

FILTRO POR PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA PARA LA REMOCIÓN DE
MATERIAL PARTICULADO EN EL ESCAPE DE MOTORES DIESEL

OSCAR ALBERTO CUÉLLAR HERNÁNDEZ

AYDER FABIÁN RINCÓN RODRÍGUEZ

PROYECTO DE GRADO

Modalidad de Solución a un problema de ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Jesús David Villarreal López
Ingeniero Mecánico

Codirector

Jesús Antonio Ramírez Pastrán
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ, COLOMBIA

2020

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Santo Tomás por la formación profesional humanista que se nos fue brindada, por ser el centro en donde adquirimos el saber que nos llevó hasta este punto y donde han quedado varias de nuestras más memorables experiencias.

A nuestro director, el ingeniero Jesús David Villareal López por el asesoramiento, consejos y correcciones durante el desarrollo de este proyecto. Por el tiempo dedicado y los conocimientos que nos transmitió, tanto en la asesoría como en los cursos que tuvimos la oportunidad de tomar con él.

A nuestro codirector, Jesús Antonio Ramírez Pastrán por toda la ayuda y asesoría, especialmente en la temática CFD y el desarrollo de simulaciones donde nos brindó herramientas sin la cual este proyecto habría requerido de un periodo más largo.

Al ingeniero Oscar Mauricio Ochoa Álvarez quien dedicó parte de su tiempo a la revisión de nuestro progreso en el proyecto brindándonos consejos en el tratamiento de los flujos dentro del software de CFD.

Especial gratitud hacia nosotros mismos por el arduo trabajo que se realizó y del cual podemos decir que estamos orgullosos de los resultados. Por la búsqueda de soluciones tanto de aspectos del proyecto como de diferencias de opinión y organización.

TABLA DE CONTENIDOS

OBJETIVOS DEL PROYECTO	11
1.1 OBJETIVO GENERAL	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES DEL PROYECTO	12
1.3 MATERIAL PARTICULADO	12
1.4 EFECTOS EN LA SALUD DE LAS PERSONAS	12
1.5 NORMAS Y REGLAMENTACIÓN.....	13
1.5.1 REGLAMENTACIÓN EURO.....	13
1.5.2 REGLAMENTACIÓN LOCAL	14
CAPÍTULO 2 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL Y COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE	15
2.1 INTRODUCCIÓN	15
2.2 FUNCIONAMIENTO Y COMBUSTION DEL MOTOR DIESEL	15
2.3 GASES DE ESCAPE DEL MOTOR DIESEL	16
CAPÍTULO 3 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS DE FLUJOS	17
3.1 INTRODUCCIÓN	17
3.2 PRESIÓN ESTÁTICA, DINÁMICA Y DE ESTANCAMIENTO	17
3.3 VELOCIDAD DEL SONIDO Y NÚMERO DE MACH	18
3.4 FLUJO COMPRESIBLE, INCOMPRESIBLE Y APROXIMACIONES	19
3.5 CAÍDA DE PRESIÓN EN EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN SÚBITA	19
3.6 CONTRAPRESIÓN.....	20
CAPÍTULO 4	21
4.1 INTRODUCCIÓN	21
4.2 ESTUDIO DE LOS FACTORES ELÉCTRICOS Y EFICIENCIA	21
4.3 USO DE MÉTODOS DE ELEMENTOS Y VOLÚMENES FINITOS	22
4.4 DATOS EXTRAIDOS.....	24
CAPÍTULO 5	25
FUNCIONAMIENTO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	25
5.1 INTRODUCCIÓN	25
5.2 EFECTO CORONA.....	25
5.2.1 TIPOS DE CORONA.....	25
5.3 MECANISMOS DE CARGA DE PARTÍCULAS.....	27

5.3.1	CARGA DE CAMPO ELÉCTRICO	27
5.3.2	CARGA DE DIFUSIÓN.....	27
5.4	MIGRACIÓN DE LAS PARTÍCULAS	27
5.5	EFICIENCIA DE COLECCIÓN DEL FILTRO.....	28
5.6	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	30
CAPÍTULO 6 SIMULACIÓN DE CIRCUITO ELÉCTRICO EN MATLAB.....		31
6.1	INTRODUCCIÓN	31
6.2	VOLTAJE REQUERIDO SEGÚN PUNTO DE OPERACIÓN	31
6.2.1	OBTENCIÓN DEL VOLTAJE EN PRECIPITADORES.....	31
6.2.2	CÁLCULO DEL VOLTAJE REQUERIDO.....	32
6.3	CIRCUITO POR DESARROLLAR	32
6.3.1	CIRCUITO DE ALTO VOLTAJE	33
6.3.2	ELEMENTOS DEL CIRCUITO	33
6.3.3	MONTAJE DEL CIRCUITO	37
6.4	RESULTADOS.....	38
6.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	39
CAPÍTULO 7 PROTOTIPO VIRTUAL DEL FILTRO DE PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA		40
7.1	INTRODUCCIÓN	40
7.2	PROTIPO CAD.....	40
7.2.1	PARÁMETROS PREVIOS AL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA	40
7.2.2	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA	41
7.2.3	MODELAMIENTO DEL FILTRO	43
7.3	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	45
CAPÍTULO 8 ALISTAMIENTO Y CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA SIMULACIÓN EN ANSYS		46
8.1	INTRODUCCIÓN	46
8.2	SISTEMA DE ANÁLISIS	46
8.3	OBTENCIÓN DEL VOLUMEN DE CONTROL.....	47
8.4	CREACIÓN DE LA MALLA.....	48
8.4.1	MÉTODO.....	49
8.4.2	DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS.....	49
8.4.3	CAPAS LÍMITE	50
8.4.4	MALLA GENERADA.....	51
8.4.5	NOMBRAMIENTO DE LÍMITES.....	52

8.5	PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE FLUENT.....	53
8.5.1	SOLUCIONADOR	53
8.5.2	MODELO.....	55
8.5.3	MATERIAL	56
8.5.4	CONDICIONES DE FRONTERA	57
8.5.5	MÉTODO DE SOLUCIÓN	60
8.5.6	CRITERIOS DE CONVERGENCIA E ITERACIONES.....	61
8.6	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	62
CAPÍTULO 9	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CON DISEÑO PROPUESTO	64
9.1	INTRODUCCIÓN	64
9.2	VARIABLES Y COMPORTAMIENTO ESPERADO	64
9.2.1	VARIABLES DE ANÁLISIS.....	64
9.2.2	COMPORTAMIENTO ESPERADO	64
9.3	ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA.....	65
9.3.1	MALLAS CREADAS.....	66
9.3.2	DATOS DE ENTRADA	66
9.3.3	RESULTADOS DEL ESTUDIO.....	67
9.3.4	SELECCIÓN DE LA MALLA.....	68
9.4	SIMULACIÓN CON MALLA SELECCIONADA	69
9.4.1	DESARROLLO	69
9.4.2	RESULTADOS.....	71
9.5	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	74
CAPÍTULO 10	COMPROBACIÓN DE SUPOCIONES HECHAS PARA LA	
SIMULACIÓN	75	
10.1	INTRODUCCIÓN	75
10.2	TRATAMIENTO CON GASES DE ESCAPE COMO FLUIDO	75
10.2.1	COMPOSICIÓN DE GASES DENTRO DE ANSYS.....	75
10.2.2	COMPARACIÓN. GASES VS AIRE.	78
10.3	DESPRECIACIÓN DE FLUJO MÁSIKO RECOLECTADO	79
10.3.1	FLUJOS MÁSIKOS.....	80
10.3.2	RESULTADOS.....	80
10.4	CONDICIONES DE OPERACIÓN A DIFERENTE ALTURA.....	81
10.5	CONDICIONES OPTIMAS PARA EL FLUJO.....	82
10.6	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	84
10.7	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	86

CONCLUSIONES.....	88
RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Composición de gases de escape.....	16
Figura 3.1 Expansión y contracción súbita.....	19
Figura 5.1 Selección de fuente de voltaje.....	34
Figura 5.2 Selección de transformador.....	34
Figura 5.3 Parámetros del transformador lineal.....	35
Figura 5.4 Transformador lineal.....	35
Figura 5.5 Selección de rectificador.....	36
Figura 5.6 Parámetros del rectificador.....	36
Figura 5.7 Elementos de simulación y visualización.....	37
Figura 5.8 Montaje del circuito.....	37
Figura 5.9 Circuito al finalizar la simulación.....	38
Figura 5.10 Gráfica Voltaje (V) vs Tiempo (s).....	38
Figura 6.1 Primer prototipo de carcasa diseñado.....	43
Figura 6.2 Orificios de descarga de las partículas en los tubos de admisión.....	43
Figura 6.3 Zona de admisión del filtro rediseñado.....	44
Figura 6.4 Medidas principales de la carcasa del filtro.....	44
Figura 7.1 Plataforma Workbench con cuadro del módulo Fluent.....	46
Figura 7.2 Volumen de control – Diseño inicial.....	47
Figura 7.3 Entorno de plataforma Meshing de ANSYS.....	48
Figura 7.4 Árbol de opciones en Meshing.....	48
Figura 7.5 Inserción de método a la malla.....	49
Figura 7.6 Detalle y configuración de método.....	49
Figura 7.7 Inserción de Sizing.....	50
Figura 7.8 Detalle y configuración de Body Sizing.....	50
Figura 7.9 Detalle y configuración de Face Sizing.....	50
Figura 7.11 Detalles y selección de caras y cuerpo para Inflation.....	51
Figura 7.12 Malla generada.....	51
Figura 7.13 Información de la malla generada.....	52
Figura 7.14 Nombramiento de límites.....	52
Figura 7.15 Entorno del solucionador Fluent.....	53
Figura 7.16 Página de tareas de la opción General.....	54
Figura 7.17 Modelos disponibles para la simulación.....	55
Figura 7.18 Modelos de turbulencia aplicables – Configuración de k-epsilon.....	56
Figura 7.19 Materiales disponibles.....	56
Figura 7.20 Edición de material.....	57
Figura 7.21 Casillas para configuración de condiciones de operación y de frontera.....	57
Figura 7.22 Condiciones de operación.....	58
Figura 7.23 Sustancia en el volumen de control - selección.....	58
Figura 7.24 Condiciones de entrada.....	58
Figura 7.25 Condiciones de salida.....	59
Figura 7.26 Condición de no deslizamiento en los muros.....	60
Figura 7.27 Métodos de solución.....	60
Figura 7.28 Criterios absolutos de convergencia.....	61
Figura 7.29 Inicio de la simulación.....	62

Figura 7.30 Ejemplo de residuales.....	62
Figura 8.1 Comportamiento esperado de presión y velocidad.....	65
Figura 8.2 Línea media para observación de variación de magnitudes.	67
Figura 8.3 Presión en línea media sobre diferentes mallas.	67
Figura 8.4 Presión y velocidad en línea media - simulación con malla seleccionada.	71
Figura 8.5 Líneas en entrada y salida para medición.....	71
Figura 8.6 Velocidad y densidad en línea media	72
Figura 8.7 Flujo másico de entrada y salida.	73
Figura 8.8 Velocidad de flujo y velocidad del sonido - Malla seleccionada.	73
Figura 9.1 Activación de transporte de especies dentro de Fluent.	76
Figura 9.2 Recuadro de creación y edición de materiales.	76
Figura 9.3 Selección de materiales por añadir.	76
Figura 9.4 Adición de sustancias a las especies seleccionadas.....	77
Figura 9.5 Selección de mezcla como material.	78
Figura 9.6 Fracción de cada compuesto para gases como fluido.....	78
Figura 9.7 Variación de presión en línea media. Gases vs aire.	78
Figura 9.8 Variación de presión con diferentes velocidades de entrada.....	80
Figura 9.9 Variación de presión a alturas diferentes.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Historia y niveles de estándares Euro para automóviles.....	14
Tabla 4.1 Datos de estudios de eficiencia en recolección con ESP.....	24
Tabla 4.2 Datos de estudios de flujo dentro de ESP.....	24
Tabla 6.1. Datos para el cálculo del voltaje.....	32
Tabla 7.1 Especificaciones del vehículo seleccionado para el análisis del filtro.....	40
Tabla 7.2 Análisis de velocidad de salida y del caudal.....	41
Tabla 7.3 Parámetros iniciales para el cálculo de la eficiencia del filtro.....	41
Tabla 9.1 Número de elementos de las mallas a tratar.....	66
Tabla 9.2 Datos de entrada para estudio de independencia de malla.....	66
Tabla 9.3 Presiones entrada, salida y diferencia de presión.....	68
Tabla 9.4 Errores calculados entre mallas.....	68
Tabla 9.5 Errores entre mallas - modificación.....	69
Tabla 9.6 Datos para simulación con malla seleccionada.....	69
Tabla 9.7 Diámetros y número de tubos.....	70
Tabla 9.8 Presiones en los límites.....	72
Tabla 10.1 Tipos de carbón provistos por Fluent.....	77
Tabla 10.2 Diferencias de presión. Gases - aire.....	79
Tabla 10.3 Velocidades y flujos de casos a tratar.....	80
Tabla 10.4 Resultados obtenidos al hacer el análisis a diferentes alturas.....	81
Tabla 10.5 Condiciones para desarrollo óptimo del flujo.....	83
Tabla 10.6 Eficiencia en recolección con ESP. Estudios previos vs resultados del proyecto.....	84
Tabla 10.7 Comportamiento de flujo en ESP. Estudios previos vs resultados del proyecto.....	84
Tabla 10.8 Resumen de comparación del modelo propuesto.....	86

INTRODUCCIÓN

Desde que empezó la revolución industrial en el año 1820, la población mundial ha experimentado los efectos de la contaminación del aire a causa de los combustibles fósiles. Año tras año los índices de calidad del aire que se respira han decaído debido a la quema de combustibles fósiles que generan gases y partículas dañinas para la salud, esto se refleja en enfermedades respiratorias que representa más 7 millones de muertes prematuras al año tal y como lo establece la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el último informe sobre calidad del aire [1].

Según la OMS (año), los automotores contribuyen entre 45% y 75% de la contaminación atmosférica [2], además, los vehículos que trabajan con diésel son aún más dañinos, aportando un 85% del material contaminante. Por esto, países como Estados Unidos, comenzaron a tomar medidas a partir de 1960, asimismo, en 1988 se establece la reglamentación EURO para vehículos que trabajan con diésel, donde se limitó la cantidad de emisiones dañinas que se liberan a la atmósfera.

En países como Colombia, se cree que durante los últimos 20 años no ha habido una buena regulación de las emisiones de este tipo de motores. Por lo tanto, en busca de generar control y regulación ante estos impactos ambientales, los Ministerios de Minas y Energía, y de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establecen las resoluciones 1180 de 2006 y 90963 de 2014, junto con la normativa ya existente, EURO, en donde limitan la cantidad de partículas por millón producidas por automotores Diesel [2].

Los fabricantes de automóviles han optado por disminuir la emisión de gases nocivos para la salud a través de la producción de nuevos motores mejorados y más eficientes. Sin embargo, no se evidencian avances tecnológicos que realmente se ocupen de la problemática ambiental. Es entonces que las investigaciones se orientan hacia los filtros de precipitación electrostática (ESP), enfocados en la disminución de agentes contaminantes. Los estudios han demostrado con éxito que los ESP disminuyen en gran escala dichos agentes contaminantes, por lo cual esta tesis explorará la validez de un filtro para vehículos que trabajan a diésel y su posible implementación.

A partir de esto se realizará a lo largo de este proyecto una revisión del funcionamiento de los ESP con el fin de establecer un prototipo de precipitador que sea aplicable a los vehículos de carga con enfoque en los requerimientos y en el comportamiento del flujo de gases a través de este.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Simular un filtro de precipitación electrostática (FPE), por medio de simulaciones eléctricas en MATLAB y simulaciones de fluidos en ANSYS, para los gases de escape de los motores Diesel empleados en el sector automotriz.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar el principio de precipitación electrostática mediante la investigación de la literatura correspondiente para entender el concepto básico del funcionamiento del filtro.
- Determinar el requerimiento de alto voltaje de un precipitador electrostático mediante la simulación de un circuito apropiado en Matlab – Simulink para obtener la base electrónica necesaria para desarrollar el filtro.
- Realizar un prototipo virtual previo del filtro basado en los requerimientos eléctricos para la obtención de un modelo digital del mismo.
- Analizar el flujo de fluido del modelo de precipitación electrostática usando el programa ANSYS para optimizar el flujo y evitar la contrapresión en el motor.
- Revisar el diseño del filtro basándose en los requerimientos eléctricos y la optimización del flujo del fluido para obtener el prototipo virtual final del filtro de precipitación electrostática.

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.3 MATERIAL PARTICULADO

El material particulado que está en la atmósfera presenta diferentes composiciones físicas y químicas dependiendo de la fuente que lo emite, y también, del tamaño que este presenta. Las partículas pueden ser líquidas o sólidas, tener distintas formas y poseer una mezcla interna de compuestos tales como nitratos, sulfatos, metales, carbono elemental, compuestos orgánicos y biológicos, o pueden estar formadas completamente por un solo compuesto químico [3].

Este se clasifica en tres grupos según su tamaño, primero las partículas que presentan un tamaño superior a 10 micrómetros, segundo las partículas de tamaño igual o inferior a 10 micras, las cuales se conocen como PM10, y por último aquellas que tienen un tamaño inferior a 2.5 micras, estas se conocen como PM2.5 [4].

Para esta investigación se tendrán en cuenta las partículas PM2.5, puesto que representan un alto índice de contaminación urbana debido a su tamaño. Estas partículas tienen la capacidad de penetrar los pulmones de los seres vivos y llegar al torrente sanguíneo, causando serios problemas de salud a corto y largo plazo [4].

En Colombia, los automotores producen en mayor medida estas partículas PM2.5, y según el IDEAM, estas se asocian a 10,527 muertes y 67.8 millones de síntomas y enfermedades. Los vehículos pesados que utilizan diésel como combustible son los responsables de estas estadísticas, así como la falta de regulaciones en las emisiones de este tipo de vehículos. Por esto en países que están en vía de desarrollo, es necesario encontrar soluciones de tipo no legislativas al problema del material particulado y así, mejorar la salud de las personas y la calidad del aire.

1.4 EFECTOS EN LA SALUD DE LAS PERSONAS

El material particulado PM2.5, está compuesto de partículas inhalables suficientemente pequeñas capaces de penetrar el tórax llegando a la región del sistema respiratorio [5]. Estos efectos están bien documentados y se deben principalmente a la exposición tanto a corto plazo (horas, días y semanas), como largo plazo (meses y años), incluyendo: morbilidad respiratoria y cardiovascular como agravamiento del asma en personas que lo tienen presente, síntomas respiratorios y así mismo un incremento en los ingresos hospitalarios. Y adicionalmente, mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y también a causa del cáncer de pulmón [5].

Por todas las causas, se estima que diariamente la mortalidad aumentará en un 0.2-0.6% [6], [7], y también a largo plazo la exposición a PM2.5 se asocia con un incremento en la mortalidad cardiopulmonar en un 6-13% anual, tal y como se establece en el último análisis realizado del material particulado de la OMS [5].

Personas susceptibles a enfermedades pulmonares o cardíacas preexistentes, así como personas mayores y niños, son particularmente más vulnerables. Por ejemplo, la exposición a PM afecta el desarrollo pulmonar en los niños, generando fallas irreversibles en la función pulmonar, también afecta el crecimiento de estos causando problemas a largo plazo [8]. Aún no hay evidencia de que exista un nivel seguro de exposición o un umbral por debajo del cual no se producen efectos adversos para la salud, y peor aún, esta exposición es involuntaria, lo que aumenta la importancia de este determinante de la salud.

En la actualidad no hay evidencia suficiente para identificar diferencias en los efectos de partículas con diferentes composiciones o de las diferentes fuentes [9]. Sin embargo, cabe señalar que hay evidencia que la naturaleza peligrosa de las PM relacionadas con la combustión (tanto de fuentes móviles como estacionarias) es más consistente que la de las PM de otras fuentes [10]. El porcentaje de carbono negro de PM_{2.5} que resulta de una combustión incompleta, ha atraído la atención de todas las comunidades, ya que hay una relación entre la baja calidad del aire, a causa de lo anterior, y los efectos perjudiciales en la salud de las personas [11].

Muchos componentes de PM unidos al carbono negro se consideran actualmente responsables de los efectos sobre la salud, como lo son los compuestos orgánicos como HAP, que son carcinógenos conocidos y directamente tóxicos para las células, así como metales y sales inorgánicas [12]. Recientemente la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, clasificó los gases de escape de los motores diésel (que consisten principalmente en partículas) como cancerígenos (Grupo 1) para los humanos [13].

1.5 NORMAS Y REGLAMENTACIÓN

1.5.1 REGLAMENTACIÓN EURO

Los automóviles y vehículos comerciales vendidos en Europa están sujetos a límites estrictos en la emisión de contaminantes del tubo de escape y de otras fuentes en el vehículo, por ejemplo, emisiones de evaporación del sistema de combustible. Estos son conocidos como estándares Euro, los cuales se introdujeron en 1991 con Euro 0 para automóviles de pasajeros, y en 1992 con Euro I para vehículos comerciales [14]. Cabe aclarar que existían estándares de emisión antes de Euro 0, pero esto se tomó como el punto de partida para las referencias estándar de Euro.

La innovación ha ayudado a cumplir con los estándares de emisiones cada vez más estrictos a medida que se desarrolla la legislación. Las tecnologías como la sincronización variable de las válvulas, la inyección directa de combustible y los sistemas mejorados y altamente sofisticados de gestión del motor, han jugado un papel importante para poder cumplir con los límites y estándares establecidos [14]. También, los sistemas de tratamientos de gases en el escape han ayudado a cumplir con estas legislaciones.

Todos los automóviles y camiones vendidos en la Unión Europea que trabajan con diésel y son nuevos, ahora están equipados con filtros de partículas para cumplir con los nuevos y exigentes estándares Euro 6/5. Muchos vehículos comerciales también usan la reducción catalítica selectiva (SCR) en combinación con un aditivo a base de urea para ayudar a reducir las emisiones de NO_x. La tecnología SCR está apareciendo en los automóviles diésel más grandes para Euro 6, pero los fabricantes de vehículos también adoptarán otras tecnologías reductoras de NO_x, y se apoyan en los catalizadores.

A continuación, en la Tabla , se muestra información acerca de la historia y los niveles de los estándares EURO.

Fechas de introducción			Gasolina		Diesel		Gasolina y Diesel
Estándar Euro	Nuevas aprobaciones	Todos los nuevos registros	NO _x (g/km)	Masa de partícula (g/km)	NO _x (g/km)	Masa de partícula (g/km)	Número de partículas ultrafinas por km
Euro 1	1/07/1992	31/12/1992	0.97	-	0.97	0.14	-
Euro 2	1/01/1996	1/01/1997	0.5	-	0.9	0.1	-
Euro 3	1/01/2000	1/01/2001	0.15	-	0.5	0.05	-
Euro 4	1/01/2005	1/01/2006	0.08	-	0.25	0.025	-
Euro 5	1/09/2009	1/01/2011	0.06	0.0045	0.18	0.0045	6 × 10 ¹¹
Euro 6	1/09/2014	1/09/2015	0.06	0.0045	0.08	0.0045	6 × 10 ¹¹

Tabla 1.1 Historia y niveles de estándares Euro para automóviles.

Fuente: Adaptado de *Industry topics: Euro Standards* [14]

1.5.2 REGLAMENTACIÓN LOCAL

En Colombia, se emitió en 2019 una ley en la que establecen medidas concretas para la regulación en la emisión de gases y partículas contaminantes emitidas por vehículos que funcionan con diésel, y para motos de cualquier cilindraje. Para que esta ley se cumpla, se determinó que el Ministerio de Minas y Energía, debe garantizar “producción, importación, almacenamiento, adición y calidad en la distribución de combustibles necesarios para cumplir con los estándares de emisión definidos en la presente Ley”, según se establece en la página de la presidencia de Colombia [15].

Esta ley se debe regir bajo las siguientes condiciones, la primera es que, a partir del primero de enero del año 2023, la cantidad de azufre en el combustible debe estar entre 15 y 10 partes por millón (ppm), y a partir del año 2025, deberán ser menores a 10 ppm. Estos niveles, están basados en la norma Euro 6, la cual entró en vigor en el año 2015 y establece los límites en cantidad de las diferentes sustancias dentro de los gases de escape [15].

Dentro de la ley se determina que los Ministerios de Ambiente y de Transporte, tienen que hacer un reglamento en el que se obligue a los vehículos diésel a tener un dispositivo que permita controlar si el vehículo está por encima del límite permitido de emisiones o no, llamado Sistema de Autodiagnóstico a Bordo (OBD) [15]. Además, se reglamentará un mecanismo de verificación en el cual se revise el cumplimiento de los límites permisibles en la emisión de gases en todo el territorio nacional.

Por último, la ley no solo aplica a vehículos particulares o de carga pesada, aplica también para todos los vehículos de transporte público usados en las ciudades. Para este caso se establece que, para el primero de enero del año 2030, todos los sistemas integrados y estratégicos de transporte público y regional, deben contar con un mínimo del 20% del total de la flota con tecnología de cero emisiones [15]. Así, se puede garantizar la mejora en la salud ambiental y de las personas en todas las diferentes regiones del país.

CAPÍTULO 2

FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL Y COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE

2.1 INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de los motores diésel, junto con la combustión y los gases de escape producto de la combustión del diésel, se examinan en este capítulo. Esto se hace para entender y conocer mejor cómo trabaja este tipo de motores y según este funcionamiento, cuál es la composición de los gases de escape y cuál es el porcentaje del material particulado presente en este, ya que, con relación a la investigación del proyecto, es importante conocer estos valores y saber cuánto de este será posible recoger y evitar que salgan a la atmósfera.

2.2 FUNCIONAMIENTO Y COMBUSTION DEL MOTOR DIESEL

En los motores de gasolina, una mezcla de combustible y aire se comprime durante la carrera de compresión, y las relaciones de compresión están limitadas por la posibilidad de autoignición o golpe del motor. En los motores diésel (CI), solo el aire se comprime durante la carrera de compresión, eliminando esa posibilidad [16]. La eficiencia del ciclo aumenta con valores más altos de relación de compresión, y el límite mecánico es impuesto por las altas presiones dentro de los cilindros, siendo este un factor que afecta la relación potencia/peso. El rango normal de las relaciones de compresión es de 13/1 a 17/1, pero puede ser de hasta 25/1 [17].

Las características de un proceso de combustión del motor de encendido por compresión son las siguientes. El sistema de inyección de combustible inyecta combustible en el cilindro del motor hacia el final de la carrera de compresión, justo antes del inicio deseado de la combustión. El combustible líquido, generalmente inyectado a alta velocidad como uno o más chorros a través de pequeños orificios o boquillas en la punta del inyector, se atomiza en pequeñas gotas y penetra en la cámara de combustión. El combustible se vaporiza y se mezcla con el aire del cilindro a alta presión y temperatura. Dado que la temperatura y la presión del aire están por encima del punto de ignición del combustible, se produce una ignición espontánea de porciones del combustible y el aire ya mezclados, después de un período de retraso de solo unos pocos grados de ángulo del cigüeñal. La presión del cilindro aumenta a medida que se produce la combustión de la mezcla de combustible y aire [18].

