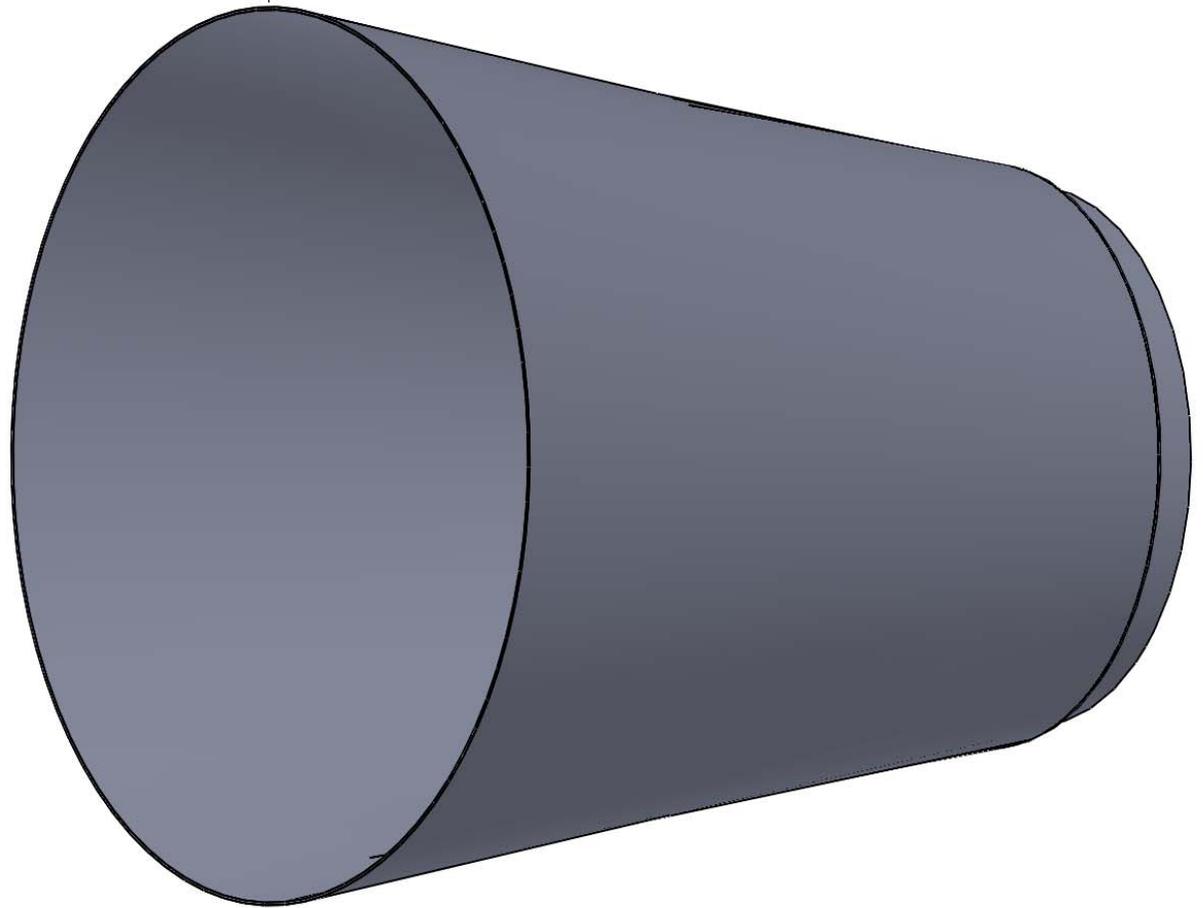
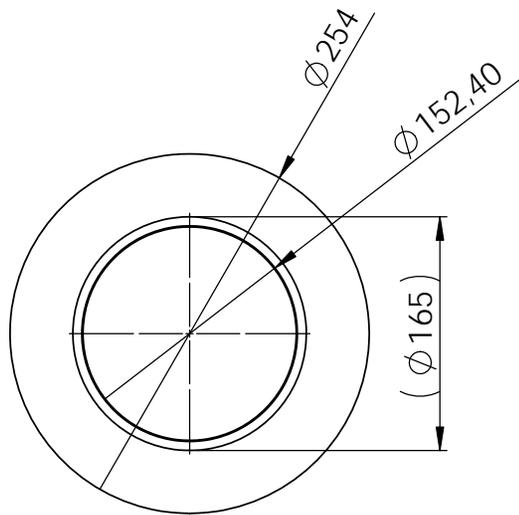
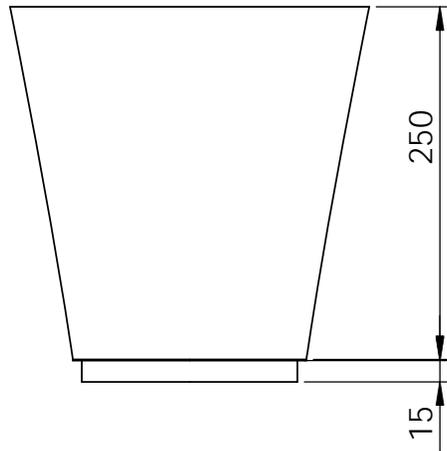
* Over flexing or repeated flexing of hose within 18" of fitting is a common cause of hose failure. Installing a 12" - 14" section of our Banding Coil at the end of the hose should be considered.