La consiguiente compresión de la parte no quemada de la carga acorta el retraso antes de la ignición del combustible y el aire, que se ha mezclado dentro de los límites de combustible que se quema rápidamente, también reduce el tiempo de evaporación del combustible líquido restante. La inyección continúa hasta que la cantidad deseada de combustible ha ingresado al cilindro. La atomización, la vaporización, la mezcla de aire y combustible y la combustión continúan hasta que todo el combustible haya pasado por cada proceso. Además, la mezcla del aire que queda en el cilindro, junto con gases ardientes y ya quemados, continúa durante los procesos de combustión y expansión [18].

Un punto importante es que a medida que aumenta la cantidad de combustible inyectado por ciclo, los problemas con la utilización del aire durante la combustión conducen a la formación de cantidades excesivas de hollín que no se pueden quemar antes del escape [18]. Las mediciones en el cilindro muestran que el combustible se pulveriza para producir un chorro que forma una llama de difusión turbulenta parcialmente premezclada, y se ha encontrado que la formación de hollín

depende en gran medida del arrastre de aire en la porción elevada del chorro, así como del oxígeno en el combustible y, en menor grado, de la composición y estructura de los hidrocarburos en el combustible.

2.3 GASES DE ESCAPE DEL MOTOR DIESEL

El carbono y el hidrógeno construyen el origen del combustible diésel como la mayoría de los combustibles fósiles. Para un equilibrio termodinámico ideal, la combustión completa de combustible diésel solo generaría CO_2 y H_2O en las cámaras de combustión del motor [19]. Sin embargo, muchas razones (la relación aire-combustible, el tiempo de ignición, la turbulencia en la cámara de combustión, la forma de combustión, la concentración de aire-combustible, la temperatura de combustión, etc.) hacen que esto sea cuestionable, y se generan varios productos nocivos durante la combustión. Los productos nocivos más importantes son CO , HC , NO_x y PM .

La Figura 2.1 muestra la composición aproximada de los gases de escape diésel [20]. Las emisiones contaminantes tienen una tasa de menos del 1% en el gas de escape diésel. Dentro de este, el NO_x tiene la mayor proporción de emisiones de contaminantes diésel con una tasa de más del 50%. Después de las emisiones de NO_x , el material particulado (PM), tiene la segunda mayor proporción en emisiones contaminantes. Además, las emisiones contaminantes incluyen un mínimo de SO_2 dependiendo de las especificaciones y la calidad del combustible, el cual es producido por los sulfatos contenidos en el combustible diésel. Por el momento, no existe ningún sistema de postratamiento como un convertidor catalítico para eliminar el SO_2 . Hoy en día, la mayoría de los distribuidores y clientes de petróleo prefieren el diésel ultra bajo en azufre (ULSD) para motores diésel para evitar el efecto nocivo del SO_2 .

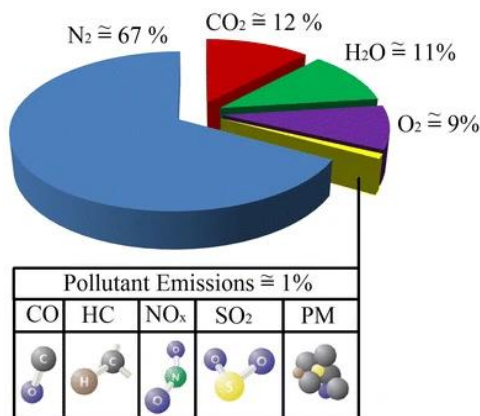


Figura 2.1 Composición de gases de escape.

Fuente: *Emissions from Diesel Engine and Exhaust After Treatment Technologies*. Azam, A; Ali, S; Lqbal, A. [21]

Los porcentajes se basan en una mezcla estequiométrica. En caso de que se utilice una mezcla rica o pobre estos pueden presentar variaciones. Se entiende como mezcla rica una que tiene exceso de combustible o falta de aire, y mezcla pobre aquella que contiene menos combustible o exceso de aire. La mezcla estequiométrica que se establece para combustión perfecta tiene una relación de 14.7/1 en gramos de aire por gramos de combustible.

CAPÍTULO 3 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL ANÁLISIS DE FLUJOS

3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis y los parámetros que se establecerán posteriormente en el software ANSYS para el desarrollo de la simulación del flujo en el precipitador se determinan teniendo en cuenta la aplicación de conceptos de la mecánica de fluidos. Debido a esto, se explica en este capítulo algunos de los conceptos más importantes para tener en cuenta en el entendimiento de la formulación y selección de los modelos y parámetros que se tendrán en cuenta en el software. Se realiza una explicación sobre los distintos términos de presión que se usan en las ecuaciones que describen el comportamiento de flujos; la influencia de la velocidad del flujo, su relación con la velocidad del sonido, y el cómo esta nos permite caracterizar el flujo; el fenómeno de expansión y contracción súbita; y por último una explicación del término contrapresión usado en diversos campos donde se emplean sistemas que funcionan a través de flujos.

3.2 PRESIÓN ESTÁTICA, DINÁMICA Y DE ESTANCAMIENTO

Cuando se requiere analizar volúmenes de control, como lo es en el caso de este proyecto, ya que se está analizando un flujo, resulta muy conveniente utilizar el término de punto o estado de estancamiento. En este estado a las propiedades que posee el fluido se les llama **propiedades de estancamiento**, y surgen de la combinación de las propiedades que tiene el fluido cuando se encuentra en un estado estático, y el delta que se produce de estas mismas propiedades cuando este se encuentra en movimiento, con una velocidad lo suficientemente alta como para no poder despreciar el cambio generado.

Para entender estos términos respecto a la presión, partimos de la ecuación de Bernoulli expresada entre dos puntos cualesquiera para un flujo estacionario e incompresible

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{Constante (a lo largo de una línea)} \quad (3-1)$$

Esta ecuación que la suma de las energías permanece constante. Estas energías pueden representarse en forma de presión para que se haga mucho más visible el fenómeno, multiplicando cada término por la densidad.

$$P + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gz = \text{constante} \quad (3-2)$$

Así cada término se expresa con unidades de presión y cada uno representa, o se puede nombrar como, un tipo de presión.

- P es conocida como **presión estática**, es decir, no incluye efectos dinámicos. Esta representa la presión termodinámica del fluido, a la que se encontraría este si no estuviera en movimiento, y es la misma que se usa en termodinámica y tablas de propiedades.
- $\rho V^2/2$ es la **presión dinámica**. Representa el aumento de presión generado cuando el fluido se encuentra en movimiento y se detiene de manera isentrópica
- ρgz es la **presión hidrostática**. En sentido real, esta no es una presión ya que depende de un nivel de referencia, es decir, si para un flujo recto, se toma la línea media como el nivel

de referencia, entonces esta sería cero. Explica los efectos del peso del fluido sobre la presión.

- Se le conoce como **presión total** a la suma de estas tres presiones, estática, dinámica e hidrostática. Mientras que, a la suma de la presión estática y dinámica, se le denomina **presión de estancamiento** [22, p. 189].

$$P_{est} = P + \frac{\rho V^2}{2} \quad (3-3)$$

Esto representa que la presión de estancamiento es la presión que se genera en un punto donde el fluido se detiene totalmente de manera isentrópica. Si por ejemplo en una tubería se tiene una reducción de diámetro súbita, los muros perpendiculares a la dirección del flujo en el punto en el que el diámetro es reducido tendrán que soportar una presión mayor, generada justamente por el fluido detenido en esos puntos.

Si se tuvieran en cuenta las pérdidas de energía, se estaría hablando de la ecuación general de la energía, que normalmente se expresa con términos de gravedad específica (γ) en lugar de densidad.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_a - h_r - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (3-4)$$

Acá no solo se tienen en cuenta pérdidas, sino además la energía que se agrega al flujo a través de bombas o compresores [23, pp. 155-158].

3.3 VELOCIDAD DEL SONIDO Y NÚMERO DE MACH

En el estudio de flujos compresibles un parámetro importante es la **velocidad del sonido**, que se puede entender como la velocidad a la que una onda infinitamente pequeña viaja a través de un medio. En este caso se entendería el fluido que se está analizando como el medio en el que viajaría la onda. La onda de presión puede ser provocada por un pequeño disturbio, el cual genera un pequeño incremento en la presión local.

Sin entrar en detalles acerca de la obtención y demostración, la velocidad del sonido en un fluido compresible, tratado como gas ideal, se expresa como:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (3-5)$$

Donde c es la velocidad del sonido, k es la razón de calores específicos del fluido, R la constante del gas, y T es la temperatura a la que este se encuentra. Acá se nota que la velocidad del sonido es únicamente función de la temperatura, ya que los calores específicos varían también en función de esta.

Así mismo, existe un segundo parámetro importante para el análisis de flujos con fluidos compresibles, **el número de Mach** (Ma). Este establece la relación entre la velocidad real del fluido, o de un objeto moviéndose a través de dicho fluido en reposo, y la velocidad del sonido en el mismo fluido en el mismo estado [24, pp. 851-852].

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (3-6)$$

Donde V es la velocidad del fluido, o del objeto que se mueve a través de él.

Se puede notar que el número de Mach depende de la velocidad del sonido y esta a su vez del estado del fluido. Esto quiere decir que, aún con velocidad constante, el número de Mach puede variar si la temperatura del fluido varía entre un punto y otro [24, pp. 851-852].

3.4 FLUJO COMPRESIBLE, INCOMPRESIBLE Y APROXIMACIONES

La clasificación de un flujo como compresible o incompresible dependerá de la variación de densidad que se presente en el fluido durante el flujo. En los estudios y análisis de flujos, la característica de flujo incompresible es solo una aproximación, en la cual la densidad permanece aproximadamente constante sobre el curso del movimiento.

Cuando se trata de flujos con líquidos se puede asumir que siempre son incompresibles, ya que su densidad tiene variaciones despreciables a menos que las presiones sean muy altas, normalmente mayores a 5 MPa. Para tener una idea, el agua líquida a una presión de 210 atm varía su densidad solo 1% respecto a su valor a una presión de 1 atm. A menos que se desee tener un grado muy alto de exactitud, se asume que son incompresibles.

Por otro lado, cuando se analizan sistemas en los que intervienen flujos de gas a altas velocidades, se suele tener el número de Mach como referencia para determinar si el flujo puede ser tratado como incompresible. Si los cambios de densidad en el gas están por debajo del 5%, se pueden aproximar como incompresibles. Esta condición se cumple normalmente cuando $Ma < 0.3$ [22]. Esto quiere decir que, si la velocidad del gas es menor al 30% de la velocidad del sonido en el mismo flujo, se puede asumir como incompresible.

Esta condición es fundamental a la hora de definir los modelos matemáticos con los cuales se analizará el sistema, ya que, si los cambios de densidad son representativos, estos no podrán ser tenidos en cuenta como una función que depende de la presión.

3.5 CAÍDA DE PRESIÓN EN EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN SÚBITA

Cuando un flujo, en un canal cerrado de sección transversal circular, fluye de una tubería con un determinado diámetro hacia una con un diámetro mayor a través de una ampliación repentina, se considera que hay una expansión súbita. Ver Figura 3.1. En este caso ocurre un decrecimiento violento en la velocidad, lo cual causa turbulencia y se generan pérdidas de energía [25, pp. 180-182]. Si se analiza la energía en forma de presión, esto representa una caída de presión.

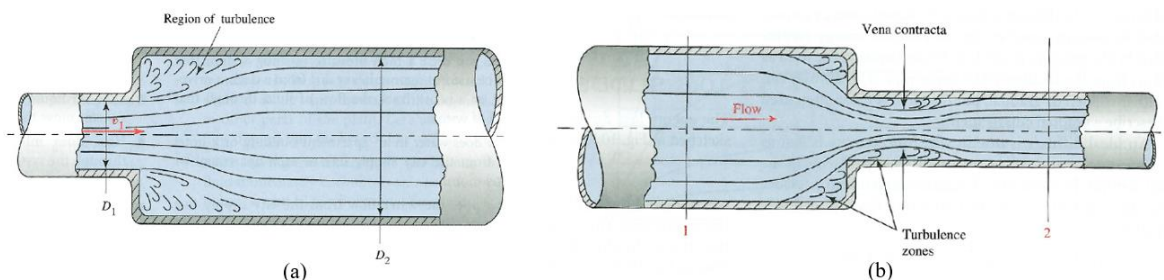


Figura 3.1 Expansión y contracción súbita. (a) expansión, (b) contracción.

Fuente: Adaptado de *Applied Fluid Mechanics* [26]

De forma similar ocurre con la contracción súbita, pero a diferencia de la expansión, en este caso se genera turbulencia en las dos secciones, es decir, antes y después de la contracción. En el caso de la expansión, solo se genera turbulencia en la zona con mayor diámetro.

En la formulación de los modelos matemáticos que describen el comportamiento de flujos, estos fenómenos son tenidos en cuenta a través de coeficientes de resistencia usados en los términos que tienen en cuenta las pérdidas menores en las ecuaciones que se formulan en dichos modelos [23, p. 228].

3.6 CONTRAPRESIÓN

La contrapresión en un flujo puede ser entendida como la resistencia a que un flujo a través de una tubería o canal se mueva en la dirección deseada, lo cual genera pérdidas por fricción y caídas de presión a través del sistema [27]. Este término puede ser engañoso, ya que se entiende que la presión es una cantidad escalar, es decir, no posee una dirección, a diferencia de la fuerza o la velocidad [28, pp. 15-16].

Supóngase una sección donde el fluido debe desplazarse de un punto A, hacia un punto B. El fluido dentro de un flujo tiende a moverse de la zona con mayor presión, hacia una zona con una presión más baja. Esto quiere decir que el punto A, punto de presión alta, debe tener una presión mayor a la del punto B, punto de presión baja. Si el punto B tiene una presión mayor a la que debería, o si el punto A tiene una presión más baja de la esperada, existe una reducción en la descarga. El caso más crítico es en el que el punto A resulta teniendo una presión menor a la del punto B, lo que causa un flujo en reversa.

CAPÍTULO 4 ESTADO DEL ARTE

4.1 INTRODUCCIÓN

Recientemente, varios estudios han sido llevados a cabo en los que se analiza la eficiencia y el funcionamiento de los precipitadores electrostáticos. La alta eficiencia de recolección de los filtros causa que estén reemplazando otros métodos de recolección de partículas usados en la industria. Además de esto, los controles y reglamentos cada vez más estrictos que se dan a través de las normas EURO, impulsan la investigación de los componentes de carga a través del efecto corona y la busca de la mejora continua. Por esto, en este capítulo se presentan algunos de los diferentes estudios realizados, los cuales serán usados posteriormente para realizar una comparativa.

4.2 ESTUDIO DE LOS FACTORES ELÉCTRICOS Y EFICIENCIA

Chiliquinga y Toro [29] realizan una investigación sobre los métodos de ionización de partículas de CO₂ para su recolección, mencionando la combinación difusión y efecto de campo, la ionización espacial y el efecto corona. En este estudio establecen la relación existente entre la intensidad del campo eléctrico con el método de ionización donde se realiza una propuesta de filtro electrostático debido a que trabaja con el efecto corona, el cual consideran el mejor método de ionización de los presentados y por lo tanto el que más eficiencia de recolección de partículas tendrá. Se establece que los ESP garantizan recolección con más del 90 % de eficiencia.

El precipitador electrostático propuesto en su estudio [29] es uno de forma tubular que trabaja con un voltaje aproximado de 12 kV en donde se logra una eficiencia de recolección de cerca del 99.9 %. Para este se tiene en cuenta el tamaño de partícula (0.5 μm), rendimiento según factor de caudal, tamaño del filtro y aspectos de eléctricos como voltaje y corriente. Esta propuesta se basa en aspectos netamente eléctricos y no se analiza el comportamiento del fluido dentro de este.

Para la segunda conferencia internacional de energía sostenible [30] se realizó una revisión de un ESP para material particulado de motores Diesel donde además del tamaño de la partícula y los factores eléctricos, se tiene en cuenta el tiempo de residencia de los gases en el ESP. En este estudio se discute la eficiencia de recolección a partir de la teoría sobre las propiedades eléctricas y la carga de partículas, se discuten además los efectos en la salud debido al PM según la composición de este. Acá se establece que el mayor componente del material particulado es el carbón representando cerca del 41 % de la composición. Su estudio recalca también el porcentaje de eficiencia logrado a través de los ESP, el cual supera el 99 %.

Debido a algunas consideraciones como el tamaño de las partículas y cómo la eficiencia se reduce en ciertos rangos, o por debajo de ciertos valores del tamaño de estas, Jaworek et al. [31] estudian una solución basada en un precipitador de dos etapas, el cual está diseñado para corregir algunas fallas del de una sola etapa. En este ESP de dos etapas la etapa de carga electrostática de las partículas y el proceso de precipitación han sido separados. Las partículas PM_{2.5}, es decir, con un tamaño inferior a 2.5 micrómetros, se cargan eléctricamente en un aparato separado (precargador) y luego precipitado en un colector de placas paralelas.

Los factores analizados muestran que los precipitadores de dos etapas resultan más eficientes que los convencionales pues permiten la precipitación de partículas más pequeñas con una mayor eficiencia. Así mismo existe una etapa previa de aglomeración, en donde lo que se busca es juntar

partículas de tamaños muy pequeños, hasta que estas posean un tamaño conjunto mayor a $5 \mu\text{m}$, con lo cual se pueden precipitar de una manera más sencilla, pues la eficiencia para esos tamaños es más grande. Hay varios factores para tener en cuenta, por un lado, en la construcción del precargador, la primera etapa, se debe maximizar la penetración de la partícula, es decir, que en esta etapa no se precipite, pues quedaría pegada a los alambres y no a las placas en la etapa posterior a esta, para lo cual se usan electrodos especiales.

más pequeñas con una mayor eficiencia. Así mismo existe una etapa previa de aglomeración, en donde lo que se busca es juntar partículas de tamaños muy pequeños, hasta que estas posean un tamaño conjunto mayor a $5 \mu\text{m}$, con lo cual se pueden precipitar de una manera más sencilla, pues la eficiencia para esos tamaños es más grande. Hay varios factores para tener en cuenta, por un lado, en la construcción del precargador, en la primera etapa se debe maximizar la penetración de la partícula, es decir, que en esta etapa no se precipite, pues quedaría pegada a los alambres y no a las placas en la etapa posterior a esta, para lo cual se usan electrodos especiales.

Respecto a la eficiencia de recolección, en un estudio sobre la reducción de PM usando ESP [32], se establece que la eficiencia de recolección disminuye debido al re-arrastre de partículas. A partir de esto desarrollan una investigación sobre los efectos de la configuración del electrodo en el rendimiento de la recolección usando precipitadores de una y dos etapas. En el estudio se tratan tamaños de partícula de entre 0.02 y $5 \mu\text{m}$ midiendo estas a través de escaneos con medidores de partículas en movimiento, dispositivos de conteo de partículas y microscopios medidores de electrones.

Establecen en su investigación pruebas de que el efecto de re-arrastre de partículas puede ser suprimido si se incrementan el número de electrodos de descarga en los EPS de una sola etapa, e incrementando la longitud de los electrodos recolectores en los de dos etapas. A partir de esto se establece un criterio de mejora que se puede implementar en diseños de precipitador con los cuales se evite el re-arrastre y se garantice la eficiencia.

Por último, Hayashi et al. [33] muestra que al realizar una combinación de un ESP con un filtro de partículas Diesel (DPF) convencional se pueden obtener eficiencias de más de 99% de recolección en una longitud de recolección corta, realizando pruebas computacionales con un modelo de filtro de 100 mm de longitud.

4.3 USO DE MÉTODOS DE ELEMENTOS Y VOLÚMENES FINITOS

En el desarrollo y análisis de los precipitadores usando el método de elementos finitos He y Mohan [34], desarrollan un modelo tridimensional donde se describe la carga del efecto corona y tiene en cuenta un nuevo aspecto, el comportamiento turbulento del flujo, a partir del cual se decide realizar un seguimiento de partículas en el ESP, validando sus resultados a través de resultados numéricos y experimentales de literatura.

En este estudio se establece la relación entre el voltaje y la eficiencia de recolección. Al usar placas como electrodos de recolección, se puede usar una carga más elevada, aumentando también la eficiencia. Aun así, este método de recolección aumenta las dimensiones del precipitador por lo cual es usado principalmente en plantas de energía y su implementación aplicaciones más pequeñas como lo son los automóviles, requeriría de modificaciones en la zona de los tubos de escape donde se piense implementar.

Otro precipitador de tipo placa alambres analizado a través de un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) se da en la investigación de Yang et al. [35], donde se investigan acerca de los efectos que tienen las partículas cargadas sobre la distribución del campo eléctrico, así como la eficiencia de recolección de partículas. Los resultados de este estudio muestran que el campo eléctrico se puede ver distorsionado significativamente por el campo eléctrico secundario generado por los espacios de carga de las partículas flotantes, las cuales principalmente reducen la eficiencia de recolección de partículas, excepto en los casos con carga baja. Cuando el material particulado aumenta mucho en un punto la corriente de la corona de cierta parte de los alambres puede extinguirse por completo. Se establece además que, una carga con partículas de polvo afecta significativamente la recolección de material particulado. A medida que incrementa la carga de partículas, la eficiencia del ESP disminuye. La eficiencia también depende del tamaño del material particulado. Así mismo se observó el fenómeno de la extinción de corriente en ciertas zonas de la corona cuando la carga de partículas es muy elevada.

Un diseño de filtro fue realizado por Srinivaas, Sathian y Ramesh [36], donde abordan un método de recolección basado en múltiples tubos conductores perforados (agujeros de 3mm) de 8mm de diámetro encerrados en un tubo conductor de acero inoxidable con perforación de fase. La recolección de partículas de emisión se realiza mediante un grupo de tubos de aluminio perforado de las mismas dimensiones que el del cartucho ionizante. Todo este sistema se acomoda dentro de una carcasa está diseñada para acomodar tanto el ionizador como el cartucho colector dentro de los límites seguros de salto de chispa entre los mismos.

Su estudio menciona la optimización del flujo a través de un empaquetamiento hexagonal con el cual se reduce la alta presión del entorno. La recolección de partículas a través de los tubos perforados causa que las partículas no se acumulen la zona por la cual el fluido se desplaza lo cual ayuda a evitar el fenómeno de reinsertión. El desarrollo del prototipo del ESP requiere material aislante altamente eficiente para evitar el flujo de descarga de la carga o de lo contrario se produciría un efecto de chispa. Este aislamiento se logra cubriendo toda la superficie interna del gabinete ESP con papel de filtro cerámico (espesor de 6mm) que puede soportar 1200 grados Celsius y corriente de alto voltaje.

Una comprobación del requisito de voltaje del precipitador es desarrollada en Matlab mediante valores iterativos de diodos y transformadores. Esta comprobación permite que se haga una mejor selección de los dispositivos necesarios para suministrar el voltaje que permitirá el efecto de carga de partículas, ya que los dispositivos que se comercializan normalmente tienen rangos muy amplios de voltaje que para ciertas aplicaciones no se requieren.

En el proceso de diseño [36] también se utilizan simulaciones en ANSYS CFX para comprobar el comportamiento de la presión en donde se obtienen valores de contrapresión menores a 1.0 kPa , el cual se obtiene implementando el empaquetamiento hexagonal. Además de esto un flujo continuo asegura que los deltas de presión no se eleven drásticamente, con un valor cercano a 0.2 kPa . Este valor es incluso menor a los rangos de caída de presión normales establecidos en un estudio de las generalidades de los precipitadores electrostáticos [37] que establecen que normalmente se presentan caídas de 1.0 y 1.4 kPa .

Por último, en la conferencia global STAR en 2013 [38], Hoon Lee expone un proyecto donde se usa precipitación electrostática a un modelo de un DPF que utiliza un esqueleto que parte de una rejilla cuadrada por el cual fluye el gas obteniendo gran eficiencia de recolección y una caída de presión de entre 3.5 y 5.0 kPa que se muestran en los resultados de la simulación.

4.4 DATOS EXTRAIDOS

A partir de lo mencionado, se generan dos tablas con los datos más relevantes de los estudios nombrados, los cuales se utilizarán para una comparación con los resultados el final de este proyecto. En la Tabla 4.1 se muestran los datos de los estudios que se enfocaron en el efecto de precipitación y generación de una alta eficiencia de recolección. También se genera la Tabla 4.2 en donde se encuentran los datos extraídos de algunas investigaciones donde se realizaron simulaciones o se estudiaron los efectos de cambios de presión en el flujo a lo largo del precipitador.

Estudio	Eficiencia [%]	Voltaje [kV]	Flujo Vol. [m ³ /s]	Longitud [mm]	Diámetro/ altura [mm]	Diámetro partícula [μm]	Notas
Chilinquila y Toro	99.97	12.0	0.243	450	110	1.0	-Tubular
Jaworek	>97.0	24.0	0.32	2000	330	2.5	-Tubular -Dos etapas -Forma de alambre de púas
Kawakami	99.0	8.0	0.03	375	130	0.2 – 5.0	-Una y dos etapas -Reducción de efecto de re-arrastre.
Hayashi	>99.0	12.5	0.25	100	50	0.5	-Tubular -Combinación de ESP y DPF

Tabla 4.1 Datos de estudios de eficiencia en recolección con ESP.

Estudio	Contra presión [kPa]	Caída de presión [kPa]	Velocidad (inicial) [m/s]	Diámetro/ separación [mm]	Características
Srinivaas, Sathian y Ramesh	0.65	0.20	17.26	-	-Empaquetamiento hexagonal -Papel aislante -Ensanchamiento en zona de recolección
Turner	-	0.50 - 2.50	21.6	110 - 190	-Generalidad de precipitadores
Hoon Lee	-	3.50 - 5.00	20	105	-Filtro con rejilla cuadrada extendida por donde fluye el gas.

Tabla 4.2 Datos de estudios de flujo dentro de ESP

CAPÍTULO 5

FUNCIONAMIENTO DEL PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO

5.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo presente se hará la investigación de la teoría necesaria para poder conocer los principios en los que está basado el funcionamiento de un filtro de precipitación electrostática, y así entender el funcionamiento completamente. En este se explica en detalle el efecto corona y los tipos de este, también se hablará de los mecanismos de carga de partículas para un gas, de la velocidad media o de migración de una partícula cargada, y, por último, acerca de la eficiencia de un filtro y su respectivo calculo, y así, cumplir con el objetivo ya mencionado.

5.2 EFECTO CORONA

El proceso de descarga de corona se da cuando de un electrodo con alto potencial, se transfiere una corriente a un medio neutro para ser cargado, y así, poder generar una región de plasma alrededor del electrodo [39]. Habitualmente al generarse un ion, estos transfieren la carga a lugares con menor potencial, o también tienden a unirse y así volver a su estado neutro.

En ciertos puntos del medio neutro, el campo eléctrico puede incrementarse tanto, hasta el punto en que este se empieza a cargar y se convierte en un conductor. Dependiendo de la geometría en la que se encuentre el medio, la fuerza del campo eléctrico puede ser mucho mayor en comparación a otros lugares, lo que puede llevar a que el medio se cargue localmente y otros lugares más alejados no se carguen.

Este tipo de descargas suele denominarse “descarga de un solo electrodo”, para poder diferenciarla de un arco eléctrico, que es la descarga de dos electrodos [40]. Para que se forme la corona, el conductor debe estar alejado de los conductores a tal punto que se imposibilite la formación de un arco entre los dos. Ciertas geometrías generan que los medios se carguen hasta sobrepasar el límite entre la descarga de corona y la formación de un arco causando chipas, o si se continúa proporcionando corriente esta se convertirá en un arco eléctrico.

El efecto corona exclusivamente se genera si el campo eléctrico en la extensión del conductor sobrepasa un valor crítico, la resistencia dieléctrica o el gradiente potencial disruptivo del fluido [41]. En el aire a presión atmosférica, es de aproximadamente 30 kilovoltios por centímetro [42], y es proporcional a la presión del ambiente, significando que a presiones bajas se puede formar la corona a menor voltaje. Como se mencionó anteriormente, dependiendo de la geometría en la que este el medio neutro, en algunos puntos la corona tiende a formarse primero allí, y algunos autores establecen que se puede formar entre potenciales de 2 a 6 kV [42].

Finalmente, este tipo de descarga o de efecto es efectivo para partículas de tamaños menores a 1 micra, las cuales tengan un requerimiento de voltaje sumamente alto para ser cargadas, por esto, su aplicación es bastante conocida en la carga de gases o fluidos con grandes cantidades de polvo, ya que es capaz de ionizar las partículas más pequeñas, sin cargar el resto del fluido.

5.2.1 TIPOS DE CORONA

El efecto corona tiene dos clasificaciones según la polaridad que esté presente, esta se clasifica en corona positiva o negativa.

POSITIVA

Propiedades

Cuando se genera un plasma en la extensión del conductor, esta se denomina corona positiva. Por lo general tiende a producir un brillo azul o blanco visible al ojo humano, pero la mayor cantidad de las emisiones son ultravioletas. Este tipo de corona presenta en menor cantidad electrones libres, aunque generalmente hay más electrones con energía alta que en la corona negativa, esto permite que para aplicaciones que soliciten una energía de activación alta, se pueda soportar mejor una reacción mayor.

Mecanismo

Los dos tipos de corona se forman o se inician a causa de una carga externa que se da en una zona de alto potencial. Al cargarse algunos electrones, estos empiezan a generar colisiones entre ellos causando una reacción en cadena para poder ionizar a todos los electrones disponibles en el medio. Los electrones resultantes de las colisiones, o electrones secundarios, se generan en lugares sin plasma para así poder seguir con la reacción en cadena.

La formación de los electrones resultantes es causada por los fotones emitidos por el plasma durante el proceso de pérdida de energía que ocurre dentro del mismo [39]. Estos electrones son atraídos hacia el plasma debido a la carga con la que resultan, y así se procede con la reacción en cadena. Los choques de los electrodos generan energía térmica, la cual se libera hacia el medio o es irradiada hacia el exterior.

NEGATIVA

Propiedades

Cuando la corona que se va a formar no es uniforme, esta se conoce como corona negativa, la cual cambia dependiendo del espacio y forma del conductor. Usualmente se presenta como hilos a lo largo de la geometría y dependiendo de la fuerza del campo, aumenta o disminuye este número. Esta se determina a partir de la primera reacción en cadena generada, si los electrones salen de la región de carga y se sigue generando plasma, se determina como una corona negativa.

Como y se mencionó anteriormente, en comparación a la corona positiva, esta tiene un número de electrones y una densidad más alta, pero estos están presentes con una energía más baja en mayor cantidad, por ende, para muchas reacciones el aumento de la densidad de electrones aumentará la velocidad de reacción, pero la energía más baja de los electrones significará que las reacciones que requieren mayor energía de electrones pueden tener lugar a una velocidad más baja [40].

Mecanismo

Es más difícil generar una corona negativa, a pesar de que el proceso es el mismo que la corona positiva, ya que se empieza con la carga de los electrones primarios para causar la reacción en cadena. Los electrones secundarios generados, por lo general no son capaces de seguir con la reacción, debido a que el proceso se da hacia el exterior y no hacia el interior del medio como en la corona positiva.

Para poder separar los electrones de cualquier superficie, no se requiere tanta energía a presión y temperatura atmosférica, como la corona positiva. Nuevamente, la fuente de energía para la liberación de electrones es un fotón de alta energía de un átomo dentro del cuerpo de plasma que se relaja después de la excitación de una colisión anterior [39].

5.3 MECANISMOS DE CARGA DE PARTÍCULAS

Las partículas pueden cargarse mediante varios mecanismos, como el contacto superficial en una colisión, la carga y dispersión en corona en un gas ionizado, la emisión termiónica en un entorno de alta temperatura y otros mecanismos de carga, como la propulsión coloidal para materiales dieléctricos en un campo eléctrico intenso [43, pp. 60-64], pero para la aplicación de la tesis, la carga de las partículas de polvo de un gas se dan mediante la carga y dispersión en corona, por ende se hablarán de los dos tipos de carga para una corona.

Entonces, las partículas de polvo se cargan de dos maneras en el campo eléctrico: carga de campo eléctrico y carga de difusión [44].

5.3.1 CARGA DE CAMPO ELÉCTRICO

Características

- Los iones inciden en las partículas de polvo para cargar el polvo bajo la acción de la fuerza del campo eléctrico.
- Es efectiva y dominante cuando el radio de las partículas de polvo es superior a 1 micra.

5.3.2 CARGA DE DIFUSIÓN

Características

- Los iones chocan con las partículas de polvo para cargarlas bajo la difusión causada por el movimiento térmico desordenado.
- Es efectiva y dominante cuando el radio de las partículas de polvo es menor a 0.1 micras.

Hay que tener en cuenta que para partículas que tienen un radio entre 0.1 y 1 micra, ambos tipos de carga toman cierto papel [44], ya que ninguna es dominante sobre la otra como en los otros casos. Y también que por lo general las partículas de tamaños inferiores a 0.1 micras, requieren un mínimo voltaje de 20kV para ser cargadas eléctricamente, todo depende de la aplicación que se requiera.

5.4 MIGRACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Esta es la velocidad a la que una partícula, una vez cargada, migra hacia el electrodo de recolección conectado a tierra. Las variables que afectan la velocidad de las partículas son el tamaño de estas, la intensidad del campo eléctrico y la viscosidad del gas. La rapidez con que las partículas cargadas se mueven hacia el electrodo de recolección se denota con el símbolo w , llamado velocidad de migración de partículas o velocidad de deriva [45]. El parámetro de velocidad de migración representa la capacidad de recolección de la partícula dentro de los límites de un precipitador electrostático (ESP) específico.

5.5 EFICIENCIA DE COLECCIÓN DEL FILTRO

La eficiencia de la colección es la consideración principal del diseño para un ESP. Esta se puede estimar usando varias ecuaciones, las cuales dan una aproximación teórica de la eficiencia global de recolección de la unidad que opera en condiciones ideales.

Para diseñar el sistema, se utilizan varias fórmulas tomadas de Luke. T [46], que se mostrarán a continuación. Estas fórmulas son el paso a paso para llegar hasta el cálculo de la eficiencia.

1. Fuerza del campo eléctrico: con la siguiente ecuación se logra calcular la fuerza del campo eléctrico para un cable o un cilindro, en este caso para el filtro de precipitación.

$$E_{ps} = \frac{V}{r_c} \quad (0-1)$$

- E_{ps} = Fuerza del campo eléctrico [V/m]
- V = Voltaje [V]
- r_c = Radio del filtro de precipitación [m]

2. Densidad relativa del aire: La densidad relativa del aire afecta la descarga de corona que se va a generar, estas dos son inversamente proporcionales, lo que significa que a una mayor densidad del aire menor será la fuerza del campo eléctrico necesaria para generar la corona, y viceversa.

$$\delta = \frac{298}{273 + T} \cdot Pa \quad (0-2)$$

- δ = Densidad relativa del aire
- T = Temperatura de salida de los gases del escape [°C]
- Pa = Presión atmosférica [Atm]

Nota: Las unidades utilizadas son de acuerdo con el autor y estas solo se aplican para el potencial eléctrico a continuación, no para las demás ecuaciones.

3. Potencial eléctrico de acuerdo con la ley de Peek para generar una descarga de corona. Esta ecuación se utiliza para conocer, dependiendo del tamaño de los tubos de admisión y la densidad del aire relativa, cuánto debe ser el potencial eléctrico para desencadenar una descarga de corona entre dos cables o tubos [47].

$$E_c = 3.2 \times 10^6 \delta + 9 \times 10^4 \sqrt{\frac{\delta}{r1}} \quad (0-3)$$

- E_c = Potencial eléctrico [kV/m]
- δ = Densidad relativa del aire
- $r1$ = Radio interno del tubo de admisión [m]

Nota: Este cálculo es informativo y no afecta a la eficiencia del filtro.

4. Viscosidad del gas: esta varía dependiendo de la temperatura de los gases a la salida del escape, a mayor temperatura, mayor es la viscosidad de estos y es necesaria para el cálculo del camino libre medio de la partícula.

$$\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \left(\frac{T(K)}{273.11} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{273.11 + 110.56}{T(K) + 110.56} \right) \quad (0-4)$$

CAPÍTULO 2 μ = Viscosidad del gas [$Pa \cdot s$]

CAPÍTULO 3 T = Temperatura de salida de los gases del escape [K]

5. Camino libre medio, dado por [48]: este es la distancia promedio recorrida por una partícula en movimiento entre colisiones sucesivas [49], esta permite calcular el factor Cunningham, que se muestra más adelante, necesario para conocer la velocidad de migración de estas.

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \cdot \frac{\mu}{u} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho P}} \quad (0-5)$$

- λ_p = Camino libre medio [m]
- μ = Viscosidad del gas [$Pa \cdot s$]
- u = Factor numérico = 0.4987445 [Constante]
- ρ = Densidad del aire [kg/m^3]
- P = Presión del aire a la salida del filtro [Pa]

6. Número de Knudsen: es un número adimensional definido como la relación de la longitud de la ruta libre media molecular a una escala de longitud física representativa, esta puede ser el radio de un cuerpo, por ejemplo. Esta depende del tamaño de la partícula que va a atravesar el cuerpo.

$$Kn = \frac{2\lambda_p}{d_p} \quad (0-6)$$

- Kn = Número de Knudsen
- λ_p = Camino libre medio [m]
- d_p = Diámetro de la partícula [m]

7. Factor de corrección de deslizamiento de Cunningham: el factor de corrección de deslizamiento de Cunningham permite predecir la fuerza de arrastre sobre una partícula que mueve un fluido con número Knudsen entre el régimen continuo y el flujo molecular libre [50].

$$Cu = 1 + Kn \cdot [A + B \cdot e^{-\left(\frac{C}{Kn}\right)}] \quad (0-7)$$

- Cu = Factor de corrección de deslizamiento de Cunningham
- Kn = Número de Knudsen
- $A = 1.252$ [Constante]
- $B = 0.399$ [Constante]
- $C = 1.1$ [Constante]

8. Ecuación de Cochet: con ayuda de esta ecuación se puede describir la carga del campo, lo que se traduce en la carga final de las partículas, y se define en función del diámetro de las partículas de la siguiente manera.

$$q_p = \left[(1 + Kn)^2 + \left(\frac{2}{1 + Kn} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \right] \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot Eps \quad (0-8)$$

- q_p = Cochet
- ε_r = Permitividad relativa del gas de escape
- ε_0 = Constante dieléctrica del espacio libre [F/m] $\approx 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m]

9. Velocidad de migración de las partículas: como ya se mencionó anteriormente, la velocidad de migración representa la capacidad de recolección de la partícula dentro de los límites de un precipitador electrostático (ESP) específico.

$$\omega_E = \frac{q_p \cdot Eps}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \cdot Cu \quad (0-9)$$

- ω_E = Velocidad de migración [m/s]
- Cu = Factor de corrección de deslizamiento de Cunningham

10. Ecuación o relación de Deutsch (eficiencia del filtro): esta relación determina la eficiencia de colección de un filtro de un precipitador electrostático bajo condiciones ideales.

$$\eta_f = 100 (1 - e^{-De}) \quad (0-10)$$

$$De = \omega_E \cdot \frac{Ac}{Qg} \quad (0-11)$$

- η_f = Eficiencia de colección del filtro [%]
- De = Número de Deutsch
- Ac = Área de recolección del tubo [m²]
- Qg = Tasa de flujo del gas [m³/s]

5.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Hay diferentes efectos para ionizar o cargar eléctricamente un gas, pero para la aplicación del filtro, es necesario utilizar el efecto corona, ya que por lo general los demás efectos se enfocan ya sea en ionizar otro tipo de fluidos como agua o aire, o en el caso de un gas, ionizar partículas de tamaños superiores a 100 micras, mientras que el efecto corona es capaz de cargar eléctricamente partículas de tamaños inferiores a 40 micras, tales como el PM resultante de la combustión del diésel.
- Para cumplir con el funcionamiento del filtro, es necesario que se forme una corona de tipo negativa, ya que con esta las partículas cargadas viajarán del centro hacia el exterior, y de esta manera se puede almacenar todo el material particulado posible dentro de las cavidades del filtro, por esto se descarta una corona positiva para el funcionamiento del ESP.
- Las partículas del PM se deben cargar por difusión, ya que estas presentan tamaños menores a 0.1 micras, exactamente alrededor de 10 y 80 nanómetros, y si se cargaran mediante un campo eléctrico, este no tendría la posibilidad de cargar ni el 10% de las partículas presentes en el fluido.
- Para finalizar, las partículas de PM se deben cargar eléctricamente con voltajes superiores a 20kV, ya que, de lo contrario, debido a su tamaño, no se lograrán ionizar y no se producirá el efecto corona dentro del filtro.

CAPÍTULO 6 SIMULACIÓN DE CIRCUITO ELÉCTRICO EN MATLAB

6.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo del circuito que operará para cumplir con el requerimiento de voltaje del precipitador se presenta en este capítulo. Para ello se habla acerca del punto de operación del precipitador en cuanto al campo eléctrico que este necesita para llevar a cabo la recolección de PM, y a partir de esto, determinar el voltaje requerido para la generación del campo.

Adicionalmente, se realiza una explicación sobre los elementos que hacen parte del circuito y cómo se encuentran estos en la interfaz de Simulink, también sobre la configuración de estos elementos para que el circuito opere de manera adecuada y se logre la salida de voltaje deseada.

Finalmente se muestran las líneas de conexión entre los elementos para la simulación y posteriormente los resultados que se generan al llevarla a cabo.

6.2 VOLTAJE REQUERIDO SEGÚN PUNTO DE OPERACIÓN

6.2.1 OBTENCIÓN DEL VOLTAJE EN PRECIPITADORES

Se debe tener un límite inferior y superior en cuanto a la magnitud del voltaje que se debe generar. El límite inferior está determinado por el mínimo valor requerido para la formación de la corona, es decir, de la descarga eléctrica en la que se producirán la carga de partículas [51]. El límite superior se establece según los elementos que estén conformando la sección, el voltaje de corriente alterna que se está usando, y en especial según el amperaje que pueden soportar los electrodos. Para alambres redondos, que son los que se utilizan con más frecuencia, el campo generado en la superficie del alambre está dado por:

$$E_c = 3.126 \times 10^6 d_r \left[1 + 0.0301 \left(\frac{d_r}{r_w} \right)^{0.5} \right] \quad (6-1)$$

donde

E_c = campo de formación de la corona en la superficie del alambre (V/m)

d_r = densidad relativa del gas, referido a 1 atm de presión y 20 °C (adimensional)

r_w = radio del alambre (m)

Esta ecuación describe el campo generado de modo que se produzca una corona resplandeciente. Esto quiere decir que se vería una especie de luz difusa sobre la superficie del alambre moviéndose, inicialmente sobre esta, y posteriormente localizándose en algunos puntos específicos [37].

Aunque este es un valor de referencia, pues este efecto corona se puede producir con un campo de 0.6 veces el valor de E_c . Para esto el voltaje, V_c , debe aplicarse al electrodo. Este tiene una dependencia logarítmica en las dimensiones que posea el filtro y su disposición [37]. Ya que el modelo que se pretende usar en este trabajo es cilíndrico usando alambres como electrodo, el voltaje V_c estará dado por:

$$V_c = E_c r_w \ln \left(\frac{d}{r_w} \right) \quad (6-2)$$

donde

$V_c =$ Voltaje requerido para la formación de la corona.

$d =$ Radio del cilindro exterior.

Ya que anteriormente se había establecido que el límite inferior del voltaje es el requerido para formar el campo eléctrico, no fluirá corriente hasta que se alcance este valor. Por otro lado, si el valor es más alto, entonces la cantidad de corriente crecerá [51]. Para esta aplicación es recomendable que el valor del voltaje no supere los 40 kV.

6.2.2 CÁLCULO DEL VOLTAGE REQUERIDO

Todos los valores requeridos para calcular el campo necesario, y con esto el voltaje, son conocidos o definidos de acuerdo con la aplicación del precipitador. Para este cálculo se utilizarán los valores pensados para el primer diseño de filtro propuesto. Estas dimensiones podrán variar si se hace un rediseño del filtro de acuerdo con los resultados que se presenten. Aun así, en cada caso se deberán recalcular estos valores y aplicarlos al nuevo modelo. Los valores conocidos son los de densidad relativa, radio del alambre y radio del cilindro exterior. Ver Tabla 6.1.

Variable	Magnitud	Unidad
Densidad relativa del gas	1.04	-
Radio del alambre	0.0045	m
Radio del cilindro exterior	0.05	m

Tabla 6.1. Datos para el cálculo del voltaje.

Las dimensiones del alambre y del cilindro exterior a utilizar han sido definidas teniendo en cuenta la aplicación. El valor de densidad relativa se obtuvo a través de la relación de densidades, entre la de los gases y la del aire a 20 °C. La densidad de los gases para este cálculo se obtuvo de una tesis acerca de sistema de purificación de gases de combustión. Con un valor de densidad para estos gases en base seca de 1.2465 kg/m^3 [52].

Una vez calculado el campo electromagnético y el voltaje necesario para generar este a través de las ecuaciones (6-1) y (6-2), con el cual se logre el efecto corona necesario para la carga de las partículas, se obtiene que el valor del voltaje debe ser el siguiente:

$$V_c = 21296.2 \text{ V}$$

Con base en este valor se debe diseñar el circuito, pues debe ser uno que cumpla con el valor de voltaje requerido.

6.3 CIRCUITO POR DESARROLLAR

El circuito que se emplea para generar el voltaje que requieren los precipitadores es conocido como circuito de alto voltaje. A través del módulo SIMULINK del software MATLAB se simulará un circuito que, a partir de una fuente de corriente alterna (AC), proporcione una salida de corriente directa (DC), en la que el valor del voltaje sea el requerido. La salida debe cumplir con el requerimiento de que la corriente sea directa, ya que el voltaje debe ser constante durante el tiempo en que el precipitador se encuentra en funcionamiento. Como se explicó anteriormente, el campo no se genera a menos que el voltaje alcance el valor mínimo requerido. Si se tiene una corriente

alterna en donde la magnitud del voltaje se presenta de forma oscilatoria, el precipitador no recibirá una señal constante por encima del valor requerido con la cual pueda operar.

La versión de MATLAB utilizada para la realización de este proyecto es MATLAB R2019b. Las explicaciones del circuito, ubicación de los elementos, ventanas utilizadas, así como los entornos de simulación, variación de parámetros y visualización de resultados, podrían tener variaciones en otras versiones. Todo el desarrollo de la simulación se realizará en el entorno del módulo SIMULINK.

6.3.1 CIRCUITO DE ALTO VOLTAJE

Es bien conocido que las fuentes de corriente directa comunes proporcionan voltajes de entre 12V y 24V, y las de corriente alterna proporcionan entre 100V y 480V, por esto, se requiere un circuito en el que se aumente el voltaje para poder llegar al valor requerido. Para poder aumentar un voltaje de entrada existen los circuitos multiplicadores de voltaje y los circuitos con transformador elevador.

Los circuitos multiplicadores de voltaje usan una combinación diodo-capacitor que son añadidos para que el pico de voltaje de entrada, una vez rectificado a través de los capacitores, aumente hasta un valor múltiplo del valor de entrada. Al combinar esto junto con un transformador elevador, se pueden obtener circuitos con voltajes de salida muy altos, por encima de 10 kV [53, p. 141].

6.3.2 ELEMENTOS DEL CIRCUITO

Se tendrán en cuenta los elementos que hacen parte del circuito. Estos se presentarán como elementos en conjunto. Se sabe que en los circuitos se utilizan bloques o componentes que están conformados por piezas o elementos diminutos. Teniendo en cuenta que la idea no es profundizar en el campo de la electrónica, sino tener un entendimiento del funcionamiento del circuito y lo que se requiere para lograr el voltaje deseado, se hará explicación de los bloque o grandes grupos de componentes que hacen parte del circuito.

Simulink posee una librería de elementos que se pueden utilizar para la construcción y simulación de circuitos. Aquellos que se utilizarán en este proyecto se encuentran seleccionando *Simulink Library Browser* → *Simscape* → *Electrical* → *Specialized power systems* → *Fundamental Blocks*. Esta va a ser nuestra ruta inicial en el buscador de la librería de Simulink.

Fuente AC

La fuente que se utilizará es de corriente alterna. Teniendo esto claro, se debe escoger entre una fuente de voltaje y una fuente de corriente. Esto no quiere decir que en el circuito real vaya a ir solo una de estas dos variables, de hecho, es imposible. A lo que se refiere esto es que Simulink debe entender cuál va a ser la variable por analizar, como el objetivo del proyecto va ligado al requerimiento de alto voltaje, se escoge un elemento denominado *AC Voltage Source*. Este aparece en el software como se muestra en la Figura 6.1. Siguiendo la ruta antes mencionada y añadiendo *Fundamental Blocks* → *Electrical Sources*.

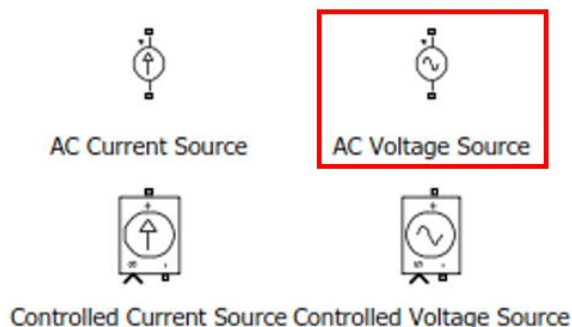


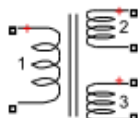
Figura 6.1 Selección de fuente de voltaje.

En los parámetros de este bloque se debe cambiar el valor por defecto, 100 V, a 220 V.

Transformador Lineal

Un transformador lineal básicamente es un dispositivo que usa acoplamiento magnético entre dos inductores. Esto se usa para acoplar dos bobinas, una conectada a la fuente de poder, llamada bobina primaria, y otra a la carga, es decir, hacía donde se requiere que se dirija la corriente, llamada bobina secundaria [54, p. 792]. Estos dispositivos se usan para transmitir señales de la fuente a la carga, especialmente potencia. A esto se suma que se puedan controlar algunas variables como lo es el voltaje, multiplicándolo o disminuyéndolo sustancialmente.

Simulink, en su librería, cuenta con varias opciones de transformadores que se pueden utilizar. Para este proyecto se utilizará un transformador lineal, *Linear Transformer*, que se puede encontrar siguiendo la ruta inicial y añadiendo *Fundamental Blocks* → *Elements*. Ver Figura 6.2.



Linear Transformer

Figura 6.2 Selección de transformador.

Inicialmente este transformador está configurado por defecto para trabajar usando tres bobinas, *Three windings transformer*. Ya que el que se requiere es uno de solo dos bobinas, entonces se deben abrir las opciones del bloque para cambiar la configuración. Esto se hace desmarcando la casilla de tres bobinas como se muestra en la Figura 6.3. Los parámetros del transformador se dejan con los valores que tiene por defecto, estos valores son de la configuración más común que se encuentra en estos transformadores normalmente. Luego de esto la representación del transformador cambiará, es decir, se mostrará ahora con solo dos bobinas. Ver Figura 6.4.

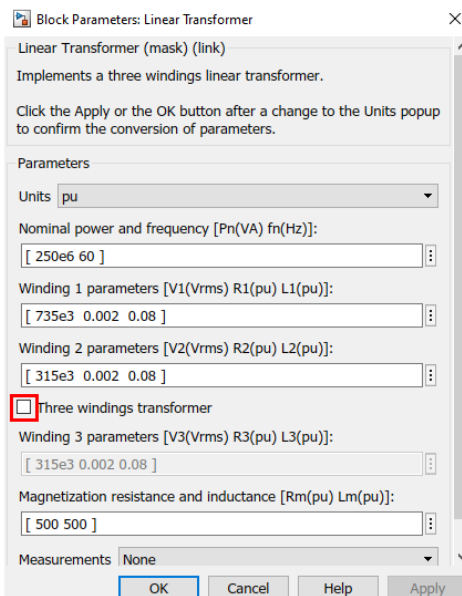


Figura 6.3 Parámetros del transformador lineal.

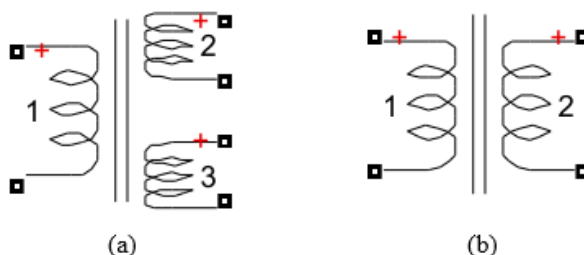


Figura 6.4 Transformador lineal. (a) Tres bobinas, (b) Dos bobinas.

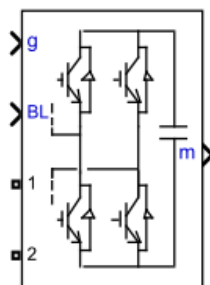
La función del transformador es la de aumentar el voltaje, pero este sigue teniendo un comportamiento senoidal, es decir que no se mantiene en un valor constante como se requiere.

Rectificador MMC

Convertir la señal de corriente directa a corriente alterna se puede lograr usando un rectificador. Estos dispositivos usan uniones PN, que es la estructura fundamental de los semiconductores como diodos y transistores, que al estar conectados en polaridad directa conducen la corriente, mitad positiva del ciclo, y al estar en polaridad inversa no permiten el paso de corriente, mitad negativa del ciclo. Para que se presente una señal continua se usa una configuración usando varias uniones de modo que en todo momento se transmita corriente, pasando de AC, a una señal pulsante DC. Esto se conoce como rectificador de onda completa [55, p. 2.1].

El rectificador que se debe utilizar en este circuito debe ser uno de tipo MMC, *Modular Multilevel Converter*. Es un tipo de conversor de fuente de voltaje que surgió para poder trabajar con voltajes altos sin que se presenten aumentos excesivos en los esfuerzos de tensión, que normalmente causan fallas y daños en los dispositivos electrónicos. Recibe este nombre ya que de acuerdo con la capacitancia del capacitor que se utilice, se puede obtener un rango amplio de voltajes entre los cuales puede operar [56].

En Simulink existen dos formas para poder implementar este rectificador. La primera, más compleja, es seleccionar los transistores, resistores, inductores y capacitores, elementos que se encuentran en la librería, y realizar la conexión de estos de manera adecuada. La segunda, que resulta mucho más sencilla, es seleccionar el bloque denominado *Full-Bridge MMC*, en donde estas conexiones ya están realizadas y solo se deben configurar algunos parámetros del bloque [57]. Para este trabajo se utilizará la segunda forma descrita. La selección del bloque se logra siguiendo la ruta inicial establecida y añadiendo *Fundamental Blocks* → *Power Electronics*.