Kanflex will not be responsible for damage to hose due to over flexing.

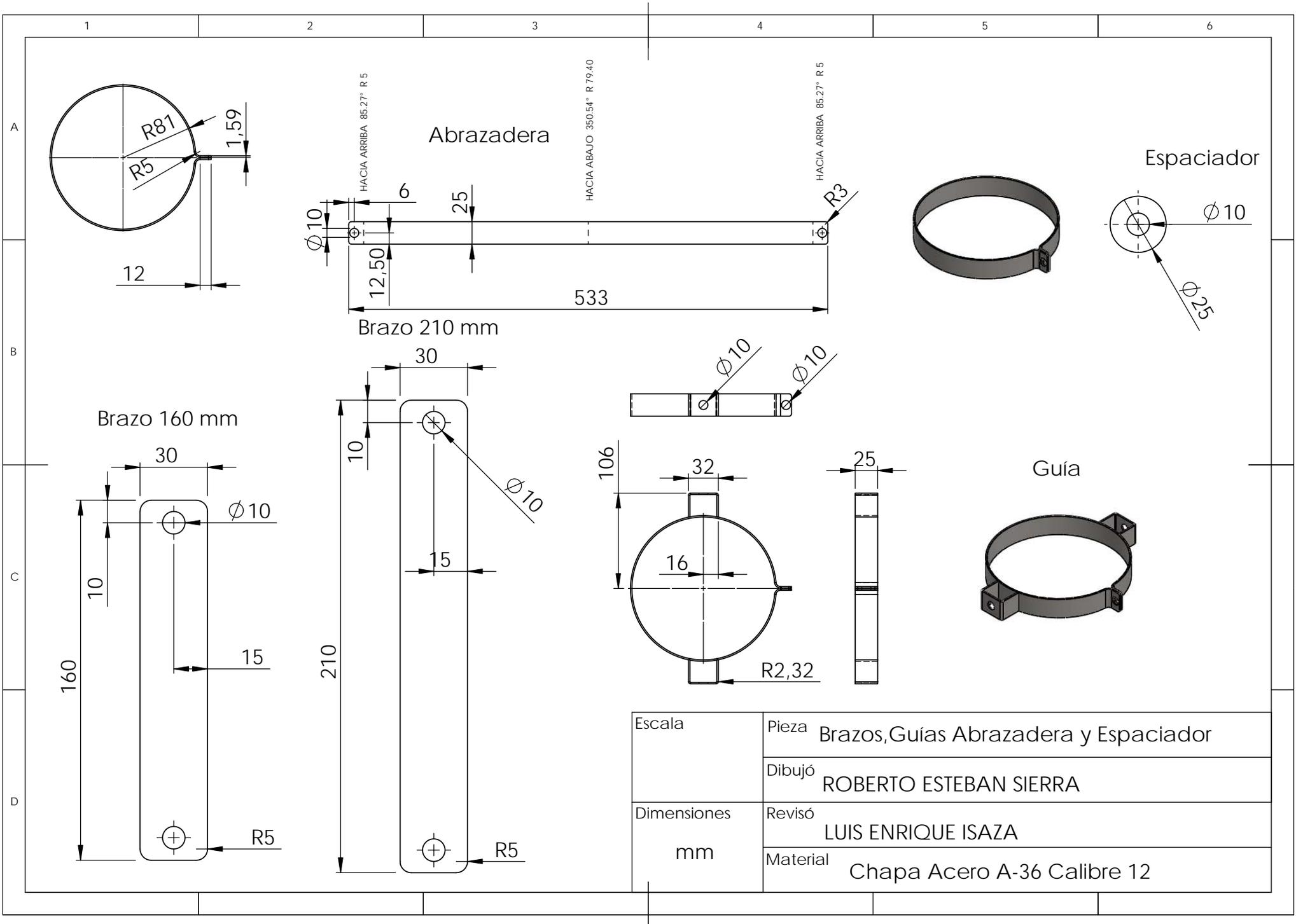


Todas las soldaduras sin preparación
3 mm de tamaño

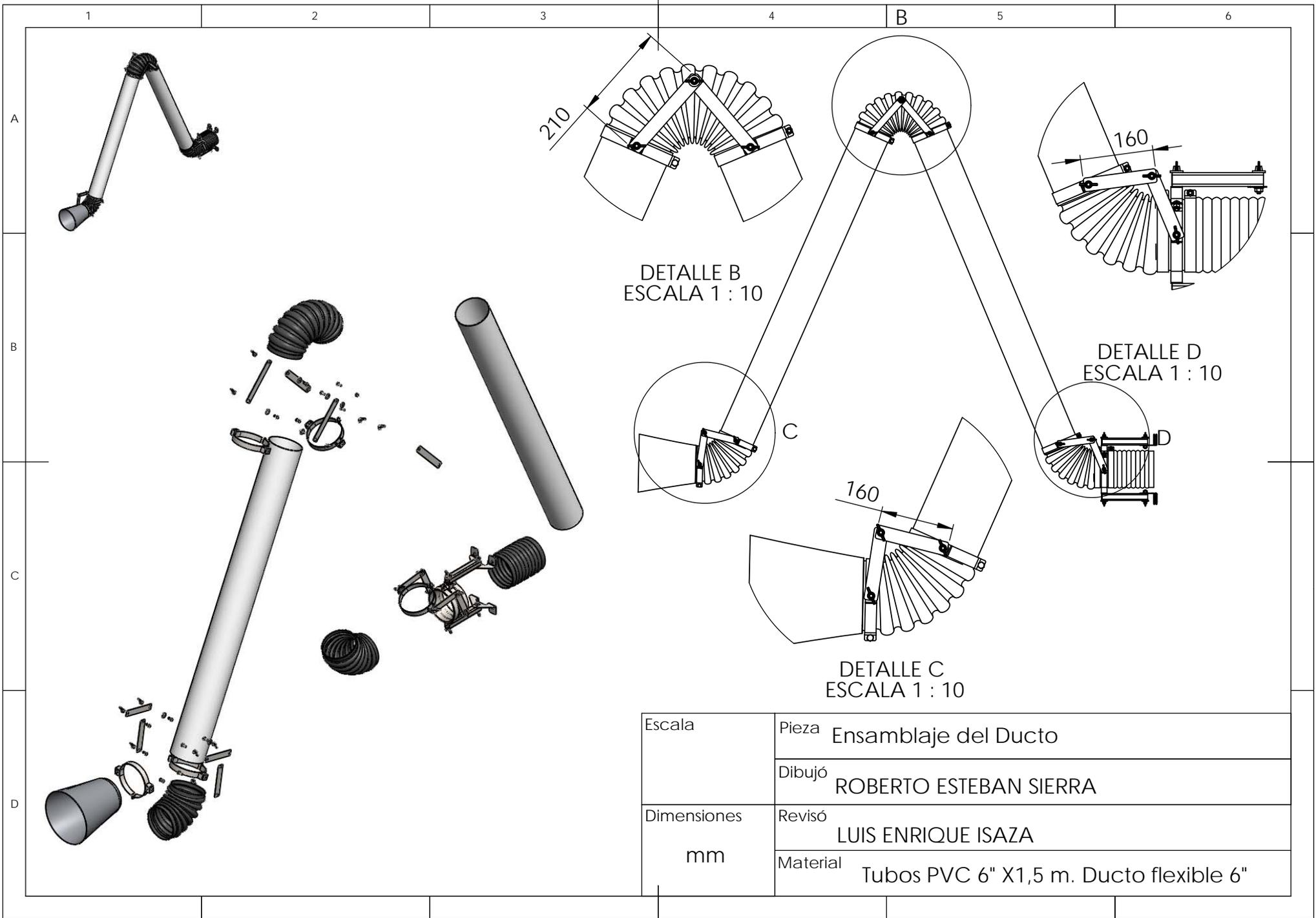
Escala	Pieza	Ciclón
1:10	Dibujó	ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó	LUIS ENRIQUE ISAZA
mm	Material	Chapa Acero A-36 Calibre 18



Escala	Pieza	Boca de Aspiración
1:5	Dibujó	ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó	LUIS ENRIQUE ISAZA
mm	Material	Chapa Acero A-36 Calibre 18



Escala	Pieza	Brazos, Guías Abrazadera y Espaciador
	Dibujó	ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó	LUIS ENRIQUE ISAZA
	Material	Chapa Acero A-36 Calibre 12
mm		



DETALLE B
ESCALA 1 : 10

DETALLE D
ESCALA 1 : 10

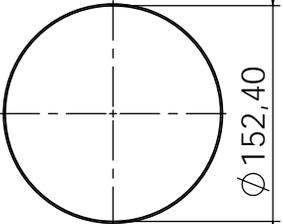
DETALLE C
ESCALA 1 : 10

Escala	Pieza	Ensamblaje del Ducto
	Dibujó	ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones mm	Revisó	LUIS ENRIQUE ISAZA
	Material	Tubos PVC 6" X1,5 m. Ducto flexible 6"

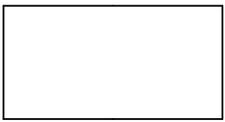
1
A
Guía de Base



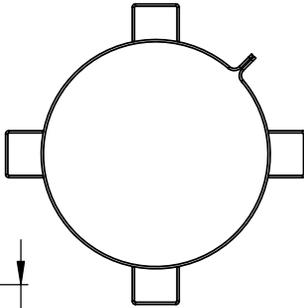
Niple de Base



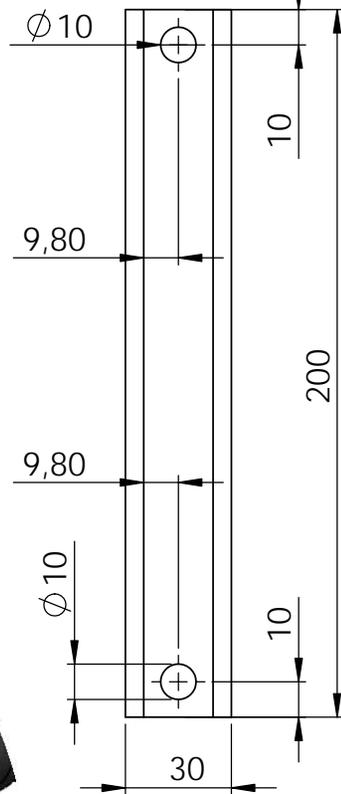
$\varnothing 152,40$
80



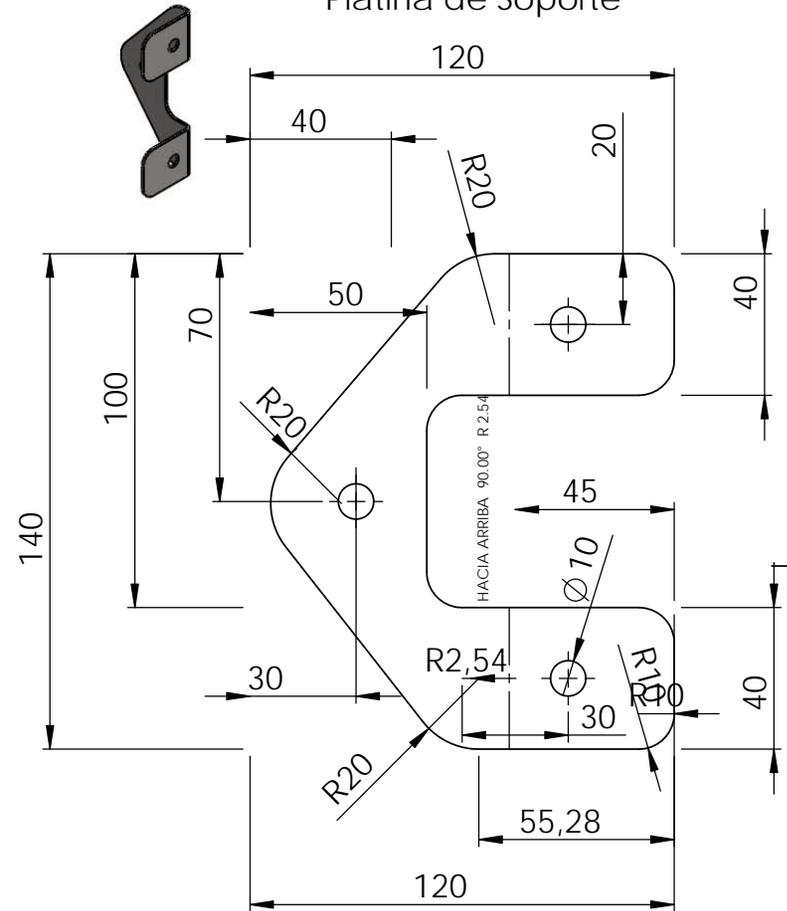
2



3
Brazo



5
Platina de Soporte