Full-Bridge MMC

Figura 6.5 Selección de rectificador.

La configuración de los parámetros del rectificador es bastante simple. Estos se deben establecer como aparece en la Figura 6.6. Se escoge como tipo de modelo *Switching devices*, ya que este permite que sea un sistema de alimentación ininterrumpida, necesario para que el filtro funcione de manera continua.

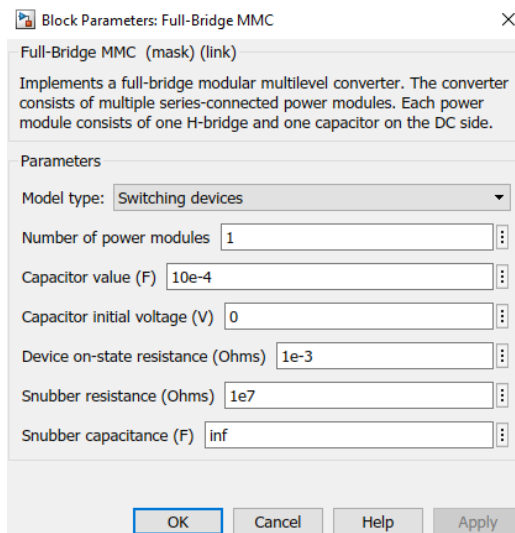


Figura 6.6 Parámetros del rectificador.

Solo se usa un módulo de potencia ya que solo se requiere alimentar un filtro. En sistemas en donde se requiera alimentar más de un dispositivo se pueden implementar más módulos, con la condición de que la magnitud del voltaje que llega a cada uno se vería reducida. Los valores de resistencia y capacitancia se escogen para que el voltaje llegue hasta el valor requerido. El valor de capacitancia del “amortiguador” (*snubber*), se establece como infinito, ya que para estas aplicaciones su valor suele ser muy elevado, y por lo tanto el cálculo no se verá afectado al establecerlo como infinito.

Visualización y Gráfica

Para comprobar el requerimiento de voltaje, se logra realizar el circuito con los elementos que han sido descritos hasta ahora, aun así, se requiere implementar en Simulink tres elementos más. Uno de ellos para establecer el tipo de simulación que se realizará, y otros dos para poder visualizar los datos de la variable de interés.

El primero de ellos se denomina *Powergui*, el cual permite tratar la simulación para que represente un modelo continuo [58]. Por otro lado, los elementos de visualización que se utilizarán son *scope*, los cuales permiten visualizar, por medio de una gráfica, el comportamiento de cualquier variable respecto al tiempo. Finalmente, el elemento *display*, el cual mostrará el valor exacto de la variable que se desea medir. Ver Figura 6.7. Estos dos últimos se pueden encontrar siguiendo la ruta *Simulink* → *Sinks*.

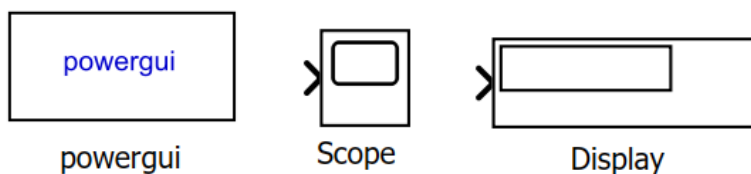


Figura 6.7 Elementos de simulación y visualización.

6.3.3 MONTAJE DEL CIRCUITO

Después de tener todos estos elementos se procede a realizar la conexión entre ellos. La Figura 6.8 muestra cómo se deben realizar las conexiones entre los elementos. Nótese que el elemento *Powergui* no tiene ninguna conexión, pues este solo define la forma en que la simulación se llevará a cabo, y esta debe ser de tipo continua (*Continuous*).

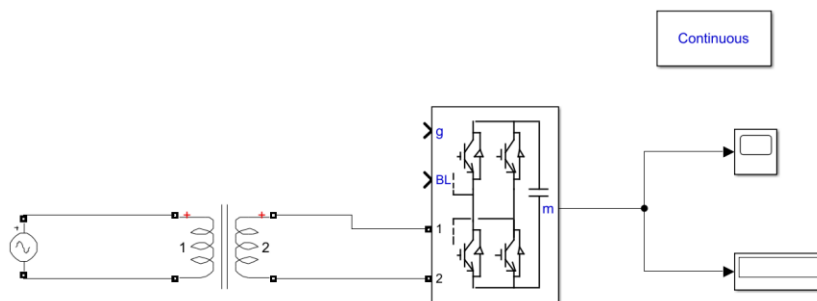


Figura 6.8 Montaje del circuito.

El rectificador tiene dos entradas en donde no se aprecia ninguna conexión. Esto se debe a que estas entradas se usan para controlar cuáles módulos de poder estarán operando. Como se mencionó antes solo se usará uno, y lo ideal, es que esté operando para poder realizar la medición del voltaje a la salida (m) (*Measurement signal*), la cual permite realizar esta medición, por lo que se conecta a los dos elementos de visualización.

En la interfaz de Simulink se establece un tiempo de 100s para la simulación y se observará cómo se ha comportado el voltaje transcurrido ese tiempo. Con esto establecido se puede correr la simulación.

6.4 RESULTADOS

Es necesario recordar que el valor de voltaje requerido para generar el campo eléctrico con el cual se logre el efecto corona es de 21296 V, por lo que el resultado deberá ser un valor de magnitud igual o mayor. Entonces, luego de completada la simulación, el elemento *Display* muestra el valor de voltaje medido en ese instante. La configuración que se ha proporcionado arroja como resultado un valor de voltaje de 23,410 V aproximadamente. Ver Figura 6.9.

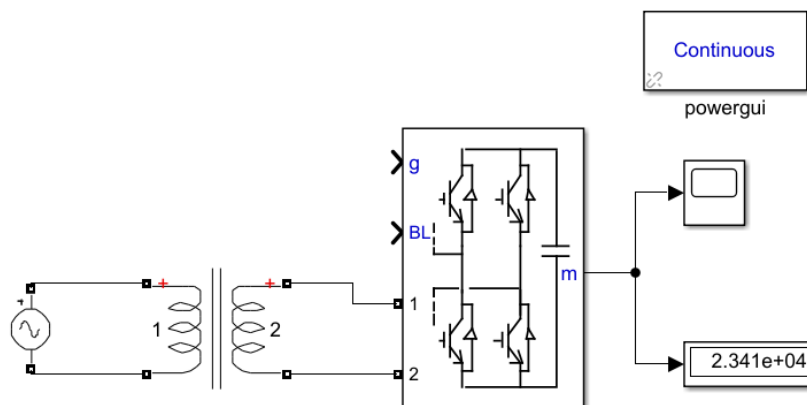


Figura 6.9 Circuito al finalizar la simulación.

El valor de voltaje debe tender a ser constante durante el tiempo de operación, lo cual no se puede comprobar con solo observar el valor que muestra el *display*. Para esto se abre el elemento *scope*, el cual permitirá ver este comportamiento de una manera más detallada. Ver Figura 6.10.

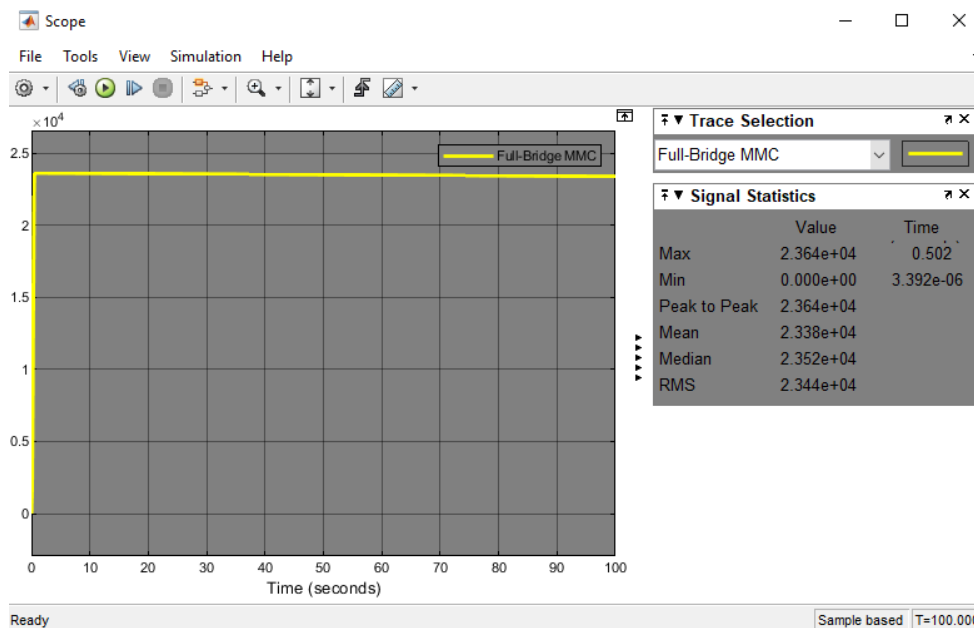


Figura 6.10 Gráfica Voltaje (V) vs Tiempo (s).

La gráfica de la Figura 6.10, muestra la magnitud del voltaje a la salida del rectificador a lo largo del tiempo de simulación. El eje Y no tiene nombramiento debido a que al elemento no se le establece cuál variable debe medir. Esto se debe a que el bloque del puente rectificador arroja la

señal de medida de la única variable posible, el voltaje contenido en el capacitor en el módulo de poder. Nótese que una vez el voltaje alcanza su valor máximo, 23640 V, lo cual sucede a 0.5 s de iniciada la simulación, su valor tiende a mantenerse constante.

Si se desea, se puede comprobar que la corriente entra al circuito como alterna, es decir, de forma oscilatoria y con el valor establecido de 220 V. Esto se logra con el elemento *Multimeter* conectado a un *scope*. Para esto en los parámetros de la fuente, se debe escoger la opción *Voltage* en *Measurements*.

6.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- El valor mínimo calculado de voltaje requerido para poder generar el efecto corona está en el orden de los 20 kV y 21296.2 V específicamente. Este valor se encuentra dentro de los rangos de voltaje normalmente utilizados en aplicaciones de recolección de material particulado a través de precipitadores. Lo anterior indica que no se generan valores anormales que requieran elementos poco comunes, o dispositivos especiales extra para la construcción del circuito generador de voltaje.
- El circuito propuesto para la generación del voltaje requerido, el cual muestra un comportamiento adecuado en la simulación, consta de una fuente de corriente alterna de 220 V, un transformador lineal de dos bobinas con relación de tensiones de 0.011 aproximadamente, y un puente rectificador de onda completa de tipo MMC con un capacitor de 1000 μF , que contenga un solo módulo de poder. Esto asegura una generación de voltaje de 23400 V aproximadamente, el cual está por encima del valor de voltaje mínimo requerido, lo que a su vez asegura que se genere el efecto corona que proporcionará la carga eléctrica al material particulado.

CAPÍTULO 7

PROTOTIPO VIRTUAL DEL FILTRO DE PRECIPITACIÓN ELECTROSTÁTICA

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el primer modelo CAD establecido a partir del cálculo de la eficiencia y los resultados obtenidos en MATLAB, para posteriormente hacer la respectiva simulación y el análisis del flujo con ayuda del programa ANSYS. Partiendo de que se escoge un motor existente de un automotor para las medidas del diseño y que se propone una eficiencia mínima del filtro del 90%, se hacen las pruebas necesarias hasta cumplir con el requerimiento de eficiencia. Finalmente, se dispone el modelo establecido, el cual cumple con todos los requerimientos fijados.

7.2 PROTIPO CAD

Estableciendo como premisa que la relación de eficiencia, voltaje requerido, tamaño del filtro y cantidad de tubos de admisión, son directamente proporcionales la una de la otra, se hizo una investigación de vehículos de carga o transporte urbano, teniendo en cuenta principalmente las medidas de los escapes, para poder generar unas medidas iniciales y hacer el respectivo cálculo de la eficiencia.

7.2.1 PARÁMETROS PREVIOS AL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

El automotor que se escogió para el diseño del filtro es un vehículo de marca Mercedes Benz de referencia OF1721 [59], con las especificaciones técnicas que se muestran en la Tabla 7.1. Estas especificaciones son sacadas directamente del catálogo de chasis para este automotor, disponible en línea gratuitamente.

Marca	Mercedes-Benz
Modelo	OF1721
Motor	MB OM 366 LA
Número de Cilindros	6
Cilindrada	5958 cc
Diámetro del Cilindro	97.5 mm
Carrera del Pistón	133 mm
Potencia	155 kW a 2600 rpm
Torque Máximo	660 Nm a 1400 rpm
Relación de compresión	18:1

Tabla 7.1 Especificaciones del vehículo seleccionado para el análisis del filtro.

Según un trabajo de investigación hecho por Pozo [60], en el cual hace el análisis de la velocidad de salida y caudal de los gases para este vehículo en específico, se determina lo siguiente:

Diámetro del conducto = 0.115 m				
Área interna del conducto = 0.01038 m²				
Temperatura de los gases de salida = 46°C - 320 K				
Régimen de Giro	Velocidad 1	Velocidad 2	Velocidad Promedia	Rapidez de Flujo de Volumen Q
(rpm)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m ³ /s)
500	5.1	5.3	5.2	0.053
1000	8.9	8.5	8.7	0.09
1500	13.4	13.6	13.5	0.14

Tabla 7.2 Análisis de velocidad de salida y del caudal de los gases para el motor escogido.

Fuente: *Influencia de la disposición del conducto de escape en el índice de contaminación de los buses de transporte masivo de pasajeros de la ciudad de Cuenca [60].*

Teniendo en cuenta lo anterior, y para poder calcular la eficiencia del filtro, se establecen unos parámetros iniciales los cuales se pueden apreciar en la Tabla 7.3.

Variable	Valor	Unidades
Voltaje (<i>valor mínimo para generar el efecto de corona</i>)	21.5	kV
Presión de salida (<i>presión atmosférica a nivel del mar</i>)	101,325	Pa
Tasa de flujo del gas (<i>sacada de la tabla 6.2</i>)	0.143	m ³ /s
Diámetro de la partícula (<i>diámetro promedio del PM</i>)	40	nm
Diámetro del filtro (<i>establecido a partir de las medidas del escape</i>)	0.1	m
Longitud del filtro (<i>parámetro escogido por los autores</i>)	0.40	m
Diámetro de los tubos de admisión (<i>parámetro escogido por los autores</i>)	7.50	mm

Tabla 7.3 Parámetros iniciales para el cálculo de la eficiencia del filtro.

7.2.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

La eficiencia del filtro se calcula con ayuda de las ecuaciones mostradas anteriormente en la teoría, las cuales permiten conocer la eficiencia que un filtro puede tener cuando una partícula de un tamaño determinado pasa por él. A continuación, se presenta el proceso.

Fuerza del campo eléctrico. Ecuación (0-1).

$$E_{ps} = \frac{21,500 V}{0.05 m} = 430 kV/m$$

La intensidad del campo eléctrico según la Ley de Peek para generar una descarga de corona se obtiene con la ecuación (0-3).

$$E_c = 3.2 \times 10^6 \times 0.514 + 9 \times 10^4 \sqrt{\frac{0.514}{0.00375}} = 2,698.17 kV/m$$

En donde, a través de la ecuación (0-2), para una temperatura de escape de 306.85°C y 1 atmosfera de presión

$$\delta = \frac{298}{273 + 306.85} \cdot 1 = 0.51393$$

Usando la ecuación (0-4), para la misma temperatura del cálculo anterior:

$$\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \left(\frac{580}{273.11} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{273.11 + 110.56}{580 + 110.56} \right) = 3.077 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$$

El camino libre medio usando la ecuación (0-5) sería

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \cdot \frac{3.077 \times 10^{-5}}{0.4987445} \cdot \frac{1}{\sqrt{1.225 \times 10^{1325}}} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ m}$$

El factor de corrección Cunningham es calculado con la ecuación (0-7).

$$Cu = 1 + 5.4865 \cdot \left[1.252 + 0.399 \cdot e^{-\left(\frac{1.1}{5.4865}\right)} \right] = 9.661$$

En donde se utiliza la ecuación (0-6) para hallar el número de Knudsen.

$$Kn = \frac{2 \times 1.1 \times 10^{-7}}{0.00000004} = 5.486494$$

Usando la ecuación de Cochet, ecuación (0-8), se puede encontrar la carga que atraerá a la partícula de tamaño de 40nm

$$q_p = \left[(1 + 5.4865)^2 + \left(\frac{2}{1 + 5.4865} \right) \cdot \left(\frac{3 - 1}{3 + 1} \right) \right] \cdot \pi \cdot 8.854 \times 10^{12} \cdot (40 \times 10^{-9})^2 \cdot 430,000$$

$$q_p = 5.9814 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Velocidad media alcanzada por las partículas cargadas se da por la ecuación (0-9).

$$\omega_E = \frac{5.9814 \times 10^{-18} \cdot 430,000}{3 \cdot \pi \cdot 3.077 \times 10^{-5} \cdot 0.00000004} \cdot 9.661 = 2.142 \text{ m/s}$$

A través de las ecuaciones (0-10) y (0-11), se determinará el número de tubos que se deben implementar en el precipitador, teniendo en cuenta que la eficiencia mínima establecida es del 90%. De La ecuación (0-10) se despeja el número adimensional de Deutsch. Este se usa posteriormente en la ecuación (0-11) para determinar el área de recolección y con esta el número de tubos.

$$\eta_f = 100 (1 - e^{-De}) = 90 \% \rightarrow De = 2.302585$$

$$A_c = \frac{2.302585}{2.142} \cdot 0.143 = 0.1537 \text{ m}^2$$

$$n_{tubos} = \frac{0.1537 \text{ m}^2}{\pi \cdot 0.4 \text{ m} \cdot 0.0075 \text{ m}} = 16.31$$

Este número se aproxima al siguiente ya que el número de tubos debe ser entero. No se aproxima al anterior ya que esto representaría menor área de recolección y por lo tanto menor eficiencia, causando que no se cumpla el valor mínimo establecido. Con el número de tubos fijado, se vuelve a calcular el área, el número de Deutsch, y con esto la eficiencia.

$$n_{tubos} = 17 \rightarrow \eta_f = 90.93 \%$$

7.2.3 MODELAMIENTO DEL FILTRO

El primer modelo está compuesto por una carcasa y un filtro interno con 17 tubos de admisión. Este diseño se hace de una sola una etapa, lo que significa que los tubos de admisión irán de inicio a fin sin interrupciones, por lo cual se modela la etapa de recolección y la carcasa según las medidas obtenidas expresadas anteriormente.

Se diseña la carcasa, Figura 7.1 (a), con un diámetro interno de 100mm y una longitud total de 460mm, con una entrada y salida del flujo de 90mm de diámetro cada una. Se presenta también la zona de admisión, Figura 7.1 (b), así como una vista de corte del ensamble de esta con la carcasa, Figura 7.1 (c). En esta zona se encuentran los tubos de admisión, cada uno de diámetro interno de 7.5mm y un espesor de pared de 2mm. Estos cuentan con orificios de 2mm de diámetro cada 90° alrededor del tubo, y distanciados entre si 2mm a lo largo de toda la longitud de este. Estos orificios permiten que las partículas de material particulado sean recogidas y almacenadas en el interior del filtro. Ver Figura 7.2.

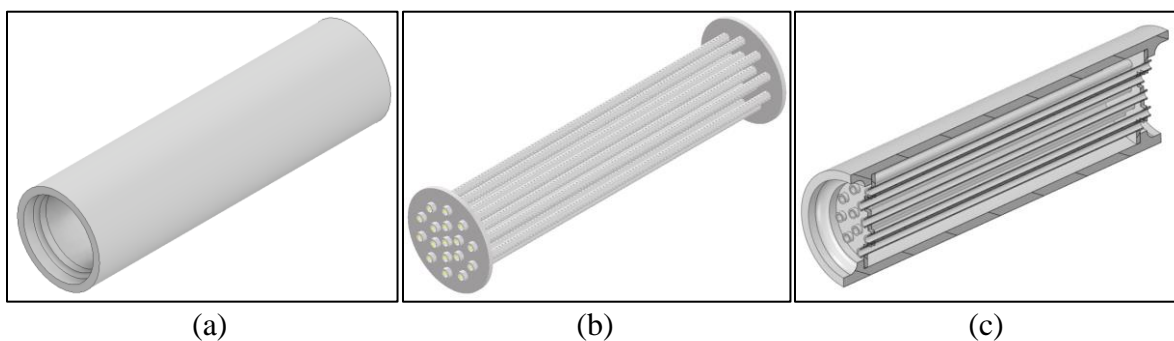


Figura 7.1 Primer prototipo de carcasa diseñado.



Figura 7.2 Orificios de descarga de las partículas en los tubos de admisión

Aumento del número de tubos

Este diseño, que se generó con el criterio de cumplir la eficiencia mínima establecida, se ve sometido a un cambio en el número de tubos de recolección, debido a que el filtro presenta un aumento súbito en la velocidad. Este aumento se da de tal modo que la velocidad interna alcanza valores por encima de 0.3Ma , lo cual fue comprobado a través de varios intentos en simulaciones con el software ANSYS. Los aumentos de velocidad por encima del límite mencionado generan cambios representativos en la densidad lo que conlleva a turbulencia, variaciones no esperadas de la velocidad y la presión, además de que obtener una simulación exitosa con estas condiciones requiere de métodos y configuraciones complejas, al igual que de estaciones de trabajo, computacionalmente hablando, muy costosas.

Esto conlleva a que se deba encontrar un número de tubos con el cual la velocidad no alcance valores críticos para poder tratar el flujo de manera incompresible, situación que reducirá los tiempos de simulación como se explicará en el siguiente capítulo. El número de tubos que se establece a partir de esto para un modelo funcional es de 31 tubos. Claramente, tener más tubos de recolección representará una mayor área de admisión, por lo que se aumentará la eficiencia del filtro.

El espacio en que los tubos deben ser instalados establece también un límite. Los tubos deben estar espaciados de modo que las cabezas de estos no se choquen en el ensamble, y depende también del área transversal sobre el cual serán montados. El número de tubos seleccionado, 31, es apropiado ya que esta cantidad se puede ensamblar en el precipitador. Teniendo esto en cuenta se presenta el diseño con el que se desarrollaran las simulaciones. La única diferencia con el diseño anterior es el número de tubos utilizado, las dimensiones del filtro, es decir, de la carcasa, zona de admisión y tubos, se mantiene con las mismas magnitudes.

En la Figura 7.3 se observa el filtro con la modificación, se presenta la vista de la carcasa (a), de la zona de admisión (b), y el ensamble con transparencia en la carcasa (c). Además de esto se presentan las dimensiones principales de la carcasa del filtro. Ver **Error! Reference source not found.**

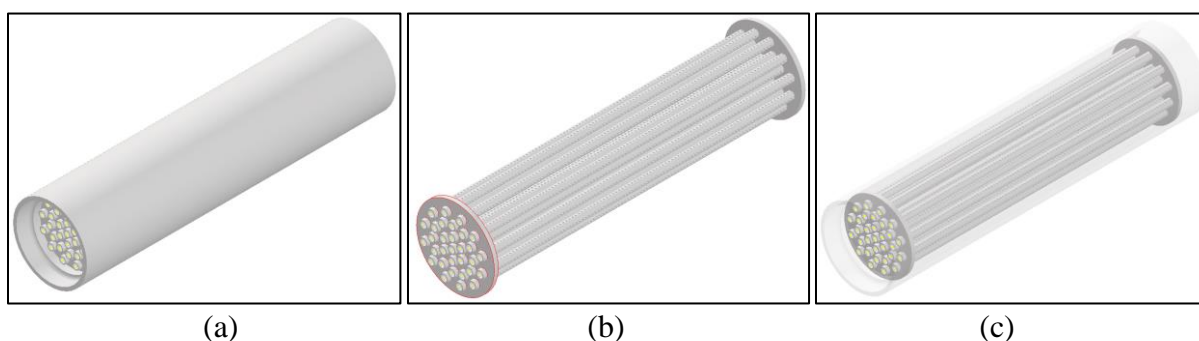


Figura 7.3 Zona de admisión del filtro rediseñado.

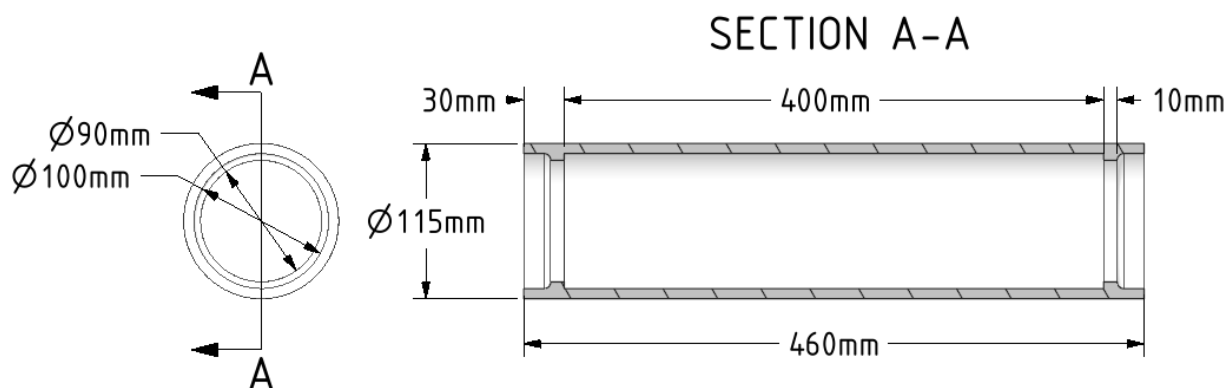


Figura 7.4 Medidas principales de la carcasa del filtro.

Se calcula la eficiencia para este nuevo filtro teniendo en cuenta el nuevo valor del área de recolección. Se utilizan nuevamente las ecuaciones (0-10) y (0-11) en donde se obtiene como resultado que la eficiencia teórica del filtro es 98.74%. Un valor que se acerca a los mencionados en la revisión de estudios anteriores donde se encontraron valores comunes de 99% de eficiencia.

7.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Se realizó el prototipo virtual CAD con el cual las simulaciones serán llevadas a cabo. Las dimensiones de este prototipo están pensadas para aplicarse a automotores con un motor MB OM 366 LA modelo OF1721, fabricado por la compañía Mercedes-Benz, o de dimensiones y especificaciones similares, pero según la aplicación se podría adaptar a otro tipo de automotores.
- El prototipo propuesto utiliza el método de recolección basado en múltiples tubos de admisión perforados con agujeros de 2 mm de diámetro cada uno, separados a lo largo del tubo cada 2 mm, y ubicándose cada 90° alrededor del tubo. Se propone un total de 31 tubos que conformarán la zona de admisión de las partículas lo cual garantiza un área de recolección con la que se cumple el valor de eficiencia mínima establecida (90%), llegando a un valor de 98.74%.
- Se estableció el número de tubos del prototipo del precipitador teniendo en cuenta la velocidad que pudiera desarrollar el flujo al pasar por la contracción súbita y entrar a la zona de recolección. Este criterio será confirmado con las simulaciones desarrolladas para este modelo a lo largo del proyecto.
- Finalmente, se cumple el objetivo de modelar el primer filtro cumpliendo con los requerimientos de eficiencia y voltaje necesario para generar el efecto corona dentro de este.