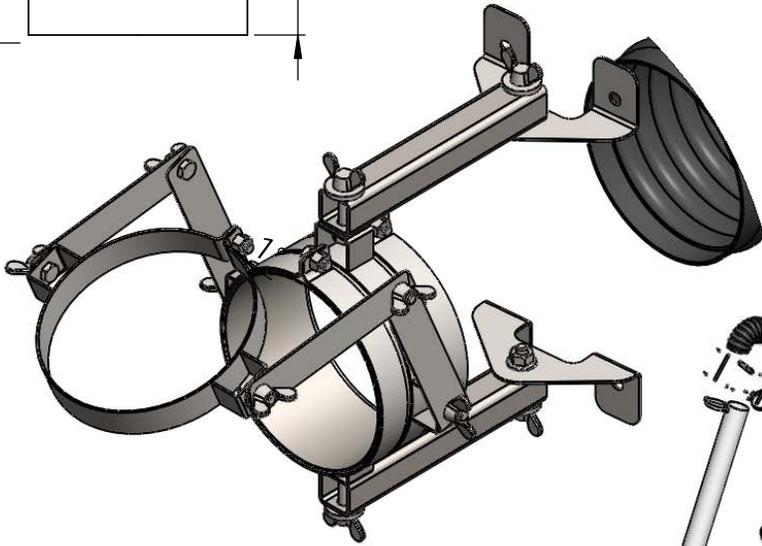


A

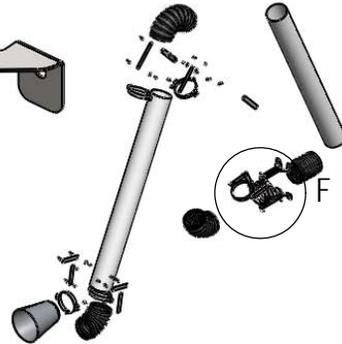
B

C

D



DETALLE F
ESCALA 1 : 5



Escala

Pieza Brazos, Guías Abrazadera y Espaciador

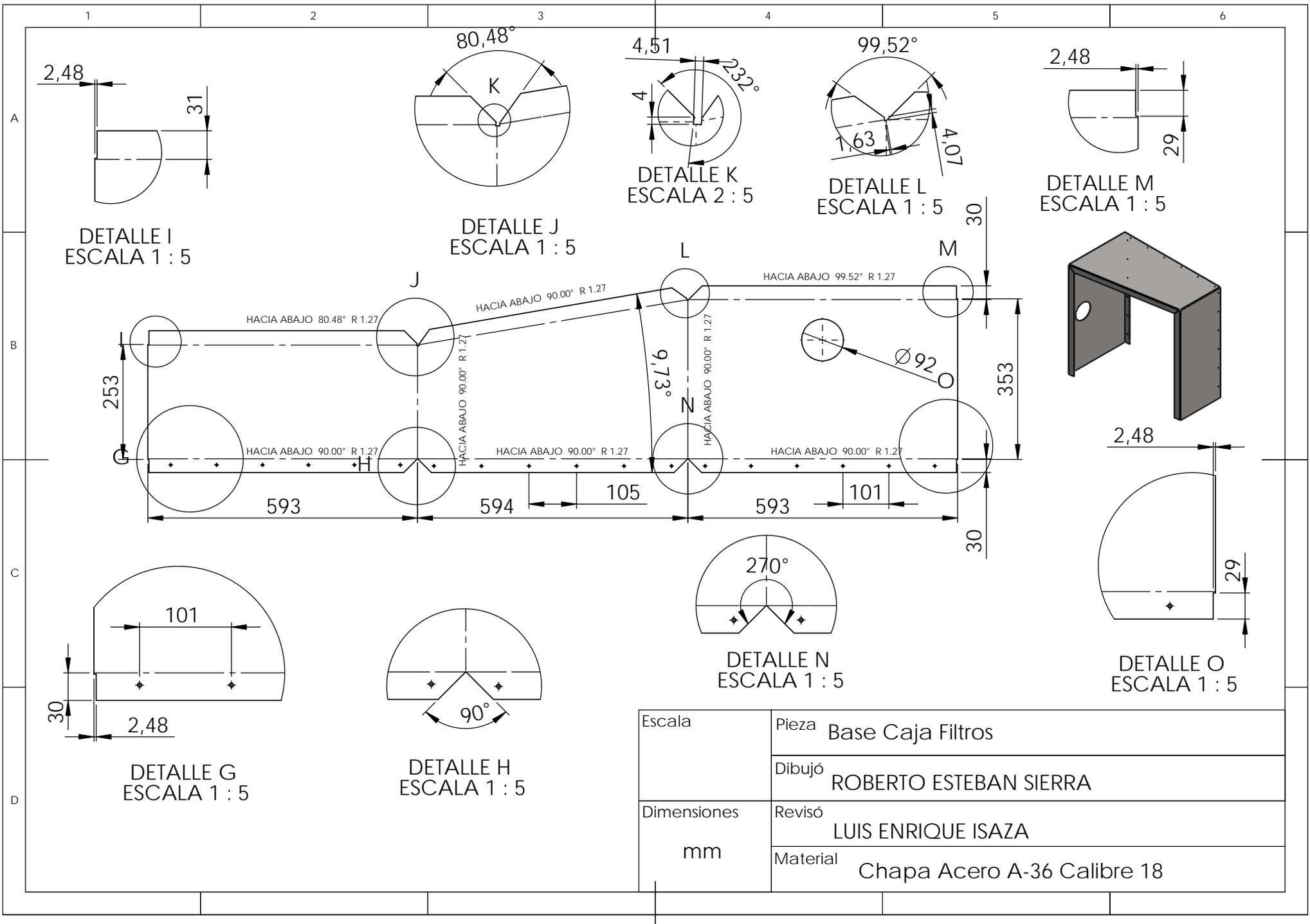
Dibujó ROBERTO ESTEBAN SIERRA

Dimensiones

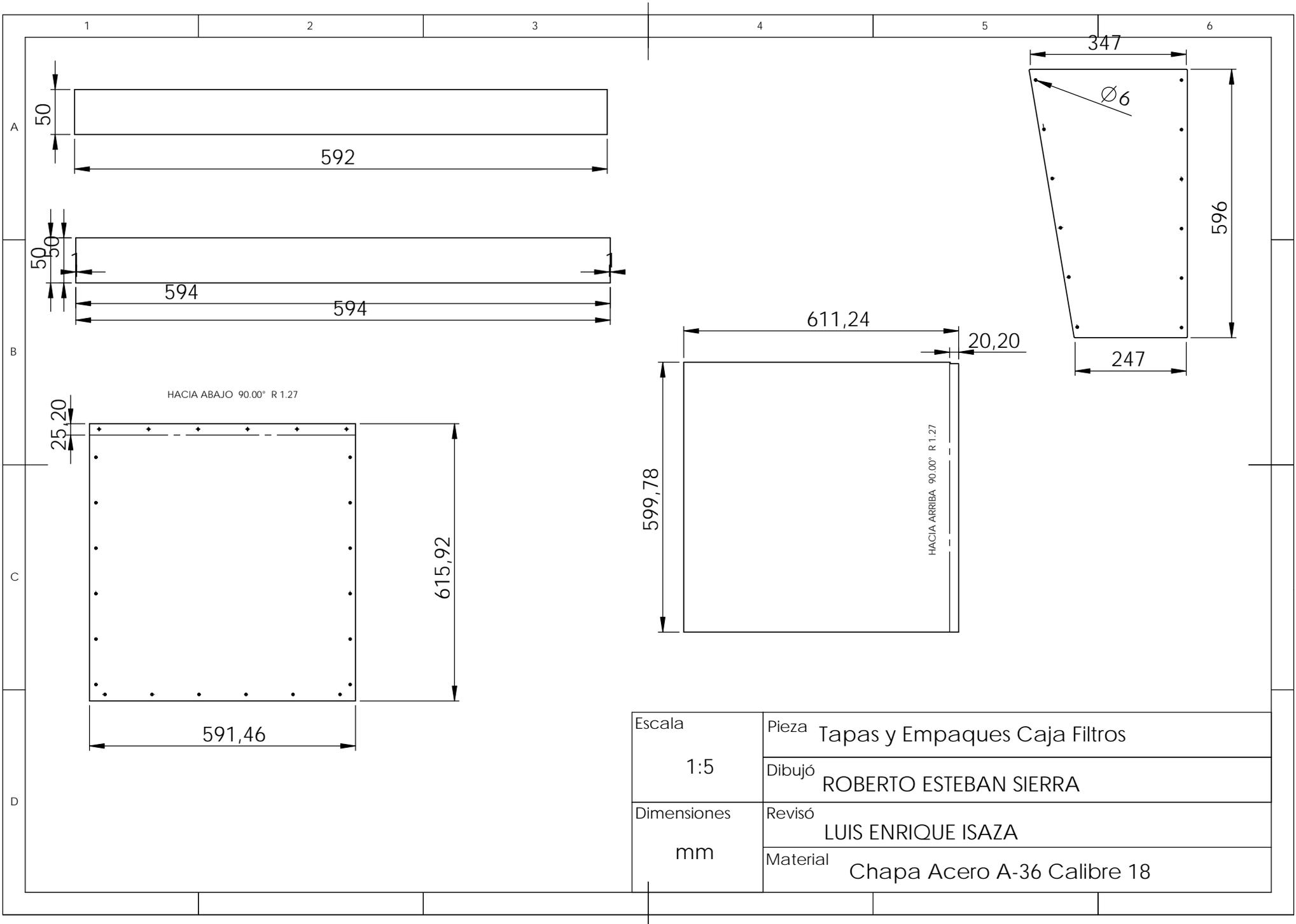
Revisó LUIS ENRIQUE ISAZA

mm

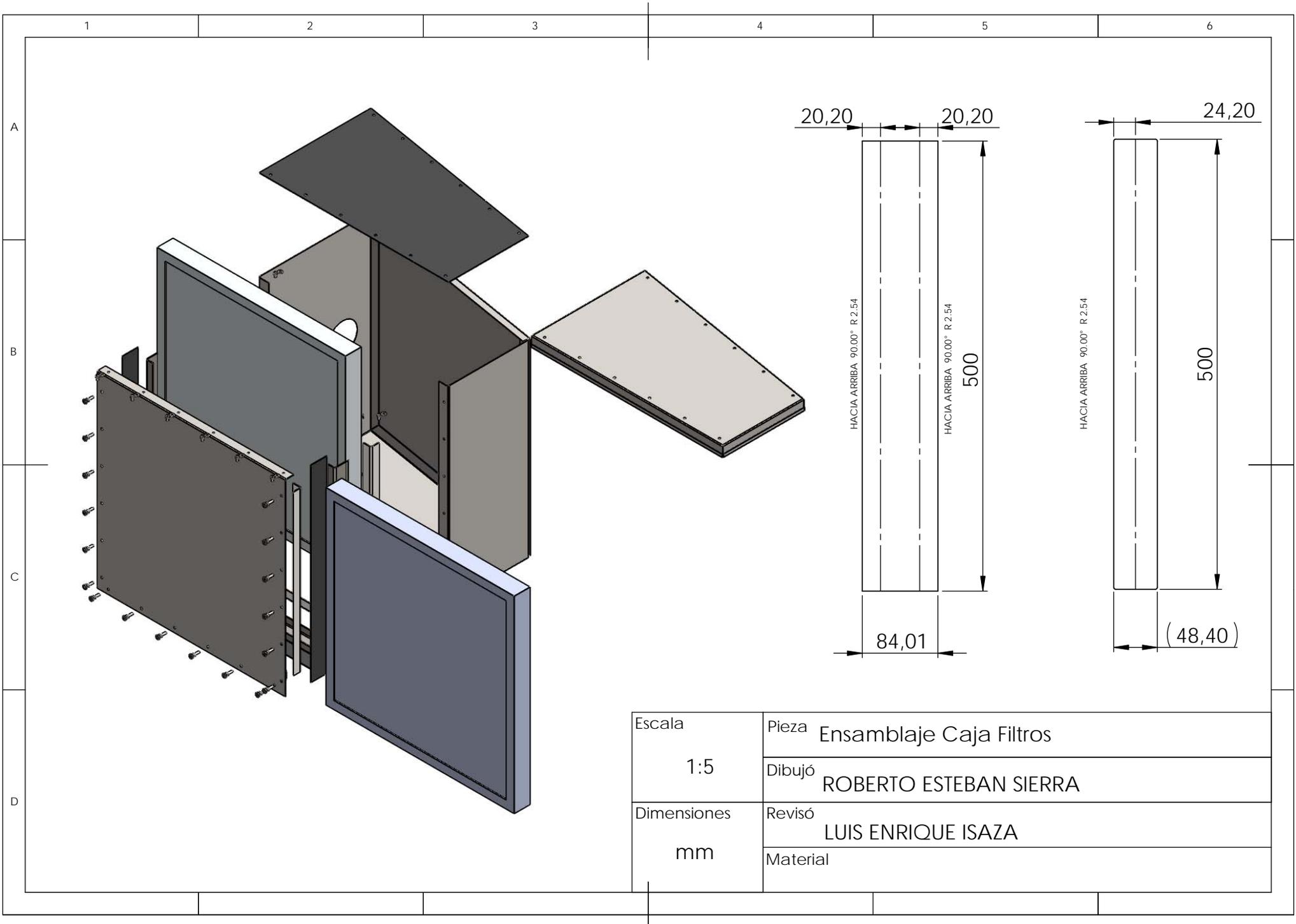
Material Chapa Acero A-36 Calibre 12



Escala	Pieza	Base Caja Filtros
	Dibujó	ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó	LUIS ENRIQUE ISAZA
	Material	Chapa Acero A-36 Calibre 18
mm		