CAPÍTULO 8

ALISTAMIENTO Y CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA SIMULACIÓN EN ANSYS

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el proceso llevado a cabo dentro del software ANSYS para la realización de las simulaciones correspondientes y así determinar si se genera o no contrapresión. Se presenta la descripción de los pasos que se siguen, de los parámetros que se escogen para la realización de la simulación, así como la justificación de la selección de estos, los cuales proporcionan validez a las consideraciones hechas para la situación física que se presenta dentro del precipitador, dando certeza de que los resultados arrojados por el software sean acordes al sistema planteado, y así mismo se asemeje a las condiciones reales.

Primeramente, se trata acerca del módulo que se usará para la simulación, seguido de la obtención del volumen de control a tratar, y posteriormente se habla acerca del proceso de enmallado y los criterios tenidos en cuenta para este. Finalmente se muestran los parámetros de simulación que se establecerán para todas las simulaciones que se realicen.

Para finalizar, la explicación de este proceso brinda, a quien no conoce detalladamente el software, un entendimiento del proceso llevado a cabo en el software, y para quienes conocen acerca de este y de las simulaciones, una comprobación de que este proceso se hace justificando cada una de las selecciones y decisiones que se realizan.

8.2 SISTEMA DE ANÁLISIS

ANSYS ofrece diversos módulos o sistemas de análisis para poder estudiar un gran número de modelos físicos. Para este proyecto se requiere de un sistema de análisis de flujos, por lo cual se escoge el módulo *Fluid Flow (Fluent)*, el cual permite analizar flujos ya sean compresibles o incompresibles dentro de geometrías complejas [61]. Aunque existen algunas otras opciones disponibles en el software para el análisis de flujos, Fluent resulta ser la más apropiada.

Todo el proceso que se describirá a continuación se realiza dentro de la plataforma *Workbench* de ANSYS, la cual permite crear y modificar los proyectos de forma organizada. Aquí mismo se insertará el módulo de Fluent sobre el cual se trabajará. Ver Figura 8.1.

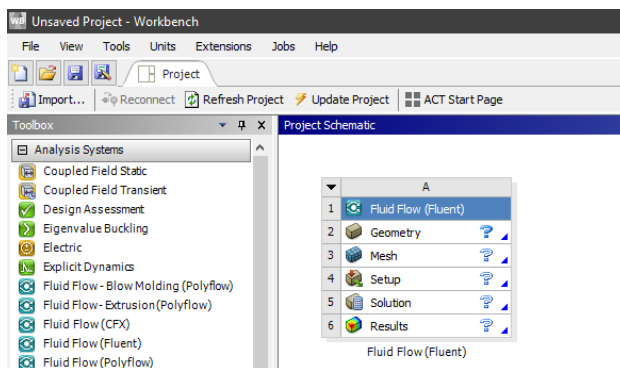


Figura 8.1 Plataforma Workbench con cuadro del módulo Fluent.

Este módulo se compone de varias secciones, geometría, malla, preparación, solución y resultados. Ya que la versión de ANSYS que se manejará para el desarrollo del proyecto se encuentra en su

idioma original, inglés, estos términos se tratarán de ahora en adelante con el nombre que aparecen en el software: *Geometry*, *Mesh*, *Setup*, *Solution* y *Results*. Se debe entender cada una de ellas para proceder con el análisis. Se da una explicación sencilla de cada uno.

- *Geometry*: se debe cargar el modelo CAD del volumen de control del flujo sobre el cual se realizará el análisis.
- *Mesh*: acá se crea la malla de la geometría. Se establecen parámetros como el tipo de elementos de la malla, el tamaño de estos y el nombramiento de zonas o caras para una posterior configuración de las condiciones de frontera en la sección *Setup*.
- *Setup*: se configuran los parámetros con los cuales será solucionado el sistema. En esta sección, que es el solucionador del modelo, se establecen los modelos matemáticos y físicos con los cuales será analizado el sistema. Se establecen las condiciones de frontera, el fluido (sustancia, material), criterios de convergencia, etc.
- *Solution*: contiene la información del modelo actual solucionado y los archivos creados.
- *Results*: post procesador en donde se pueden crear tablas, gráficos, contornos y demás elementos que permiten una visualización más detallada de los resultados obtenidos en la simulación [61].

Ya que en cada una de estas secciones se debe tener en cuenta detalles importantes con el fin de que el sistema y el análisis de este sea lo más real posible, se explicará el proceso llevado a cabo en cada una.

8.3 OBTENCIÓN DEL VOLUMEN DE CONTROL

En la sección *Geometry*, tal como se mencionó, se debe cargar un modelo CAD del volumen de control. Este se debe obtener a partir del modelo CAD del precipitador que se está teniendo en consideración para el análisis, presentado en el capítulo anterior. Es posible obtener esta geometría haciendo una extracción de volumen en el software *Spaceclaim*, que es el software que usa ANSYS para el modelamiento 3D. Esto da la ventaja de que, al ser el modelador de ANSYS, se pueda obtener un archivo en el formato más apropiado para poder trabajarlo. Con esto se evitan problemas de lectura del archivo por parte de Fluent, y del entorno de creación de mallas.

No se realizará una explicación detallada del proceso de obtención del volumen de control. En términos generales se usa la opción *Volume extract* del software para que se cree la geometría. El volumen obtenido, correspondiente al diseño establecido del filtro propuesto, este se puede observar en la Figura 8.2.

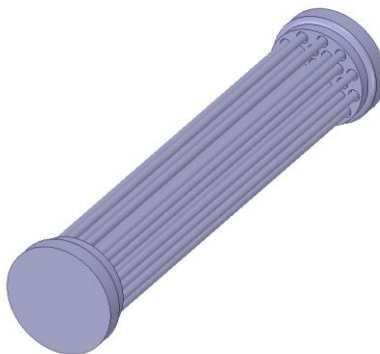


Figura 8.2 Volumen de control – Diseño inicial.

Esta geometría debe guardarse como un archivo separado y ser cargada posteriormente a la sección *Geometry* del cuadro de Fluent, que se encuentra en la hoja de proyecto de Workbench. El volumen de control presentado en la Figura 8.2 será el que se utilizará en las simulaciones ya que corresponde al modelo CAD propuesto.

8.4 CREACIÓN DE LA MALLA

Una vez cargada la geometría se puede realizar un enmallado en la sección *Mesh*. El enmallado no es más que la discretización del cuerpo o volumen a analizar, en un número finito de elementos. Las ecuaciones del solucionador se implementan en cada uno de los elementos con el fin de obtener información y resultados en cada uno. Así, un número mayor de elementos presentará resultados más exactos. Se debe tener en cuenta que al tener mallas con mayor número de elementos también se requiere un mayor costo computacional, con lo cual se busca generar una malla que presente resultados confiables, y a su vez, que el número de elementos se mantenga lo más bajo posible.

Inicialmente se explicarán las condiciones y parámetros que se tendrán en cuenta para la creación de la malla. En un apartado, más adelante en este mismo capítulo, se realizará un estudio de independencia de malla, el cual indicará cual será el número aproximado de elementos mínimo para obtener resultados confiables.

Para entender los términos que se utilizarán en la explicación, obsérvese detalladamente el entorno de creación de la malla. Ver Figura 8.3.

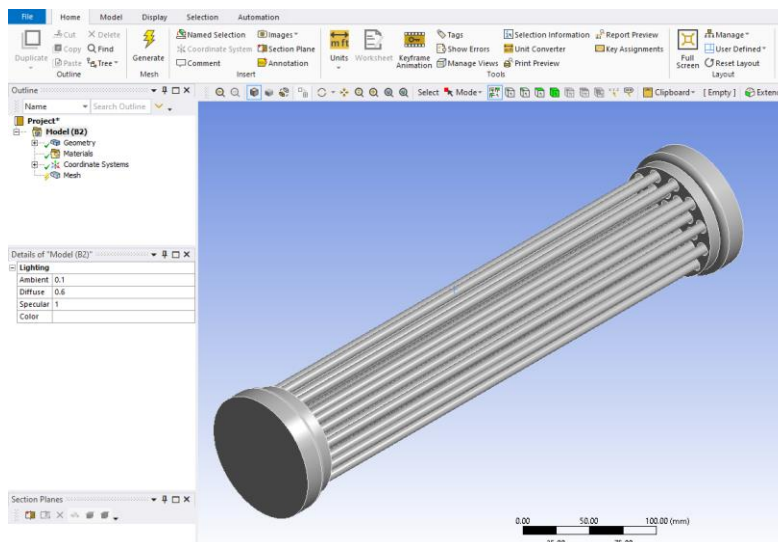


Figura 8.3 Entorno de plataforma Meshing de ANSYS.

Se debe prestar especial atención al árbol de opciones de la izquierda, pues desde este espacio se controlan los parámetros con los que se formará la malla. Ver Figura 8.4.

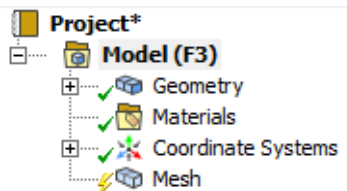


Figura 8.4 Árbol de opciones en Meshing.

En este árbol es de interés especialmente la sección *Mesh*. Inicialmente se define el tipo de elemento que se utilizará, es decir, la forma de los elementos que conformarán la malla.

8.4.1 MÉTODO

Lo primero que se debe realizar es establecer un control para el tipo de elementos que conformarán la malla. Para esto se debe insertar un método. Ver Figura 8.5. Este también define la forma en que los elementos se acoplarán a la geometría importada. [62]

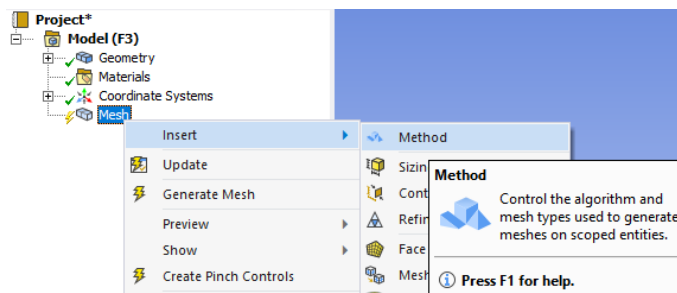


Figura 8.5 Inserción de método a la malla.

Luego de haber insertado el método, se debe definir la geometría en la cual será aplicado, para esto se selecciona todo el cuerpo. Además de esto, se establece el método como automático, esto hará que el software utilice varios tipos de elemento, seleccionado para cada zona el tipo que mejor se acople a esta [62]. Esto se hace en la parte de detalles que se despliega en la parte inferior izquierda. Ver Figura 8.6.

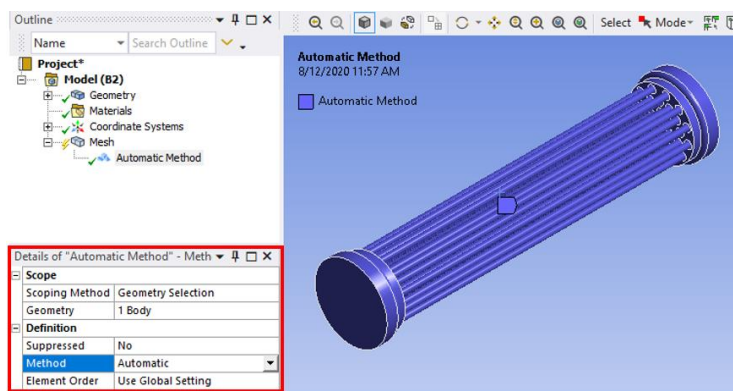


Figura 8.6 Detalle y configuración de método

8.4.2 DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS.

Una vez realizada esta configuración del método, se procede a crear controles para el tamaño de los elementos. Ya que la geometría tiene zonas donde la sección transversal es de un tamaño considerable, como lo es la entrada y la salida, y que existen zonas donde esta sección es de un área muy pequeña, como por ejemplo la zona del flujo que va por los tubos de recolección, se ha establecido que el tamaño de los elementos no será el mismo para toda la geometría. Se creará un control para las zonas con mayor volumen, y otro para las zonas del flujo que están dentro de los tubos de recolección. Para que esto sea posible se deben insertar dos dimensionamientos (*sizing*), el cual controla el tamaño de elementos, número de divisiones, y controles de estos en zonas específicas [62]. Ver Figura 8.7.

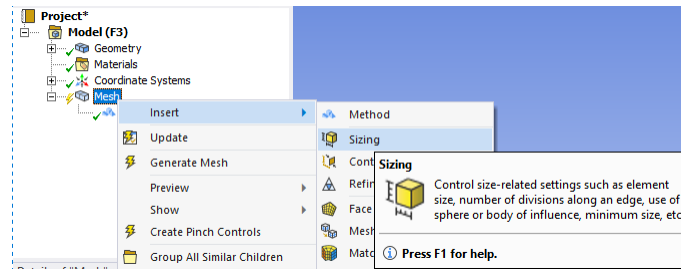


Figura 8.7 Inserción de *Sizing*.

El primer *sizing* se aplica sobre toda la geometría, seleccionando el cuerpo completo. Ver Figura 8.8. Por otro lado, el segundo *sizing*, se aplica sobre caras, seleccionando las caras de la geometría que estarían en contacto con los muros internos de los tubos de recolección. Ver Figura 8.9. En el cuadro de detalles, la celda *Geometry* muestra las zonas en las cuales se aplica el dimensionamiento, indicando si un cuerpo, borde o cara, ha sido seleccionado, junto con el número de estos. En el mismo cuadro, en la celda *Element size*, es donde se controla el tamaño de elemento deseado en la zona seleccionada. Se manejan elementos más grandes en las zonas con mayor volumen, es decir, el tamaño en *body sizing* debe ser mayor que en el *face sizing*.

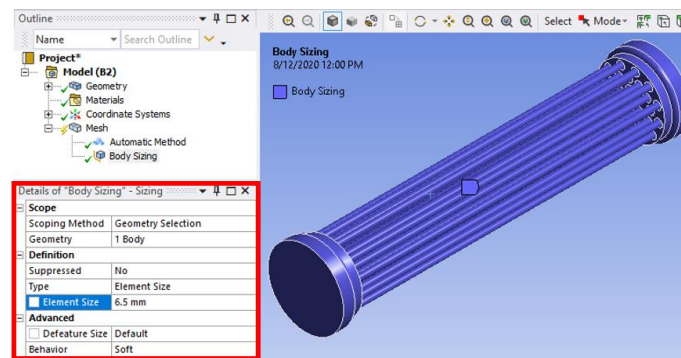


Figura 8.8 Detalle y configuración de *Body Sizing*

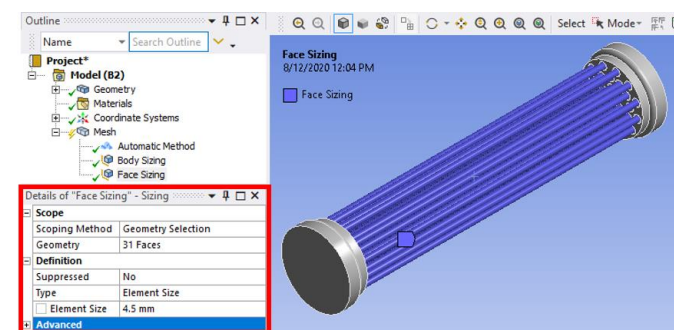


Figura 8.9 Detalle y configuración de *Face Sizing*

8.4.3 CAPAS LÍMITE

De acuerdo con lo mencionado en el capítulo sobre los principios básicos de comportamiento de flujos, se sabe que, en las paredes, es decir, en donde el flujo está en contacto con el precipitador, se presentan pérdidas de energía. De hecho, los perfiles de velocidad, según la teoría de mecánica de fluidos, son curvos, con su valor más alto en el centro de la sección por la cual se desplaza el fluido y con valor de cero en las paredes. Además de esto, en las zonas próximas a las paredes tiende a generarse más turbulencia, como lo es en el caso de la expansión y contracción súbita.

Debido a lo anterior, se requiere que se generen elementos más finos en las zonas cercanas a las paredes, especialmente aquellas en las que el fluido se desplaza de manera tangencial. Para esto existe la opción *inflation*, la cual crea capas límites en las secciones que se elijan. Esto quiere decir, que se crean capas de un espesor muy bajo que siguen el perfil de la geometría, para luego crear la malla y ser dividida en elementos muy pequeños [62]. Esto permite una mayor exactitud en cuanto al análisis realizado en las paredes y límites de la geometría. La inserción del *inflation* se lleva a cabo del mismo modo que se insertaron los métodos y el dimensionamiento.

En esta opción se debe definir tanto la geometría (cuerpo), como las caras o límites en donde se crearán estas capas límites. En el cuadro de detalles del *inflation* esto aparece como *geometry* y *boundaries* respectivamente. Ver Figura 8.10. Obsérvese que no todas las caras del volumen han sido seleccionadas, únicamente aquellas en donde el fluido se mueve tangencialmente, o tiene una componente tangencial, y que representan una distancia considerable en el movimiento del fluido. Las áreas marcadas de rojo representan las caras en las que se aplicará el *inflation*.

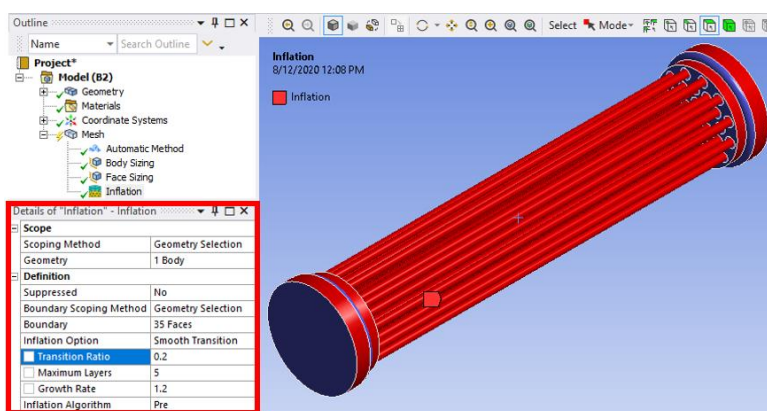


Figura 8.10 Detalles y selección de caras y cuerpo para *Inflation*.

8.4.4 MALLA GENERADA

Una vez se han insertado estos parámetros se procede a crear la malla, con lo cual se deberá mostrar el volumen ahora discretizado, dividido en pequeños elementos, tal cómo se muestra en la Figura 8.11. En esta figura se aprecia la malla creada (a), así como el efecto generado en esta debido a la inserción del *inflation*, generando las capas límite en el borde de la malla (b).

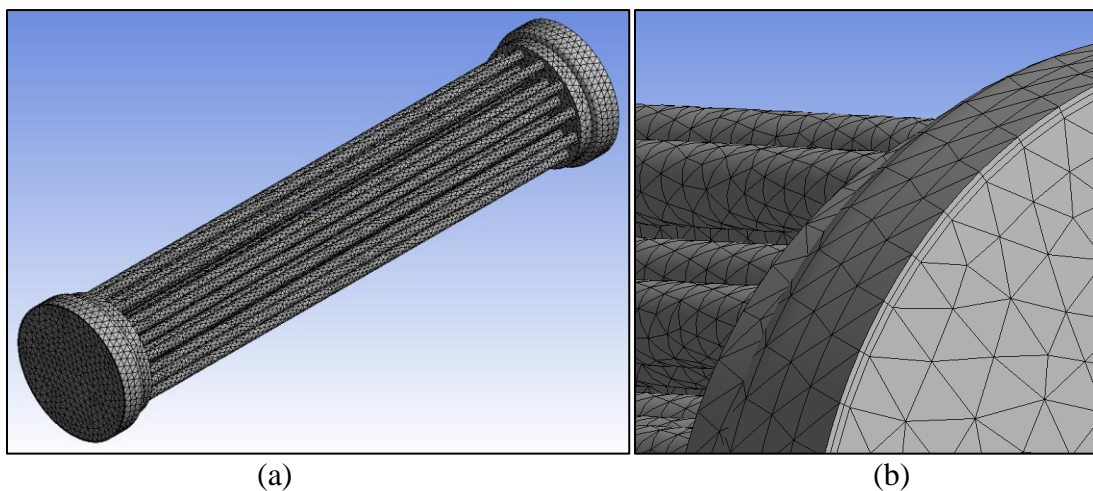


Figura 8.11 Malla generada. (a) vista general, (b) efecto *inflation*.

El cuadro de detalles de la malla, mostrado en la parte inferior izquierda, brinda toda la información necesaria acerca de la malla que ha sido creada. Tamaño de elementos, calidad de la malla, e incluso el número de elementos y nodos que conforman esta. Ver Figura 8.12. Este número de elementos será un factor importante en el estudio de independencia de malla.

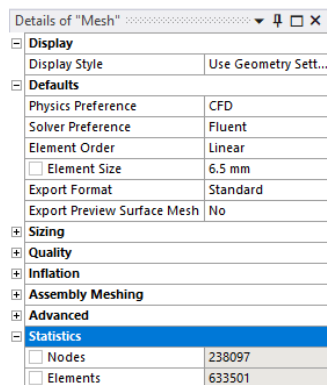


Figura 8.12 Información de la malla generada.

8.4.5 NOMBRAMIENTO DE LÍMITES

Se ha mencionado la importancia que tienen los límites en el volumen de control (entrada, salida y muros). Por esto, las caras que ejercerán el papel de estos límites deben ser nombradas, lo cual será de utilidad al momento de definir las condiciones de frontera.

Para lograr esto se seleccionan las caras que actuarán como el límite que se desea nombrar. Para hacerlo, se utiliza la opción *Create Named Selection* Ver Figura 8.13. En esta misma figura se muestra el recuadro en donde se asigna el nombre al área seleccionada, resaltada de color verde para poder identificarla.

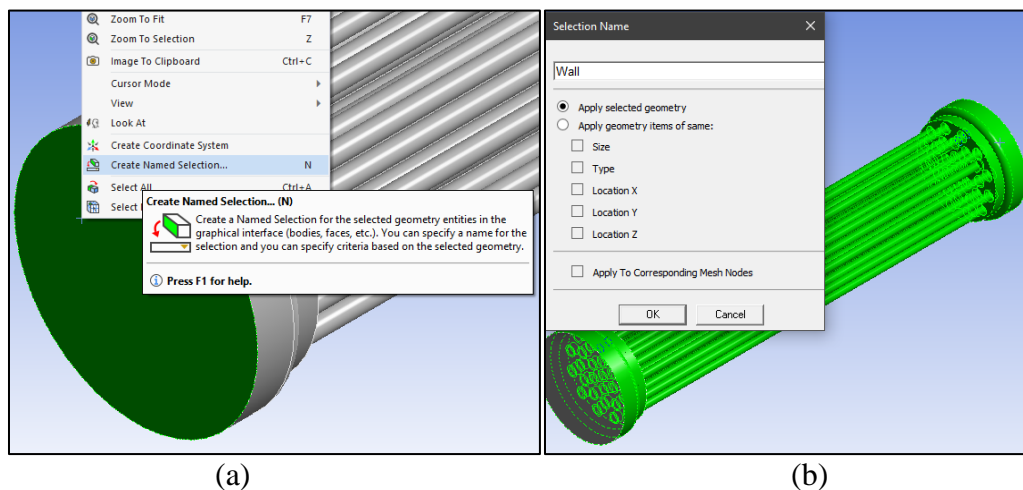


Figura 8.13 Nombramiento de límites. (a) Opción *Create Named Selection*, (b) recuadro de nombramiento.

Debido a la nomenclatura que maneja el software, las caras serán nombradas de la siguiente manera:

- Entrada: Inlet
- Salida: Outlet
- Muros (caras de contacto con el fluido): Wall

Estos nombramientos podrán verificarse y modificarse si es necesario. Con este paso realizado, se procede a realizar la preparación de los parámetros de simulación en el *Setup* del cuadro de Fluent puesto sobre la hoja de proyecto de Workbench.

8.5 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE FLUENT

Siguiente a la creación de la malla, se debe realizar la preparación de la simulación en la sección *Setup* del cuadro del módulo Fluent. En esta sección se establecen los parámetros con los cuales la simulación será realizada, es decir, estos van a definir el modelo matemático, el tipo de ecuaciones que se tendrán en cuenta, el material que se usará como fluido, condiciones de frontera, y demás aspectos que afectan el comportamiento del flujo.

Al abrir el *Setup* se ingresa propiamente a lo que es el software de simulación Fluent. Para entender las explicaciones posteriores es necesario saber cómo es el entorno de este. Ver Figura 8.14. El árbol que se muestra a la izquierda de la ventana es desde donde se van a definir todos los parámetros.

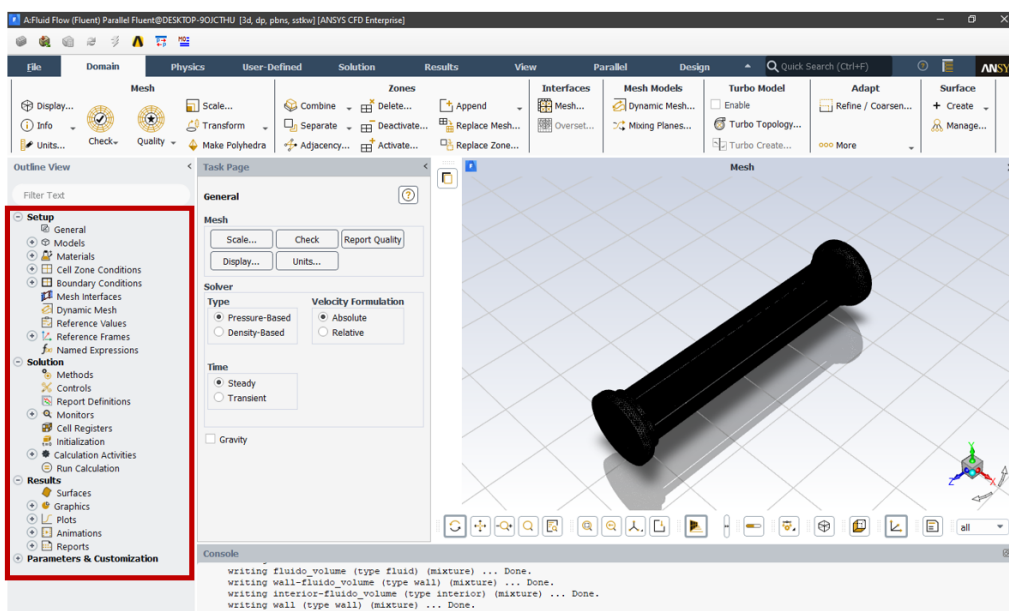


Figura 8.14 Entorno del solucionador Fluent

Se explicarán los parámetros de acuerdo con el orden que presenta el árbol de opciones mostrado en la figura.

8.5.1 SOLUCIONADOR

Observando el árbol de opciones, aparece inicialmente una sección llamada *Setup*, y dentro de esta la primera opción es llamada *General*. De hecho, la página de tareas de esta opción aparece inicialmente cuando Fluent es abierto. Ver Figura 8.15. Dentro de esta se remarca el cuadro *Solver*, en donde existen tres aspectos importantes a tratar. Estos aspectos son el tipo de solucionador, la formulación de la velocidad y el estado (estacionario o transitorio).