Escala	Pieza	Tapas y Empaques Caja Filtros
1:5	Dibujó	ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó	LUIS ENRIQUE ISAZA
mm	Material	Chapa Acero A-36 Calibre 18



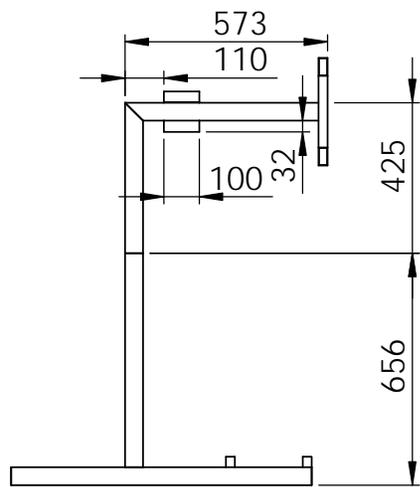
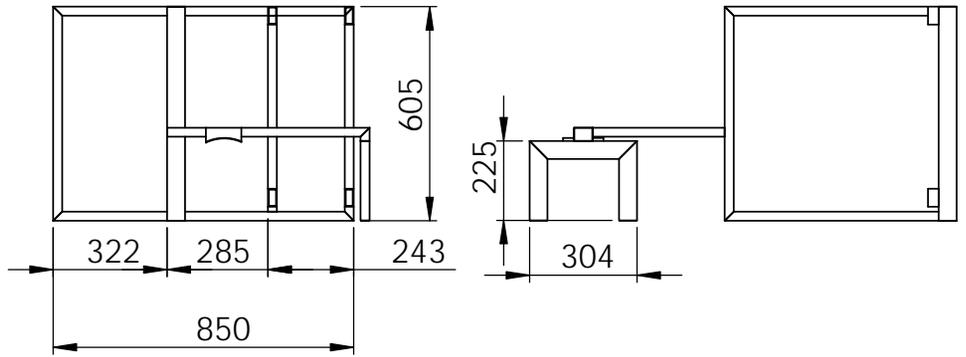
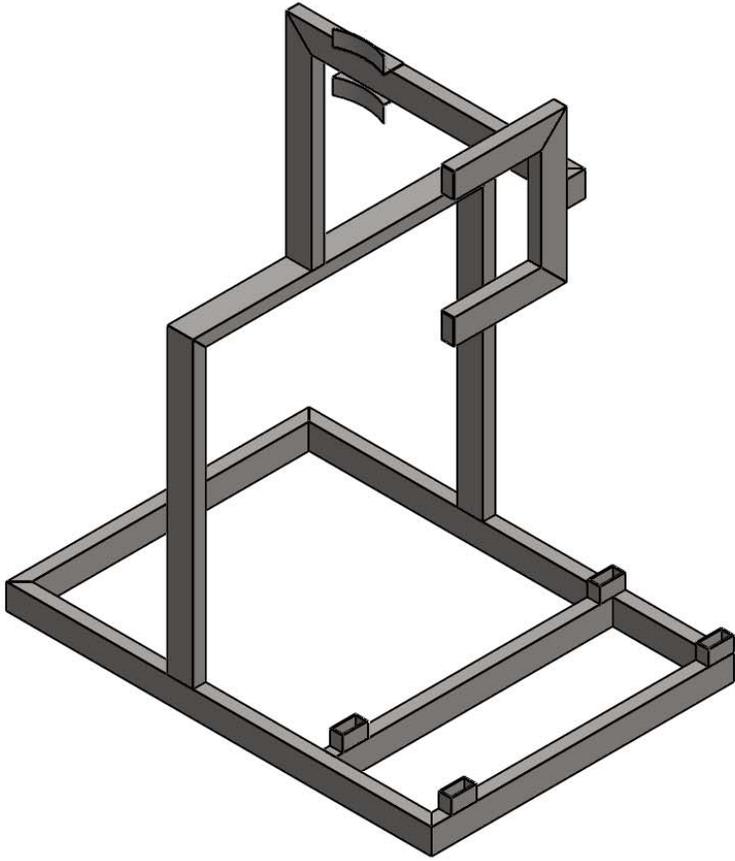
1 2 3 4 5 6