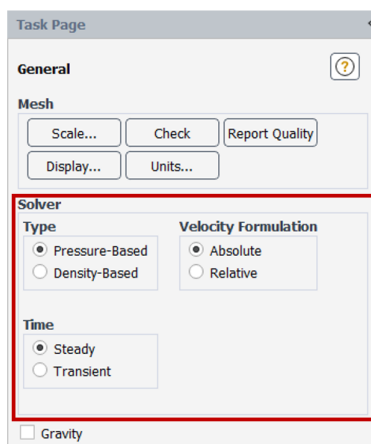


Figura 8.15 Página de tareas de la opción *General*.

El primer aspecto, tipo de solucionador, dependerá de si el flujo que se simulará será tratado como compresible o incompresible. Si el flujo es incompresible, entonces se usa la opción *Pressure-Based*, pues la presión, y los cambios en esta, no provocará cambios de densidad representativos en el flujo. Por otro lado, si es un flujo compresible se requiere la opción *Density-Based*, pues se requiere de ecuaciones y formulaciones que tenga en cuenta los cambios en la densidad ya que se vuelven representativos para el comportamiento del fluido [63]. Claramente conviene tener un flujo incompresible ya que su solución es más sencilla y requiere menor costo computacional.

Al tener un gas como fluido para el flujo a desarrollar, será la velocidad del fluido la que determine si este puede ser tratado como incompresible. De acuerdo a lo explicado en la sección 3.4, donde se habló acerca de los flujos compresibles, incompresibles y las aproximaciones que se pueden realizar, si la velocidad del flujo, con un gas como fluido, no supera en ningún momento el 30% de la velocidad del sonido en ese mismo fluido a las mismas condiciones, entonces puede ser tratado como incompresible. Básicamente, si $Ma < 0.3$, se usa la opción *Pressure-Based*. En caso contrario se debe utilizar *Density-Based*.

Como segundo aspecto se tiene la formulación de la velocidad. Este es mucho más sencillo, ya que, aunque este sistema esté implementado en un automóvil, y el precipitador se encuentre operando mientras el móvil esté en movimiento, todo el sistema se desplaza en conjunto. Esto quiere decir que, ya que ninguna parte se mueve o traslada más rápido que otra, la formulación de la velocidad puede ser tomada como absoluta.

Para el último aspecto, en todas las simulaciones que se corran, se supondrá estado estacionario. Esto se hace debido a que se analizará el sistema una vez se esté comportando de manera uniforme. Esto quiere decir que no se tendrán en cuenta los momentos en los que se da la primera entrada de gas al precipitador. Una vez este se haya establecido, se puede asumir que la entrada y salida de flujo másico es constante, por lo que el estado estacionario se puede asumir. La recolección de partículas afecta el flujo másico en menos del 0.4% del flujo total y se da en un área de recolección amplia, por lo cual tampoco afecta el flujo de manera significativa.

En la Figura 8.15 se observa, justo debajo del cuadro *Solver*, la opción de tener en cuenta los efectos de la gravedad. Ya que en este sistema se está tratando con un gas como fluido debido a su baja densidad, los efectos de la gravedad son mínimos y pueden ser fácilmente despreciables.

8.5.2 MODELO

Como segundo en la lista de parámetros a definir está la casilla *Models*. Esta permite definir los fenómenos físicos que se tendrán en cuenta en el flujo [63]. Al desplegar esta casilla, se muestran varias opciones para describir estos fenómenos. Ver Figura 8.16. A excepción de la opción *Viscous*, todas pueden ser deshabilitadas o habilitadas según corresponda al sistema.

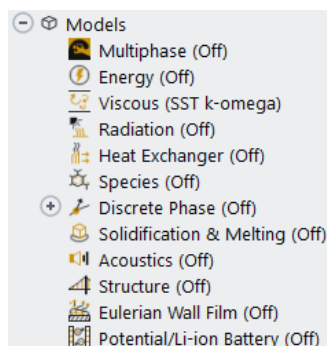


Figura 8.16 Modelos disponibles para la simulación.

En términos generales, el único modelo que se debe habilitar para la simulación correspondiente a este proyecto es el de energía (*Energy*). Esto se hace ya que en el precipitador se da un cambio representativo de la temperatura del fluido entre la entrada y la salida, lo cual afecta la energía interna del fluido ya que esta depende en gran parte de la temperatura.

No se presentan cambios de fase, radiación, transferencias de calor, fenómeno de goteo y burbujas, solidificaciones o derretimientos, fenómenos acústicos, tampoco se planea simular ningún proceso de combustión ni de baterías, por esta razón, los demás modelos no son necesarios en el desarrollo de la simulación.

Por otro lado, para el modelo de turbulencia, el cual corresponde a la casilla *Viscous*, se deben tener en cuenta varios detalles. Los flujos turbulentos están caracterizados por un campo de velocidad fluctuante, esta mezcla fluctuante transporta cantidades tales como momento, energía, y concentración de especies, y genera que las cantidades transportadas también fluctúen. Debido a que estas fluctuaciones pueden ser muy pequeñas y de alta frecuencia, se requiere un costo computacional muy alto para realizar simulaciones en cálculos prácticos de la ingeniería. En lugar de esto, las ecuaciones instantáneas que gobiernan las simulaciones pueden ser manipuladas usando tiempos promedio, conjuntos, y otras maneras que permitan remover la resolución de escalas pequeñas, dando como resultado un grupo modificado de ecuaciones que son computacionalmente menos costosas de resolver. Aun así, las ecuaciones resultantes contienen variables adicionales desconocidas, por lo que son necesarios los modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de cantidades conocidas [63].

No existe un modelo de turbulencia que sea universal para todos los tipos de problemas. La elección dependerá de consideraciones como las físicas abarcadas en el problema, la práctica establecida para algunos tipos de problemas, el nivel de exactitud requerido, el recurso computacional disponible, y la cantidad de tiempo disponible [63]. Las opciones posibles para seleccionar como modelo se pueden ver en la Figura 8.17. No se entrará en detalles acerca de cada uno de los modelos, pues con esto se entraría muy a fondo en cómo se tratan las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el comportamiento de fluidos, lo cual no es objetivo del proyecto.

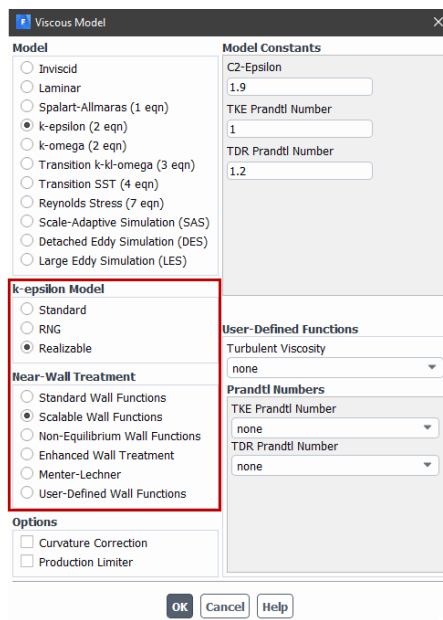


Figura 8.17 Modelos de turbulencia aplicables – Configuración de *k-epsilon*.

El modelo que se usará para la simulación de este proyecto es *k-epsilon*. Es un modelo basado en ecuaciones RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) en donde utiliza valores promedios y reduce sustancialmente el costo computacional, los cuales son ampliamente usado para aplicaciones prácticas en ingeniería [63]. Existen otros modelos que se basan en las ecuaciones RANS, pero estos son más usados para transiciones, por ejemplo, de flujo laminar a turbulento, o para un mejor análisis cerca a los límites (muros), lo cual también se puede lograr con este modelo seleccionado al implementar la condición de *inflation* en el enmallado. En la Figura 8.17, dentro del recuadro rojo, se observa que hay varios modelos *k-epsilon*. Entre estos se escoge el modelo *Realizable*, término que se da porque cumple ciertas restricciones de los tensores de Reynolds, en consonancia con la física de los flujos turbulentos, que los otros dos modelos no cumplen [63], y representa más exactitud.

Por otro lado, el siguiente recuadro hace referencia a funciones que permitirán usar una malla más fina cerca a los muros para tener mejor detalle de estas zonas. Se hace especialmente en el modelo *k-epsilon* ya que este es normalmente mejor para tratar zonas lejanas a los muros. La opción *Scalable Wall Function* se asegura de que la variable que controla el adecuado funcionamiento de estas funciones se mantenga en valores apropiados.

8.5.3 MATERIAL

En la casilla de materiales, que se divide en fluidos y sólidos (ver Figura 8.18), se encuentra el listado de materiales disponibles a usar como sustancia en el flujo. Se pueden añadir materiales de un listado largo disponible en la base de datos de Fluent.

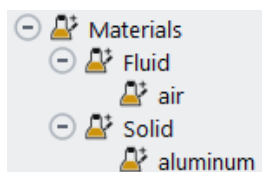


Figura 8.18 Materiales disponibles.

Como material se utilizará aire en primera instancia. Los sistemas en los que se usan gases de combustión suelen tratarse con aire como fluido, esto debido a que los gases, en condiciones normales de operación, es decir, sin que se vean sometidos a temperaturas extremas, combinación de sustancias o transferencias de calor, tienen un comportamiento similar al aire. Posteriormente se utilizará una composición de los principales elementos que se encuentran en los gases de escape, con el fin de comparar el comportamiento y verificar si se generan cambios representativos en los resultados.

Los materiales se pueden editar para que su densidad sea tratada de diferentes modos, así como sus propiedades. La sustancia con la cual se realice la simulación, aire o mezcla de gases, será tratada como gas ideal. Ver Figura 8.19. Esta aproximación suele utilizarse ampliamente en aplicaciones de ingeniería, especialmente cuando el flujo es tratado como incompresible.

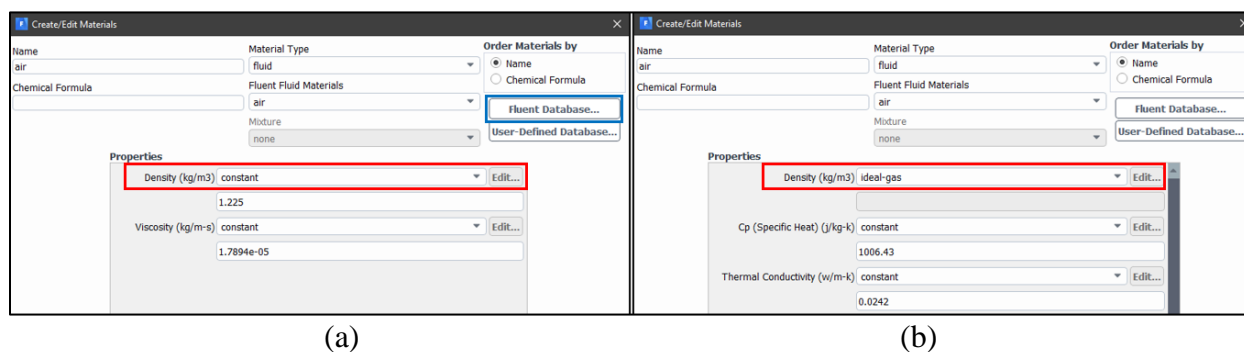


Figura 8.19 Edición de material. (a) densidad constante, (b) densidad como gas ideal.

Se puede apreciar cómo se realiza el cambio de la forma en que la densidad del gas será tratada (recuadros rojos). Además de esto, en el recuadro azul, se encuentra la opción que permite inspeccionar la base de datos de Fluent para agregar materiales, lo cual será de utilidad al momento de definir la mezcla que forma los gases de combustión.

8.5.4 CONDICIONES DE FRONTERA

Siguiente a los materiales, se deben definir las condiciones de frontera, las cuales serán cruciales en el comportamiento del flujo. Para este proceso se usarán las secciones nombradas que se establecieron en el apartado 8.4.5, entrada, salida y muros. En los dos primeros se tiene información acerca de la velocidad del flujo (entrada) y de la presión de operación (salida), junto con las temperaturas en ambas zonas. En cuanto a los muros se establecerá condición de no deslizamiento. Estas configuraciones se establecen en las casillas *Cell Zone Conditions* y *Boundary Conditions*. Ver Figura 8.20

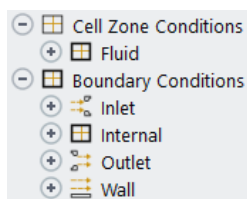


Figura 8.20 Casillas para configuración de condiciones de operación y de frontera.

En la primera, *Cell Zone Conditions*, se establece la presión de operación en la opción *Operating Conditions*. Ver Figura 8.21. La presión de operación debería ser la presión atmosférica, pero ya

que las ecuaciones de gases ideales requieren que se trabaje con presiones absolutas, esta se establece como cero.

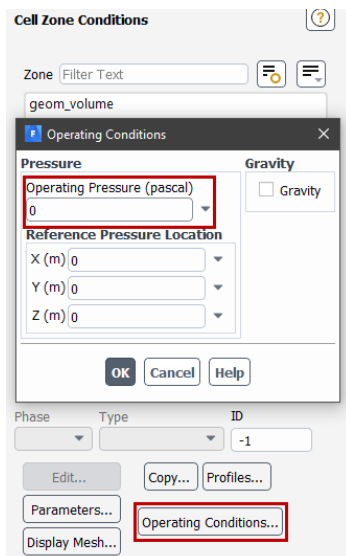


Figura 8.21 Condiciones de operación.

Por otro lado, en la sub-casilla llamada *Fluid*, se puede comprobar que el volumen de control tiene aire, o el material que se desee, como sustancia a tratar. Ver Figura 8.22.

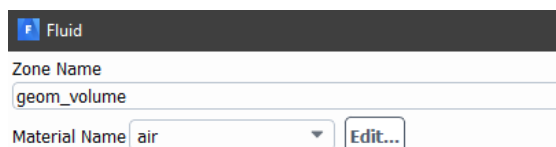
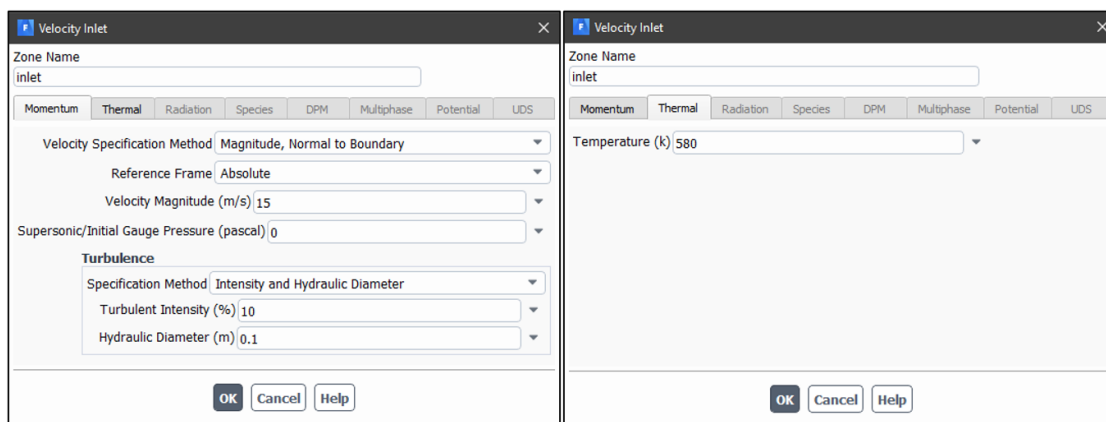


Figura 8.22 Sustancia en el volumen de control - selección.

Ahora se procede a definir las condiciones de frontera en la casilla *Boundary Conditions*. Para las condiciones de entrada se selecciona *Inlet* con lo cual se despliega la ventana para definir sus parámetros. Ver Figura 8.23. En esta zona se conoce la velocidad del flujo, se establece entonces el valor de esta, y se especifica además el método de turbulencia (*Turbulence / Specification Method*). En donde se escoge la opción *Intensity and Hydraulic Diameter*.



(a)

(b)

Figura 8.23 Condiciones de entrada. (a) Velocidad, (b) Temperatura.

La intensidad de la turbulencia siempre se manejará como 10%. Se suelen manejar valores entre 1 y 10% dependiendo del sistema. Un valor por encima de este sería considerado muy alto, poco común en flujos, y valores menores a 1% solo serían posibles en situaciones como túneles de viento de baja turbulencia [63]. En flujos con número de Reynolds muy alto o en secciones que presenten zonas de turbulencia, como lo es el sistema que se está tratando ya que tiene cambios súbitos de área, se puede manejar 10% sin ningún inconveniente. El valor del diámetro hidráulico, ya que la sección transversal del modelo a tratar es circular, es el mismo diámetro de entrada. Dentro de la misma ventana, en la etiqueta *Thermal*, se establece la temperatura del fluido en esta zona. Debe estar en Kelvin.

Se realiza el mismo procedimiento para las condiciones de salida seleccionando *Outlet*. Ya que en las condiciones de operación se dejó establecida una presión de cero, debido a requerimiento por el tratamiento de gases ideales que hace Fluent, se debe entonces en esta ventana establecer el valor que tiene la presión atmosférica, equivalente a la presión de salida. Ver Figura 8.24. Los valores en el cuadro de turbulencia, así como la temperatura, se establecen de la misma forma que a la entrada.

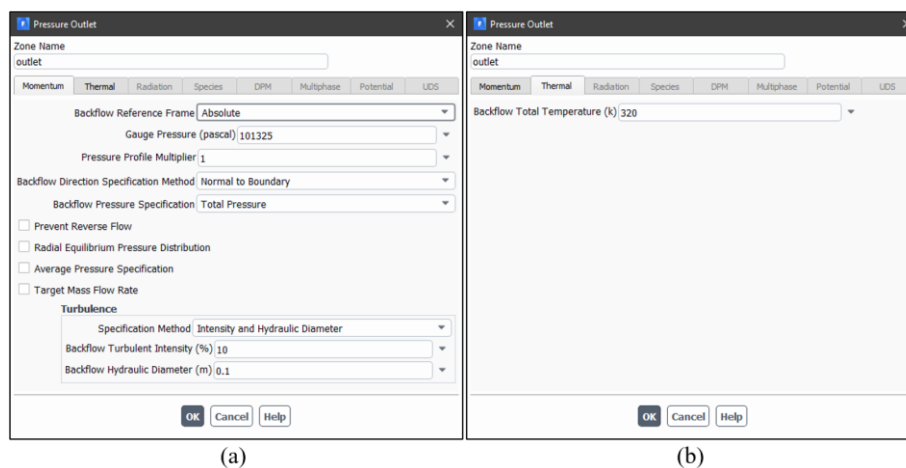


Figura 8.24 Condiciones de salida. (a) Velocidad, (b) Temperatura.

Se procede con la configuración de *Wall*. En esta sección se establece la condición de no deslizamiento. Para esto se escoge *Stationary Wall* en el cuadro *Wall Motion*, y se selecciona *No Slip* en el cuadro *Shear Condition*. Ver Figura 8.25. Con la opción del primer recuadro, se está diciendo que el muro no se desplaza, pues este no tiene movimiento respecto al sistema de escape de gases. Con el segundo se dice que no hay deslizamiento del fluido en las paredes, es decir, la velocidad del flujo en este punto es cero. Los demás valores se dejan como aparecen por defecto.

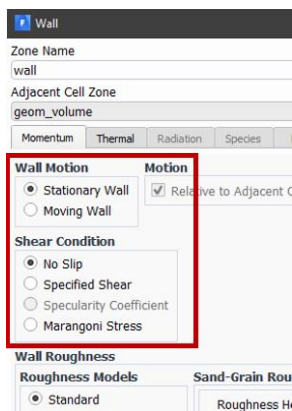


Figura 8.25 Condición de no deslizamiento en los muros.

A cada uno de los límites, *Inlet*, *Outlet* y *Wall*, se le puede modificar el tipo de límite que es, es decir, si se conociera la velocidad o el flujo másico a la salida y presión a la entrada, podría cambiarse sin ningún problema. Los muros también podrían funcionar como una salida o entrada de diferente tipo (presión, velocidad, flujo másico, etc.).

8.5.5 MÉTODO DE SOLUCIÓN

Establecidas las condiciones de frontera se procede a la opción *Methods* del conjunto *Solution* en el árbol a la izquierda de la ventana. Desde esta sección se definirá cómo serán tratadas las ecuaciones en el análisis y resolución del sistema. Ver Figura 8.26.

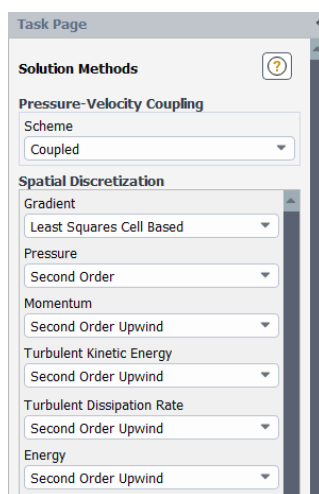


Figura 8.26 Métodos de solución

Lo primero que se define es el acoplamiento velocidad-presión (*Pressure-Velocity Coupling*) donde se selecciona la opción *Coupled*, pues esta resuelve las ecuaciones de momento y de corrección de presión de manera acoplada, a diferencia de los otros métodos en los que se hace por segregación, es decir, de forma separada [63]. Con esto se obtiene una fase de implementación más robusta y eficiente lo cual representa más exactitud.

Posterior a este acoplamiento, se define la discretización espacial (*Spatial Discretization*). Esto nos es más que el orden que tendrán las ecuaciones de cada una de las cantidades tratadas y cómo varía el gradiente entre las celdas o elementos que conforman la malla. De manera general el gradiente es escogido como *Least Squares Cell Based*, pues dentro de las tres opciones existentes

esta proporciona, cuando se trata de mallas irregulares, una exactitud alta sin aumentar demasiado el costo computacional [63].

Para las ecuaciones de las cantidades mostradas, se establecen todas como de segundo orden. Esto se hace debido a que la dirección del flujo no está alineada con los elementos de la malla ya que esta es muy irregular, por lo cual ecuaciones de primer orden aumentarían mucho el error en la discretización numérica [63]. Con ecuaciones de segundo orden se tienen resultados más exactos.

8.5.6 CRITERIOS DE CONVERGENCIA E ITERACIONES

Luego de que se ha definido el método de solución, y antes del inicio de la simulación, se deben revisar los parámetros de convergencia que se tendrán en cuenta para el desarrollo de esta. La simulación se realiza repetidas veces, estas son las iteraciones. Cada cierto número de iteraciones, controlado por quien ejecuta el programa, se genera un reporte de estas que se muestran como residuales. Estos muestran el error que existe al hacer una comparación de los valores que se obtienen en la iteración actual con la inmediatamente anterior. Cuando este error esté por debajo de valores establecidos para todas las cantidades analizadas, entonces se llega a la convergencia. Es importante que esta se logre, ya que, al presentarse variaciones mínimas en los resultados, se puede decir, que estos son confiables y con una exactitud aceptable.

En la opción *Monitors / Residual* Se puede controlar el valor que se establece como criterio para la convergencia. Ver Figura 8.27. Estos valores son absolutos y no porcentuales.

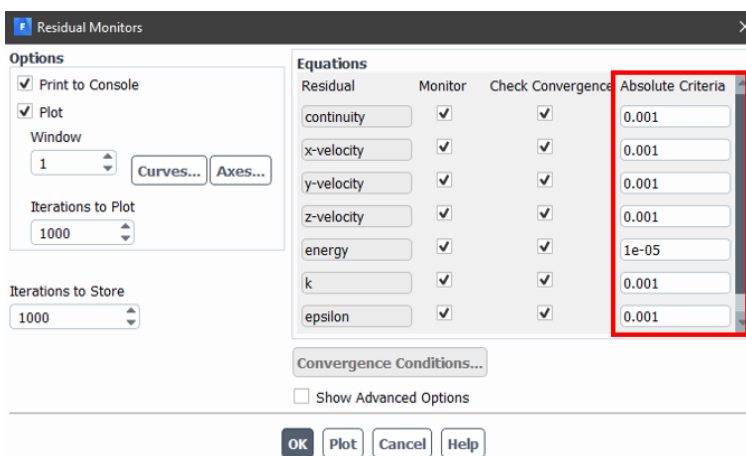


Figura 8.27 Criterios absolutos de convergencia.

Una vez que se han establecido los valores para la convergencia, se procede a iniciar la simulación. En *Initialization* se da a la opción *Initialize*, con lo cual los valores iniciales de las variables son puestos y la solución, por tanto, se desarrolla con dichos valores [63]. Ver Figura 8.28-(a). Luego en *Run Calculation* se establece el número de iteraciones máxima, hasta donde se realizarán en caso de no lograr antes la convergencia, y se inicia con la opción *Calculate*. Ver Figura 8.28-(b). Con la opción *Check Case* se puede comprobar que no existan problemas o inconsistencias con los parámetros de preparación escogidos.

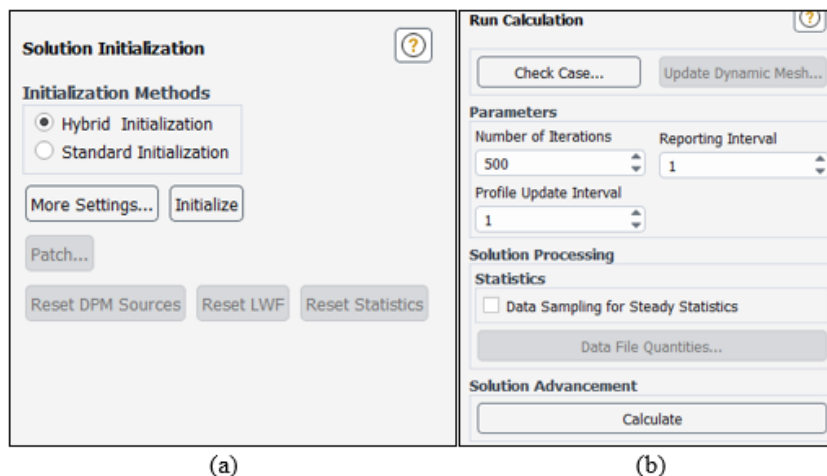


Figura 8.28 Inicio de la simulación.

Si los parámetros se han establecido de manera correcta para el sistema tratado en este proyecto, la gráfica de residuales debería comportarse de manera similar a lo mostrado en la Figura 8.29. Esto quiere decir que deben presentar un comportamiento decreciente, según la escala logarítmica del eje vertical.

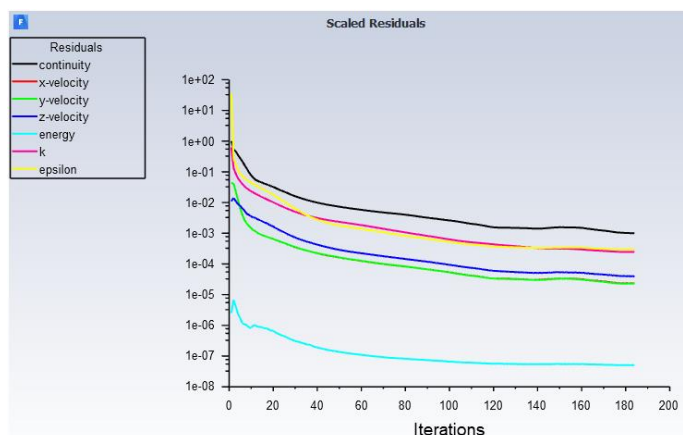


Figura 8.29 Ejemplo de residuales.

Una vez que se ha logrado la convergencia entonces se pueden analizar los resultados de la simulación. En este proyecto se analizará inicialmente la presión luego de cada simulación para comprobar que exista una diferencia positiva entre las presiones de entrada y salida. Luego se procederá a analizar demás variables con el fin de confirmar si los resultados son consistentes. Teniendo esto claro se procede con la simulación del diseño CAD del precipitador propuesto.

8.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Todos los parámetros necesarios tanto para el enmallado como para la configuración del módulo en donde se lleva a cabo la solución han sido explicados, de modo que se entiende la razón de la selección de los parámetros establecidos, justificando a través de la teoría de la mecánica de fluidos, y de la información prevista por los desarrolladores del software, dicha selección.

- El entendimiento del proceso permite reconocer las partes de este en donde se pudieran estar generando inconsistencias o fallas para el desarrollo de la simulación. A partir de esto, para simulaciones que se desarrollen se recomienda siempre tener en cuenta cada uno de los pasos y realizar una revisión de los parámetros antes de iniciar cada prueba.
- El proceso explicado en este capítulo se tendrá en cuenta y se llevará a cabo en cada una de las simulaciones que se desarrollen a partir de este punto. Cualquier modificación que se realice en la selección de parámetros será mencionada, y de ser necesario, se realizará la explicación necesaria de los criterios, pasos y selección que se deban desarrollar particularmente en alguna simulación.
- Finalmente, teniendo claro lo anterior, los siguientes capítulos estarán destinados exclusivamente al desarrollo de las simulaciones que se llevaron a cabo durante el proyecto, así como a la presentación de los resultados generados por estas.

CAPÍTULO 9

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS CON DISEÑO PROPUESTO

9.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata sobre la simulación realizada al flujo que se da para el modelo CAD del precipitador propuesto. Se mencionarán cuáles serán las variables de análisis y la razón para tenerlas en cuenta, seguido del comportamiento que se espera de la variación de la velocidad y la presión dentro del filtro. También, se establecen los valores iniciales con los que se manejará la simulación, junto con una verificación acerca del tratamiento que se le puede dar al flujo en términos de compresibilidad. Posteriormente se exponen los resultados de la simulación, se hace una verificación de la validez de estos, y se analizan los datos obtenidos

9.2 VARIABLES Y COMPORTAMIENTO ESPERADO

Se deben tener claras las variables que se analizarán al terminar las simulaciones ya que estas determinarán si el comportamiento y las variaciones se presentan de forma consistente, por esto, se hace una revisión previa a la simulación, a estas variables.

9.2.1 VARIABLES DE ANÁLISIS

Para el análisis de este sistema se deben tener claras las variables o magnitudes que son fundamentales para el comportamiento del fluido. Este grupo de variables se conforma por: presión, velocidad, diámetro (de la sección en donde el fluido esté fluyendo) y temperatura.

- **Presión:** es la magnitud principal, ya que es la del objeto de investigación de este proyecto. Más importante aún, es observar el delta de presión que se pueda generar entre la entrada y la salida del filtro. Este valor debe ser positivo ya que de lo contrario se generaría flujo en reversa o contrapresión.
- **Velocidad:** la variación de la velocidad, así como su valor máximo presente dentro del filtro ayudará a determinar si el flujo puede ser tomado como incompresible. Por esto se deben revisar sus valores durante el desarrollo de la simulación.
- **Diámetro:** relacionada a la anterior debido a que el flujo másico se mantiene constante, lo que significa que cambios en la sección afectarán la velocidad. En la sección de los tubos de recolección se deben tener en cuenta las áreas transversales de todos los tubos que la conforman.
- **Temperatura:** si bien esta no es una variable que afecte en mayor proporción el comportamiento del flujo, aun así, se debe verificar que el cambio de esta se da entre los valores establecidos en el software.

9.2.2 COMPORTAMIENTO ESPERADO

El comportamiento que tendrá el flujo se puede predecir analizando los cambios en las formas de energía. Los cambios de velocidad a lo largo del precipitador se presentarán inevitablemente ya que hay cambios de sección. En los momentos que esta aumente, según la ecuación de la energía, la presión disminuirá para que la energía total se mantenga, además de esto a medida que avanza el flujo la presión deberá disminuir, esto provocado por pérdidas de energía por fricción. Teniendo esto en cuenta, se puede hacer una hipótesis acerca de la forma que seguirá la gráfica, tanto para la presión como para la velocidad a lo largo del precipitador.

Supóngase que se realiza la gráfica siguiendo puntos que recorran una línea que atraviesa el precipitador en la misma dirección del flujo, y que se ubica justo en el centro de este, teniendo en cuenta un análisis básico de la ecuación de la energía. La gráfica resultante debería tener una forma similar a como se presenta en la Figura 9.1. En esta figura se evidencian los puntos en los que se presentan cambios de sección, es decir, contracción y expansión súbita, puntos en los cuales se deben presentar las mayores variaciones tanto de la presión como de la velocidad.

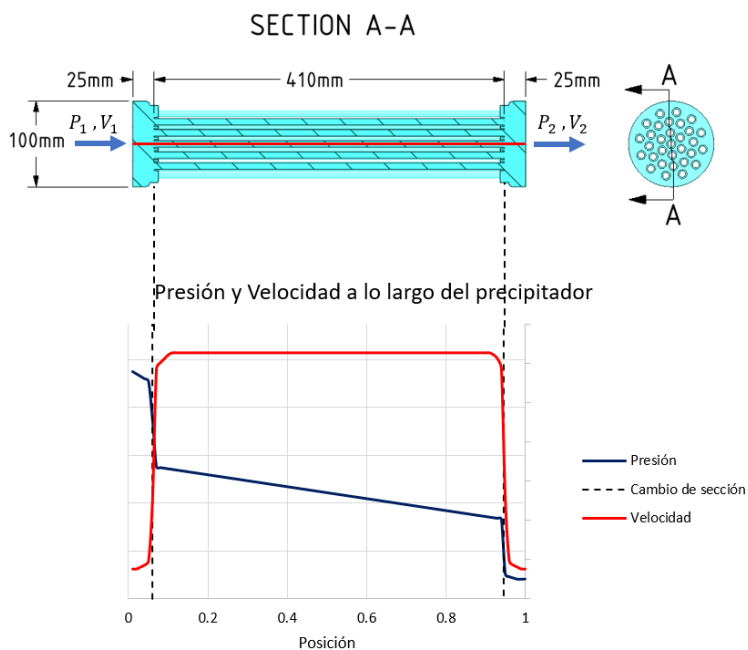


Figura 9.1 Comportamiento esperado de presión y velocidad.

Este comportamiento se revisa luego de cada una de las simulaciones desarrolladas ya que son el primer criterio de análisis para determinar si el flujo se está comportando de manera esperada. También se debe verificar que el valor de velocidad no supere el límite de 0.3Ma establecido, con lo cual se confirma que el tipo de solucionador utilizado haya sido el correcto.

9.3 ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA

Si bien los resultados con una malla de cierto número de elementos pueden ser consistentes, estos normalmente varían al cambiar el número de elementos, por lo que las mallas con más elementos (más finas) presentarán resultados más exactos. Lo que se pretende con el estudio de independencia de malla es encontrar una malla con tal número de elementos de manera que los resultados no varíen significativamente si se aumenta la calidad de esta, de modo que dicha variación sea despreciable y se pueda confiar en los resultados generados a través de la malla seleccionada.

Para esto se establece alguna magnitud que funcione como referencia para realizar la medición en cuanto a la variación de resultados entre una malla y otra. Ya que la variable de estudio de este proyecto es la presión, se utilizará la diferencia de presión existente entre la entrada y la salida del flujo como criterio de independencia de malla. Para esto también se debe establecer un valor de error admisible, es decir, el error máximo que pueden presentar los resultados entre una malla y otra, para considerar que los resultados están presentando variaciones despreciables. Para este proyecto, el valor criterio se establece como 5%. Se comparan las diferencias de presiones entre

entrada y salida existentes en diferentes simulaciones realizadas con mallas de diferente número de elementos hasta que se encuentre un número apropiado de elementos con el cual trabajar.

9.3.1 MALLAS CREADAS

Después de varias pruebas realizadas en el software, y a partir de las mismas recomendaciones de ANSYS acerca de la calidad de la malla, se escoge una malla inicial de aproximadamente 500.000 elementos. Se generan un total de 5 enmallados con una diferencia de número elementos entre cada enmallado de cerca de 500.000. El número exacto de elementos en cada malla generada y la numeración respectiva que se le da a cada una se muestra en la Tabla 9.1.

Malla	Número de elementos
1	519,000
2	1'006,000
3	1'495,000
4	2'044,000
5	2'529,000

Tabla 9.1 Número de elementos de las mallas a tratar.

Los únicos parámetros que varían en la creación de las mallas son los *Sizing* (*Body sizing* y *Face sizing*) insertados en el entorno *Mesh*. Parámetros como *Method* e *Inflation* se mantuvieron iguales para todas las mallas. En cuanto a los parámetros de simulación, estos también se mantienen iguales para todas las mallas. La variación de alguno de estos parámetros en mallas de diferentes elementos ocasionaría que el estudio de independencia de malla sea infructuoso.

9.3.2 DATOS DE ENTRADA

Para este estudio se decidió trabajar con una de entrada menor, es decir, menor flujo másico. Esto se hace debido a que una menor velocidad genera menos turbulencia y así la simulación se lleve a cabo en un menor tiempo. Debido a la cantidad de mallas, es crucial para el proyecto que el tiempo de simulación sea corto. La reducción de este valor no afecta el estudio de independencia de malla, pues el valor de velocidad que se escoge se tratará en todas las mallas. Además, ya que la selección de la malla se realiza con un criterio porcentual a partir de la diferencia de resultados entre mallas, y no con valores específicos de magnitudes, se puede hacer el cambio de este parámetro.

La presión de operación se establece como la presión atmosférica a nivel del mar. Los valores de temperaturas de entrada y salida, aunque en el entorno de Fluent son requeridos en Kelvin, se muestran en grados Celsius para una idea más clara de sus magnitudes. Se utiliza aire como sustancia según lo explicado en el apartado 8.5.3. Estos valores se pueden ver en la Tabla 9.2.

Magnitud	Valor	Unidades
Flujo volumétrico	0.04712	m^3/s
Diámetro entrada	0.10	m^2
Velocidad de entrada	6.00	m/s
Presión	101,325	Pa
Temperatura entrada	306.85	$^{\circ}C$
Temperatura salida	46.85	$^{\circ}C$

Tabla 9.2 Datos de entrada para estudio de independencia de malla.

Una vez se lleva a cabo la simulación con todas las mallas, se debe comparar el delta de presión que existe en cada una. Si no se presentan diferencias de resultados menores al 5 % entre mallas, se deberán crear mallas más finas.

9.3.3 RESULTADOS DEL ESTUDIO

La simulación de las mallas propuestas se lleva a cabo de manera exitosa en donde todas alcanzan la convergencia. La revisión de las variables se realiza para cada una de las mallas comprobando que los resultados sean consistentes y presenten la tendencia mostrada en la Figura 9.1.

En este apartado solo se revisa la variación de la presión, ya que, esta es la variable crítica de estudio que se ha escogido para definir la selección de la malla con la cual se continuará trabajando. Para esto se llevan todos los resultados de las mallas a un mismo post procesador, de modo que se puedan analizar los datos en conjunto. Se genera una línea media que atraviesa el precipitador de manera axial, y sobre la cual se analizará la variación de presión. Esta línea se puede apreciar en la

Figura 9.2. Sobre esta línea se analiza el comportamiento, generando una gráfica en donde se logra apreciar la variación de la presión que se da en cada uno de los casos. Ver Figura 9.3.

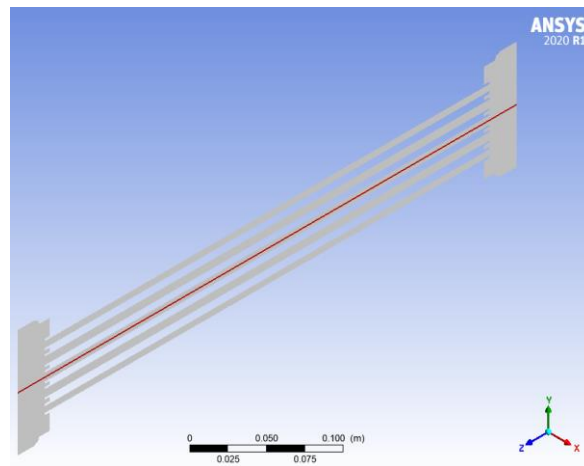


Figura 9.2 Línea media para observación de variación de magnitudes.

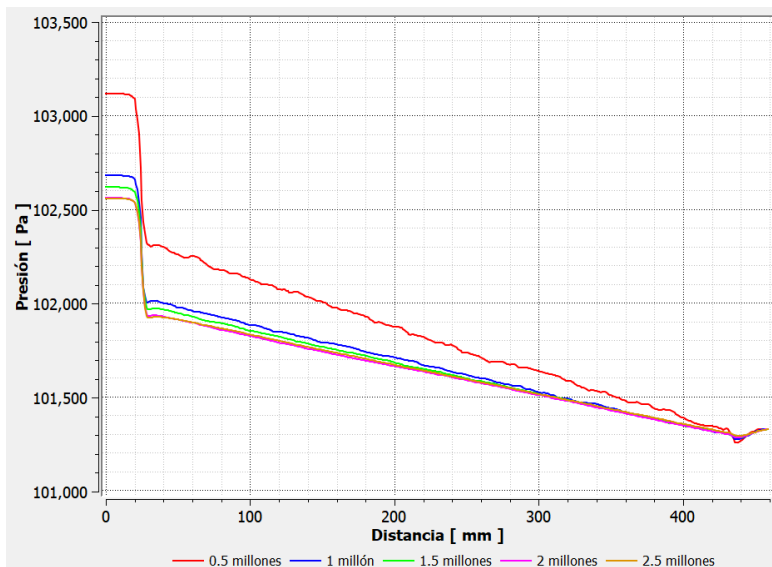


Figura 9.3 Presión en línea media sobre diferentes mallas.

A partir de esta gráfica se pueden mencionar varios puntos. Primero, el comportamiento de la presión es similar en todos los casos, asemejándose al comportamiento esperado. También se puede apreciar que existe variación en las presiones que se generan a la entrada. La presión de salida se da igual para todos los casos ya que es una condición de frontera. Nótese que la diferencia que existe entre las líneas se reduce al aumentar el número de elementos de la malla, lo que hace que las dos mallas más finas, 2 y 2.5 millones de elementos, se observen casi una encima de la otra lo que indica que la diferencia entre los valores presentados en esta debe ser muy baja.

Para obtener el porcentaje de variación, primero se genera una tabla con los valores de presión a la entrada y salida en cada uno de los casos, junto con la diferencia que se presenta entre estos. Ver Tabla 9.3

Malla	Número de elementos (millones)	Presión de entrada [Pa]	Presión de salida [Pa]	Delta de presión [Pa]
1	0.5	103132	101325	1807
2	1.0	102695	101325	1370
3	1.5	102632	101325	1307
4	2.0	102575	101325	1250
5	2.5	102572	101325	1247

Tabla 9.3 Presiones entrada, salida y diferencia de presión.

Para obtener el error existente entre las mallas estas se comparan cada una con la malla consecutiva correspondiente, según el orden establecido de acuerdo con el número de elementos. Para calcular el error se usa la ecuación (9-1). De modo que se obtienen los errores mostrados en la Tabla 9.4.

$$E = \frac{\Delta P_i - \Delta P_{i+1}}{\Delta P_{i+1}} \quad (9-1)$$

Donde ΔP_i es el delta de presión en la malla correspondiente.

Mallas	1-2	2-3	3-4	4-5
Error absoluto	0.3190	0.0482	0.0456	0.0024
Error porcentual	31.90%	4.82%	4.56%	0.24%

Tabla 9.4 Errores calculados entre mallas.

9.3.4 SELECCIÓN DE LA MALLA

Los errores mostrados en la Tabla 9.4 presentan valores menores al 5%, lo cual significa que no se requiere de la creación y simulación de mallas adicionales ya que la independencia de malla ya se ha logrado. La malla número 1 se descarta pues el error que genera entre esta y la malla siguiente es de 31.9%, superando al límite.

En la tabla se aprecia que la diferencia entre la malla 2 y 3 es del 4.82 %, lo que quiere decir que se cumple con el criterio y desde ese punto se podría trabajar con la malla número 2, la cual corresponde a 1 millón de elementos. Aun así, al comparar la malla 3 y 4 se genera un porcentaje, que, aunque está por debajo del valor criterio, se acerca a dicho valor, lo que podría representar que entre la malla 2 y 4 se da un cambio representativo. Para entender mejor esto, se calcula el error entre estas dos mallas.

$$E_{24} = \frac{1370 - 1250}{1250} = 0.0960$$

Se añade esta información a la tabla para mejor apreciación. Se elimina el error entre las dos primeras mallas, ya que la malla número 1 ya fue descartada. Ver Tabla 9.5.

Mallas	2-3	3-4	2-4	4-5
Error absoluto	0.0482	0.0456	0.0960	0.0024
Error porcentual	4.82%	4.56%	9.60%	0.24%

Tabla 9.5 Errores entre mallas - modificación.

Aparece en la tabla un nuevo valor que indica que el error entre la malla 2 y 4 es de 9.60 %, casi el doble del porcentaje límite. Si bien una primera comparación indicaba que la malla 2 era aceptable, al realizar una segunda revisión esta se descarta. Si se realiza el mismo procedimiento entre la malla 3 y 5 esto dará que sigue estando por debajo del límite. Por otro lado, el error entre las dos últimas mallas creadas es de tan solo 0.24 %. Esto explica la poca variación apreciable en la gráfica presentada en la Figura 9.3. Todo esto indica que las mallas 3, 4 y 5 pueden ser utilizadas.

Se busca una malla que proporcione resultados confiables, teniendo en cuenta que el número de elementos no puede aumentar demasiado debido al costo computacional, el cual se aumenta al aumentar el número de elementos tratados en la malla. Con esto presente, se decide trabajar con la malla 4, de aproximadamente 2 millones de elementos. Si bien la malla 3 cumple con el criterio, el error entre esta y la siguiente está muy cerca al límite, mientras que entre la malla 4 y 5 está bastante alejado de este, y teniendo en cuenta que a medida que aumenta el número de elementos, el error entre las mallas disminuye, es muy poco probable que esta malla comparada con alguna otra de más elementos que se pudiera llegar a crear exceda el valor límite en el error generado. Se continua a partir de este punto utilizando la malla de 2'044.000 elementos para las simulaciones que se lleven a cabo.

9.4 SIMULACIÓN CON MALLA SELECCIONADA

Ya que se ha seleccionado la malla con la cual se generarán los resultados en los que se establecerá la base para comprobar que se presente un adecuado comportamiento del flujo dentro del filtro, se procede con la simulación del fenómeno físico usando esta malla.

9.4.1 DESARROLLO

Esta nueva simulación se realiza en esta ocasión con la velocidad correspondiente al flujo másico seleccionado siguiendo los pasos explicados en el Capítulo **CAPÍTULO 8**. Los datos para esta simulación se encuentran en la Tabla 9.6. Valores de temperaturas y presión se mantienen igual a los usados en el estudio de independencia de malla.

Magnitud	Valor	Unidades
Número de elementos de la malla	2'044,000.00	—
Flujo volumétrico	0.1178	m^3/s
Diámetro entrada	0.10	m^2
Velocidad de entrada	15.00	m/s
Sustancia	Aire	—

Tabla 9.6 Datos para simulación con malla seleccionada.

De acuerdo con lo explicado en el apartado 8.5.1, se debe comprobar si el flujo puede ser tratado como incompresible, por lo que se tiene en cuenta la velocidad que el flujo pueda alcanzar, ya que al entrar en los tubos de recolección esta aumenta. Si bien de modo analítico es difícil saber el valor exacto de velocidad máxima que desarrolla el flujo, se puede hacer una aproximación con relación de áreas o de los cuadrados de los diámetros. Hay que tener en cuenta también el número de tubos de recolección. Para esto se usa la ecuación **Error! Reference source not found.**), desarrollándola con los datos de la Figura 9.2 Línea media para observación de variación de magnitudes.

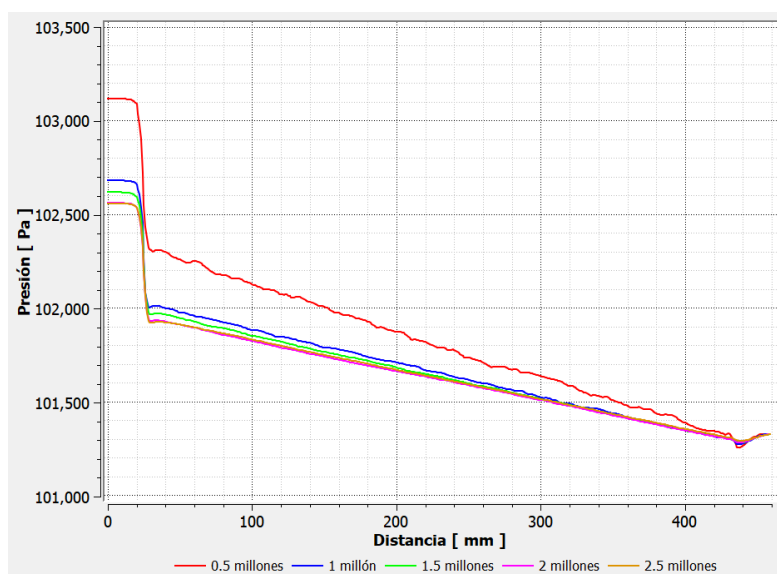


Figura 9.3 Presión en línea media sobre diferentes mallas.

A partir de esta gráfica se pueden mencionar varios puntos. Primero, el comportamiento de la presión es similar en todos los casos, asemejándose al comportamiento esperado. También se

puede apreciar que existe variación en las presiones que se generan a la entrada. La presión de salida se da igual para todos los casos ya que es una condición de frontera. Nótese que la diferencia que existe entre las líneas se reduce al aumentar el número de elementos de la malla, lo que hace que las dos mallas más finas, 2 y 2.5 millones de elementos, se observen casi una encima de la otra lo que indica que la diferencia entre los valores presentados en esta debe ser muy baja.

Para obtener el porcentaje de variación, primero se genera una tabla con los valores de presión a la entrada y salida en cada uno de los casos, junto con la diferencia que se presenta entre estos. Ver Tabla 9.3

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
diámetro entrada	D	0.11	m
diámetro tubos de recolección	d	0.0075	m
número de tubos	N_t	31	—

Tabla 9.7 Diámetros y número de tubos.

$$V_{max} = V_{inicial} \cdot \frac{D^2}{N_t \cdot d^2} \quad (9-2)$$

$$V_{max} = 15 \text{ m/s} \cdot \frac{0.10^2}{31 \cdot 0.0075^2} = 86.02 \text{ m/s}$$

La velocidad del sonido en un medio, en este caso aire, depende de la temperatura. Esta velocidad tiene un valor de 331.4 m/s en aire a 0 °C y aumenta aproximadamente 0.61 m/s por cada grado que aumente la temperatura [64]. Ver ecuación **Error! Reference source not found.**

$$c = 331.4 + 0.61 \cdot t \quad (9-3)$$

Ya que no se conoce el valor exacto de la temperatura en zonas diferentes a la entrada y la salida, como tampoco el punto en el que se da la velocidad máxima, se utilizará una temperatura promedio entre la de entrada y salida.

$$c = 331.4 + 0.61 \cdot \frac{306.85 + 46.85}{2} = 439.3 \text{ m/s}$$

Ahora se calcula el Número de Mach con la velocidad máxima usando la ecuación (3-6).

$$Ma = \frac{86.02}{439.3} = 0.196$$

El número Ma se encuentra por debajo de 0.3. Esto quiere decir que se puede tratar el flujo como incompresible y establecer *Pressure-Based* como tipo de solucionador. Una vez se desarrolle la simulación se deben comprobar los valores de velocidad del flujo y velocidad del sonido reales para comprobar que la relación no supera el límite de 0.3 en ningún momento.

Con este parámetro confirmado se puede iniciar la simulación. Esta se lleva a cabo llegando a la convergencia luego de 134 iteraciones. Con la simulación finalizada de manera exitosa se procede

a analizar los resultados generados. En esta ocasión se analizarán de manera más detallada como se realizó en el estudio de independencia de malla, llevando a cabo la explicación de las variables que se revisan para determinar el comportamiento adecuado del flujo.

9.4.2 RESULTADOS

Las primeras variables para revisar son la presión, variable crítica del estudio del proyecto, y la velocidad, la cual debe tener ciertas variaciones respecto a la presión de modo consistente. Este análisis se realiza sobre la línea media, la misma que se utilizó en el apartado 9.3.3 para observar las presiones en el estudio de independencia de malla. En la Figura 9.4 se presenta el comportamiento de las dos variables mencionadas.

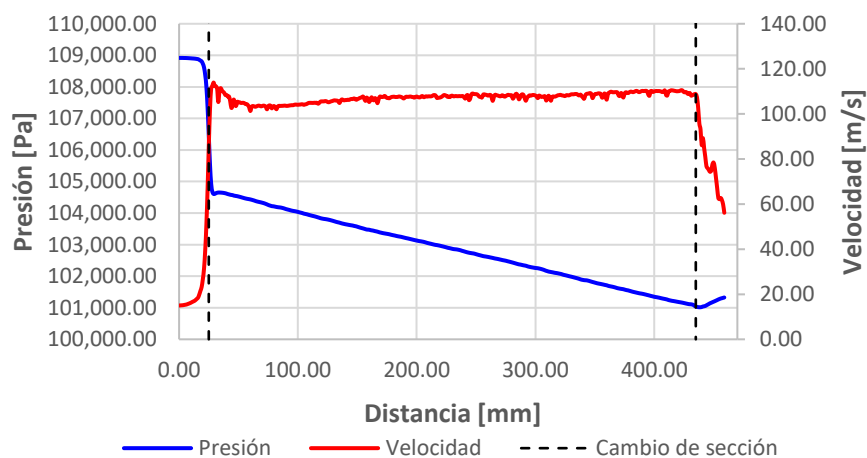


Figura 9.4 Presión y velocidad en línea media - simulación con malla seleccionada.

Esta figura muestra que la presión disminuye de forma agresiva en el primer cambio de sección, y a la vez se genera un aumento de velocidad. La presión luego disminuye progresivamente debido a las pérdidas de energía por fricción. Al pasar por el segundo cambio de sección se estabiliza llegando a la presión de operación. El valor de la presión más baja a la que se llega en el precipitador, obtenido del post procesador es de 98.8 kPa, que al ser comparado con la presión de operación representa una contrapresión de 2.55 kPa. El motor seleccionado establece que se puede presentar una contrapresión máxima de 10 kPa por debajo de la presión atmosférica en la salida del escape, significando que el resultado obtenido está dentro del límite del fabricante.

Aun cuando esta se presenta, la gráfica muestra que hay un delta de presión positivo, lo cual indica que el flujo se comporta de la manera esperada, causando que el flujo se dirija hacia la salida del escape. Para saber el valor exacto del delta de presión generado, se crean dos líneas, una a la entrada y otra a la salida. Ver Figura 9.5.