A

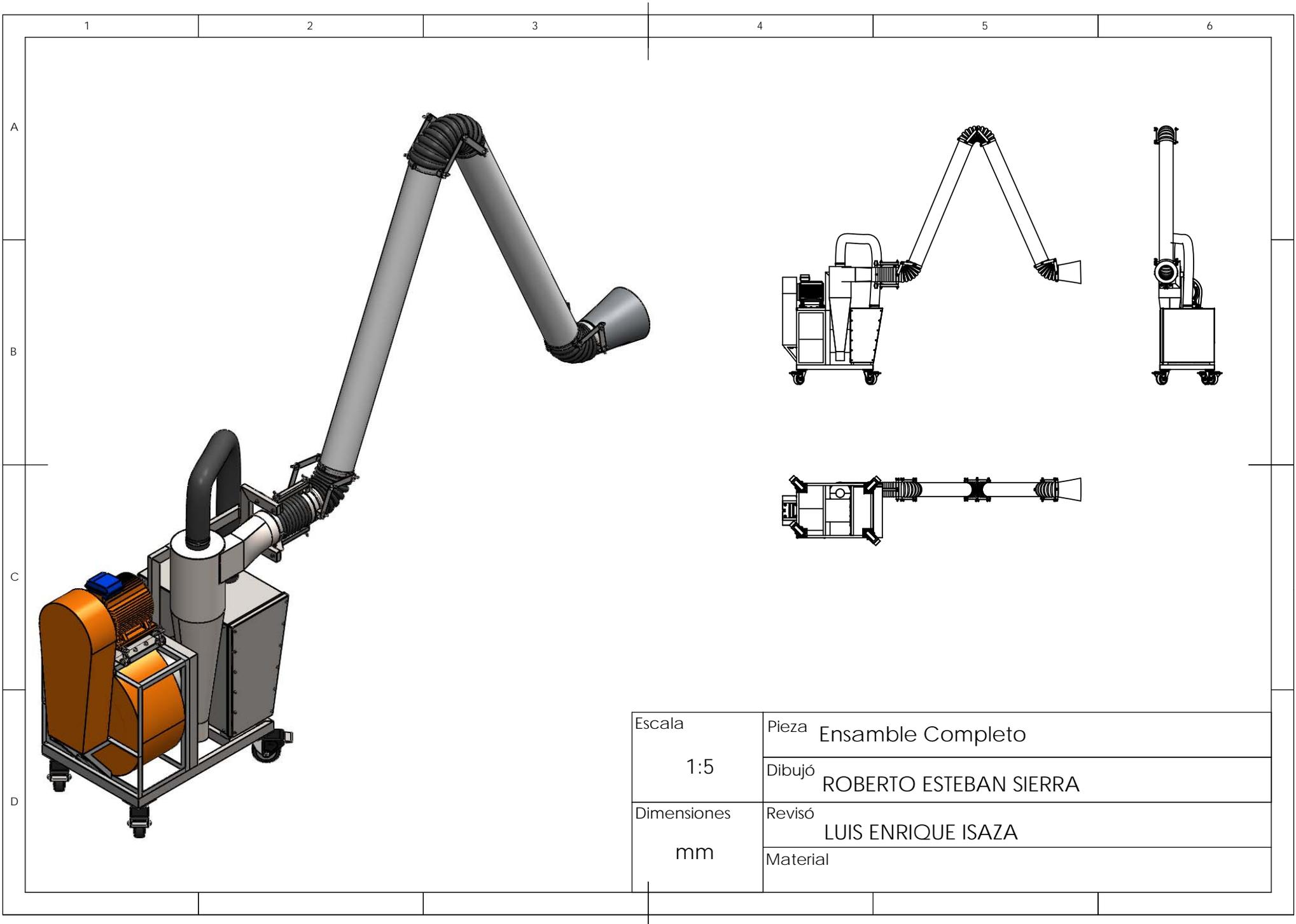
B

C

D



Escala	Pieza Estructura
1:5	Dibujó ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó LUIS ENRIQUE ISAZA
mm	Material Tubo Cuadrado 2"X1"X0,4"



Escala	Pieza Ensamble Completo
1:5	Dibujó ROBERTO ESTEBAN SIERRA
Dimensiones	Revisó LUIS ENRIQUE ISAZA
mm	Material