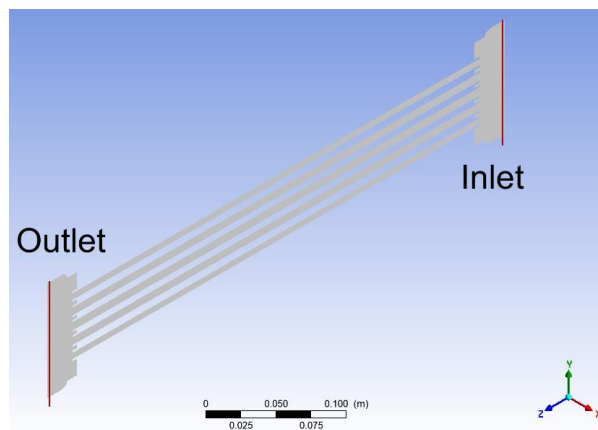


Figura 9.5 Líneas en entrada y salida para medición.

Con esto se utilizan las tablas del post procesador de Workbench para obtener el valor de presión promedio en cada una de estas líneas y con esto poder obtener la diferencia entre ellas. Los valores obtenidos con este proceso se muestran en la Tabla 9.8.

Presión a la entrada	108,640	Pa
Presión de salida	101,325	Pa
Delta de presión	7315	Pa

Tabla 9.8 Presiones en los límites.

El delta obtenido con los valores exactos confirma que este es positivo, lo que indica que la contrapresión, presión de salida, no generará bloqueo o flujo en reversa. Por otro lado, la velocidad según la Figura 9.4, presenta algunas fluctuaciones menores que se deben a la turbulencia, además de una reducción de velocidad justo después de que el flujo entra a los tubos recolectores. Esto se debe a la turbulencia generada en dicha zona por la contracción súbita que causa un efecto tobera – difusor.

Luego de observar el comportamiento de la velocidad y la presión, se analiza la densidad, la cual no debería tener cambios significativos en la línea media, por ende, se muestra una gráfica de la variación de la densidad respecto a la velocidad. Esta variación se aprecia en la Figura 9.6.

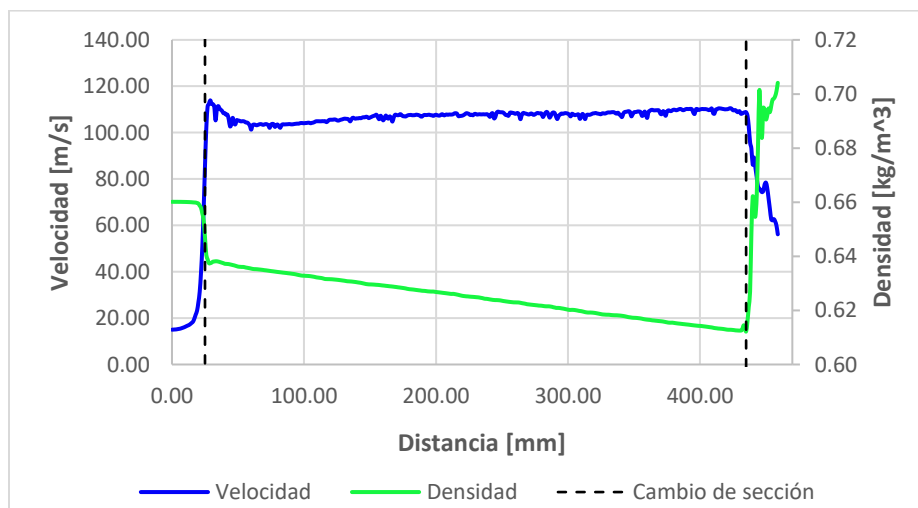


Figura 9.6 Velocidad y densidad en línea media

Inicialmente se puede observar que las mayores variaciones de la densidad se presentan justamente en los cambios de sección. Estas variaciones se dan entre valores de 0.62 y 0.70 aproximadamente. En la zona entre el segundo cambio de sección y la salida se presenta el mayor aumento, esto se debe a que la velocidad disminuye al encontrarse con un área transversal considerablemente mayor a la de los tubos recolectores, pero en la cual la presión no puede variar significativamente por haber alcanzado ya la presión de operación. Esto hace que la densidad deba variar en dicha zona.

Se puede notar que la zona que existe entre los cambios de sección, a medida que disminuye la densidad, la velocidad presenta un comportamiento creciente. Esto es coherente ya que al disminuir la densidad el gas tenderá a ocupar más espacio, y como la sección transversal no cambia dentro de los tubos de recolección, este se ve obligado a desplazarse más rápidamente para generar el espacio en el que este se pueda expandir. Si bien la presión disminuye también en esta zona, esta pérdida de presión es por fricción con las paredes de los tubos de recolección.

Con estas variables revisadas, se verifica ahora el flujo másico (ver Figura 9.7), así como la velocidad del flujo en relación con la velocidad del sonido para validar el tipo de solucionador utilizado. Ver Figura 9.8.

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	0.0770285
outlet	-0.077026159
Net	2.3411423e-06

Figura 9.7 Flujo másico de entrada y salida.

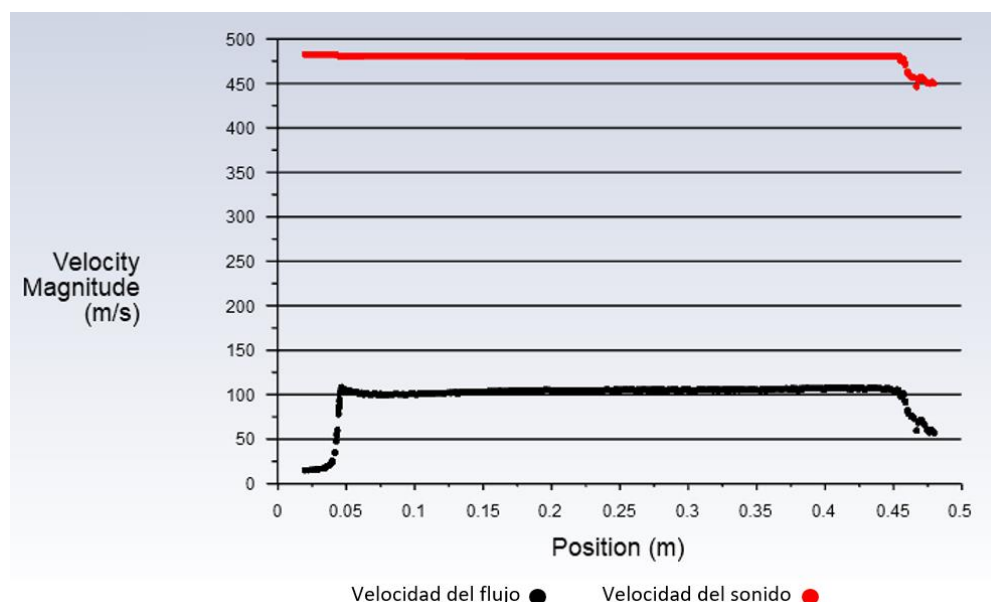


Figura 9.8 Velocidad de flujo y velocidad del sonido - Malla seleccionada.

La Figura 9.7 muestra que los flujos másicos tienen un valor similar, la variación de estos es del orden de micras. Esta mínima variación representa las pequeñas cantidades del fluido que se

quedan adheridas a los muros del filtro, lo cual se ve representado al ser mayor el flujo másico de entrada que el de salida.

Por otro lado, en la Figura 9.8 se observan diferentes puntos que marcan el valor de la velocidad del flujo y de la velocidad del sonido. Los valores de la velocidad del flujo son los mismos que se presentaron en la Figura 9.4, y según los datos de construcción de esta gráfica, la velocidad máxima que alcanza el flujo es de 114 m/s, mientras que la magnitud de la velocidad del sonido se encuentra cerca de los 480 m/s con un valor mínimo aproximado de 450 m/s. Si se analiza el caso más crítico sobre esta línea, con los valores más cercanos posibles, es decir, máxima velocidad del flujo y mínima velocidad del sonido, la relación entre estos, que es el mismo número de Mach, sería de 0.25. Esto confirma que la velocidad del flujo no alcanza en ningún momento el 30% de la velocidad del sonido. A partir de esto se confirma que el tipo de solucionador utilizado, *Pressure-Based*, es el adecuado.

9.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Luego de las diversas simulaciones se ha propuesto un diseño conceptual de filtro en el cual el comportamiento del flujo presenta una diferencia de presión positiva entre la entrada y la salida de este, lo que conlleva a que el fluido se desplace en dirección a la salida de los tubos de escape. Esto quiere decir que la contrapresión existente, que en este caso es la presión atmosférica, permanece en un valor inferior a la presión de entrada al filtro, indicando que no se generarán bloqueos por contrapresión ni flujos en reversa, permitiendo que el motor opere normalmente sin obstrucciones en el flujo que sale luego del proceso de combustión, así como una correcta operación del precipitador en donde se realiza la recolección del material particulado.
- El modelo propuesto asegura que los rangos de velocidad entre los que el fluido se desplaza a través del precipitador se mantengan por debajo del 30 % de la velocidad del sonido. Esto permite que se trate el flujo de manera incompresible y se desarrollen las simulaciones en periodos de tiempo más corto al permitir que se utilicen conjuntos de ecuaciones que el software ANSYS puede desarrollar más rápidamente. Esto a su vez permite que se puedan realizar consideraciones en el modelo y en la simulación para que esta se asemeje cada vez más a condiciones reales, como lo puede ser tratar el fluido como mezcla de gases y no como aire.
- El número de elementos que posee la malla utilizada, 2 millones aproximadamente, para la resolución del sistema físico proporciona, de acuerdo con el estudio de independencia de malla realizado, unos resultados de alta exactitud como se observó en la comparación con un enmallado con 25% más de elementos, y el cual solo refleja una diferencia en los resultados en un 0.24% del valor analizado (diferencia de presiones). Esto ratificó que se estuvieran generando resultados apropiados con los cuales confirmar el adecuado comportamiento del flujo.

CAPÍTULO 10 COMPROBACIÓN DE SUPUESTOS HECHOS PARA LA SIMULACIÓN

10.1 INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de las simulaciones realizadas hasta el momento se han tenido en cuenta varias consideraciones con el fin de simplificar las variables y condiciones que se presentan en el sistema. Estas consideraciones consisten en tratar el fluido del sistema como aire, no tener en cuenta la salida de flujo másico en el área de recolección de partículas, y manejar la presión de operación como la presión atmosférica a nivel del mar.

El presente capítulo se enfoca en comprobar la validez de estas consideraciones, observando cómo sería el comportamiento de la presión si estas no se tuviesen en cuenta. Para esto se presenta en primera medida, cómo varía el comportamiento al desarrollar la simulación con gases de escape, explicando además cómo se establece la configuración en Fluent para tener en cuenta la mezcla. Luego se desarrolla una prueba en la que se pretende observar si la extracción de flujo másico en el precipitador generaría condiciones críticas que debieran tenerse en cuenta, y finalmente, se establece una altura diferente de operación (altura de Bogotá Colombia), lo que conlleva a una diferente presión atmosférica para determinar la variación de estos valores.

10.2 TRATAMIENTO CON GASES DE ESCAPE COMO FLUIDO

Las simulaciones de fenómenos o situaciones físicas que se presenten con gases de escape suelen simularse usando aire como fluido, a menos que la situación sea específicamente el proceso de combustión. Para saber qué tanto varían los resultados al hacer esta consideración, se realizará una simulación utilizando propiamente una mezcla con los principales componentes que hacen parte de los gases de escape.

10.2.1 COMPOSICIÓN DE GASES DENTRO DE ANSYS

De acuerdo con lo explicado en el capítulo 2, y observando la Figura 2.1, los gases de escape se componen de 67% de Nitrógeno, 12% de Dióxido de carbono, 11% de agua, 9% de Oxígeno y 1% de emisiones contaminantes. Según lo explicado en el apartado 2.3, dentro de este 1% el compuesto que predomina es el óxido de nitrógeno, seguido del material particulado, al que le sigue el monóxido de carbono. La proporción de las demás sustancias es mínima, y dentro del material particulado, la sustancia que más se encuentra es el carbón, por lo cual se tomará toda la porción de PM como carbón.

La creación de la mezcla dentro de la simulación se lleva completamente dentro del entorno de Fluent. Para que esta se pueda tener en cuenta, se debe activar la opción de transporte de especies siguiendo la ruta *Models* → *Species* → *Species Transport*. Ver Figura 10.1. Luego de esto los materiales ya no estarán divididos únicamente en sólidos y fluidos, sino que aparece *Mixture* como nueva opción.

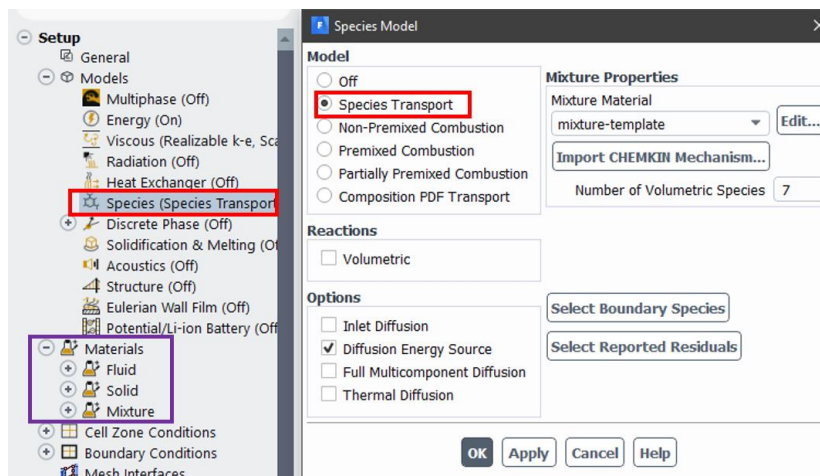


Figura 10.1 Activación de transporte de especies dentro de Fluent.

Para la creación de la mezcla se sigue la ruta *Materials* → *Mixture* → *Mixture-template*, y luego clic en *Fluent Database*. Ver Figura 10.2. Se abre una ventana donde se seleccionan los materiales de la mezcla que se mencionó anteriormente y se copian para poderlos usar. Ver Figura 10.3.

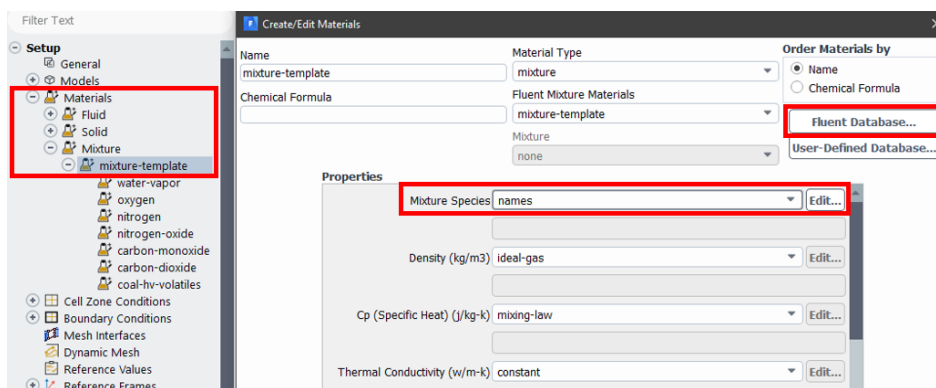


Figura 10.2 Recuadro de creación y edición de materiales.

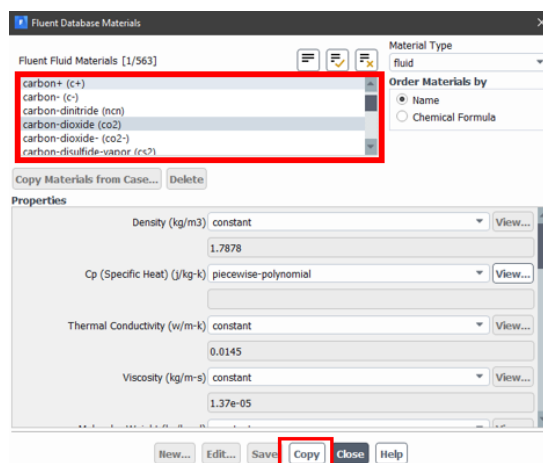


Figura 10.3 Selección de materiales por añadir.

Fluent provee 6 tipos de carbón, dentro de los materiales que tiene como fluidos en su biblioteca [63]. Estos se pueden ver en la Tabla 10.1.

Carbón	Propiedad			
	Densidad (kg/m^3)	CP [$J/(Kg \cdot K)$]	Fracción componente [%]	
			F.C.	M.V.
Antracita (<i>Anthracite</i>)	1550	1680	85.1	6.9
Carbón-lv (<i>Coal-lv</i>)	1400	1680	79.1	12.9
Carbón-mv (<i>Coal-mv</i>)	1400	1680	64.4	27.6
Carbón-hv (<i>Coal-hv</i>)	1400	1680	57.5	34.5
Lignito (<i>Lignite</i>)	1250	1680	44.7	50.4
Turba (<i>Peat</i>)	1150	2000	30.7	65.3

Tabla 10.1 Tipos de carbón provistos por Fluent.

Fuente: Adaptado de *Understanding Coal Gasification and Combustion Modeling in General Purpose CFD Code* [65]

La principal característica para definir cuál carbón utilizar, es la fracción de material volátil (V.M.) con la que está conformado. El carbón producido en los procesos de combustión de motores de automóviles suele tener cerca del 35% de material volátil [66], por lo cual se escoge carbón hv (*High volatile*) como la sustancia que representará el material particulado.

Posteriormente se debe dar en la opción *edit* al lado del recuadro *Mixture species* en la ventana de creación de materiales mostrada en la Figura 10.2. así se abre una ventana donde se deben añadir los materiales copiados como las especies que se tendrán en cuenta. Ver Figura 10.4.

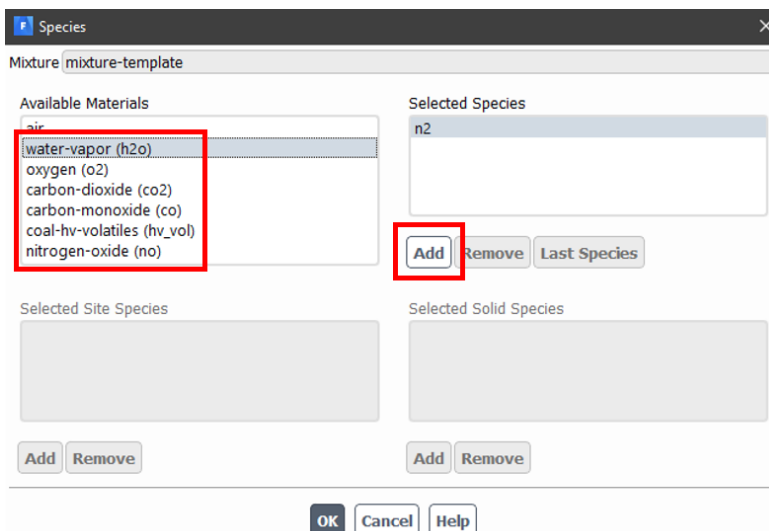


Figura 10.4 Adición de sustancias a las especies seleccionadas.

Luego de que este proceso se realiza, se debe escoger la mezcla como material a utilizar en la simulación. Esto se logra siguiendo la ruta *Cell Zone Conditions* → *Fluid*, y seleccionando la opción *Mixture-template* en el recuadro *Material name*. Ver Figura 10.5. Una vez está hecho, se deben establecer los porcentajes de cada sustancia, proceso que se realiza en la ventana de condiciones de entrada del flujo, la cual se alcanza siguiendo la ruta *Boundary Conditions* → *Inlet*. Ver Figura 10.6.

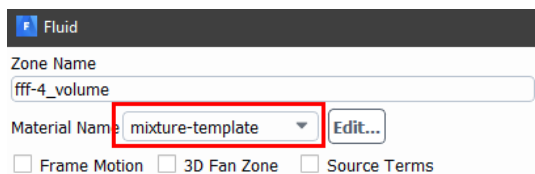


Figura 10.5 Selección de mezcla como material.

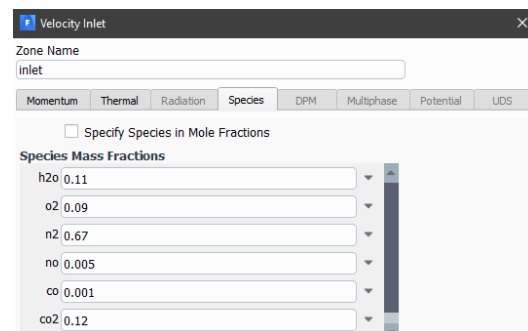


Figura 10.6 Fracción de cada compuesto para gases como fluido.

En esta ventana, en la opción *Species*, se muestran las sustancias que conforman la mezcla. Se escribe el valor de la fracción correspondiente a cada uno. Nótese que hay una sustancia que no aparece, el carbón (*Coal hv*) no se muestra. Fluent le asignará a esta sustancia la fracción restante necesaria para completar la unidad. Con los valores digitados, se puede iniciar la simulación con los demás parámetros establecidos de la misma manera que en la simulación con aire.

10.2.2 COMPARACIÓN. GASES VS AIRE.

La simulación, ahora tratada con gases, se ejecuta de manera correcta llegando a la convergencia luego de 169 iteraciones. Después de una revisión de las variables y comprobar que estas se comportan de manera adecuada, se establece que estos son consistentes y realiza la comparación de estos con los resultados de la simulación con aire como sustancia. Se genera una gráfica donde se puede observar la variación de presión resultante de las simulaciones. Ver Figura 10.7.

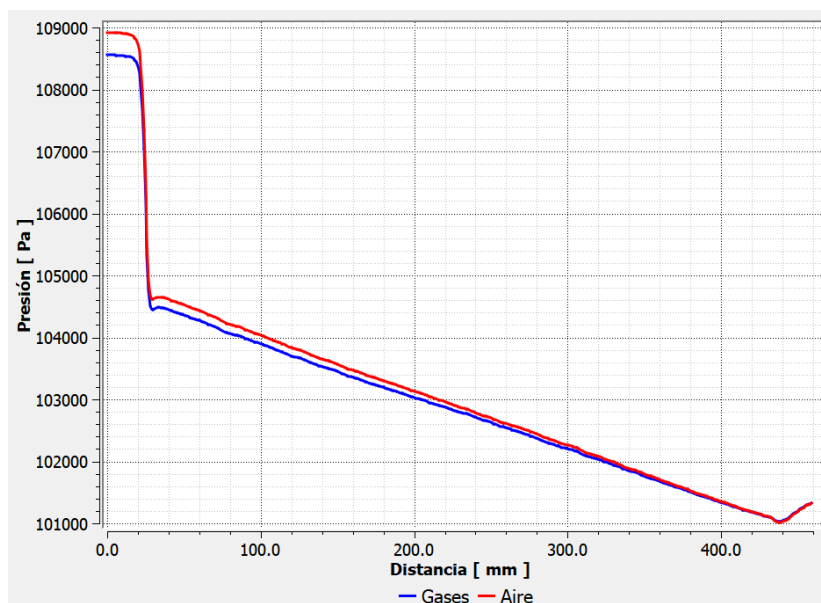


Figura 10.7 Variación de presión en línea media. Gases vs aire.

La gráfica muestra que el comportamiento, la variación, sigue la misma trayectoria, esta cae y disminuye en los mismos puntos y zonas en ambos casos. Hay una diferencia en el valor de la presión a la entrada, según la gráfica estas tienen una diferencia de menos de 1 kPa. Esto genera también una diferencia en el delta de presión entre la entrada y la salida.

Observando la gráfica se puede decir que el delta de presión generado en la simulación con aire es mayor al de la simulación con gases. Para saber los valores exactos de estas diferencias, se toman los valores con ayuda del software y se registran. Ver Tabla 10.2. En esta misma tabla se muestra el error existente entre los deltas de presión.

Sustancia	Delta de presión [Pa]	Error	
Aire	7681.0	Absoluto	0.05003
Gases	7315.0	Porcentual	5.00 %

Tabla 10.2 Diferencias de presión. Gases - aire.

La diferencia entre los resultados es tan solo del 5%. Otro aspecto importante por resaltar es que el delta de presión arrojado por la simulación hecha con aire es mayor, lo cual quiere decir que el flujo con aire representa condiciones más críticas que el flujo con gas. Para saber si esto afecta de manera positiva o negativa la simulación se deben analizar algunos puntos.

Las simulaciones con aire requieren un menor costo computacional, lo cual quiere decir que siempre que se puedan hacer suposiciones o consideraciones para tener aire como fluido reemplazando el original, es recomendable hacerlo. La diferencia que se está presentando en los resultados es baja, y aun cuando un 5% fuera un valor representativo, el simular con gas no está aumentando la diferencia de presión, por el contrario, la disminuye, lo que quiere decir que simular con mezcla de gases no añade valores críticos ni limitantes a los resultados, pero sí ocasiona un proceso más complejo de simulación y puede además aumentar el costo computacional.

10.3 DESPRECIACIÓN DE FLUJO MÁSCICO RECOLECTADO

Para un proceso de simulación más sencillo, se trató la zona de recolección de material como una zona con pared continua. Los agujeros por donde se recolecta el material particulado fueron removidos de modo que se obtuviera una geometría más simple para la simulación, con el fin de que no se requiera una malla extremadamente fina.

Esta modificación implica que se desprece la cantidad de flujo máscico extraído por los agujeros, la cual es mínima según los porcentajes establecidos en este proyecto, donde el material particulado representa cerca del 0.4 % del flujo máscico total. Se trabajó bajo la hipótesis de que la salida de este flujo máscico no representa cambios considerables en el comportamiento del flujo. Aun cuando pudiera generar cambios representativos, al ser un flujo máscico de salida está reduciendo el total de flujo máscico que recorre todo el precipitador, lo cual debería afectar positivamente el comportamiento de la presión, representando una menor caída de esta.

Para poder comprobar esto se tienen varias opciones. La primera consiste en realizar una geometría en donde se tengan en cuenta cada agujero de los tubos de recolección. Esto generaría una malla extremadamente fina debido a que en estas salidas se requeriría de elementos muy pequeños para que se acoplaran adecuadamente a la geometría. Como segunda opción se puede trabajar con el volumen de control ya generado, y establecer los muros de los tubos como un límite con condición de salida de flujo. Esto requiere un proceso de configuración complejo dentro de Fluent en el cual

se deben tener en cuenta los modelos CAD de los tubos y establecerlos como sumideros, por lo que requiere un mayor costo computacional y periodos largos de simulación. Finalmente, la opción más sencilla consiste en establecer simulaciones con diferentes flujos másicos, con el fin de observar si las caídas de presión aumentan o disminuyen en relación con este, y así decidir si tener en cuenta dicha salida de flujo másico es una condición crítica para el sistema. Al ser esta última la menos complicada, se decide realizar esta comprobación con diferentes flujos másicos.

10.3.1 FLUJOS MÁSICOS

Se ha decidido manejar un total de 4 casos para la comprobación. Dado que el cambio en la velocidad de entrada representa necesariamente un cambio en el flujo másico, los casos se establecieron con diferentes valores de velocidad de entrada. El flujo másico exacto que se genera con esta velocidad fue registrado posteriormente. Estos datos se pueden apreciar en la Tabla 10.3.

CASO	VELOCIDAD [m/s]	FLUJO MÁSICO [kg/s]
1	5.0	0.02808
2	10.0	0.04931
3	15.0	0.07703
4	20.0	0.10962

Tabla 10.3 Velocidades y flujos de casos a tratar.

Los demás parámetros de simulación se establecen como se ha explicado anteriormente. Ya que se comprobó que es válido tratar las simulaciones con aire, todas se desarrollaron usando esta sustancia como fluido. Se realizan todas las simulaciones y se llevan a un mismo cuadro de post-procesador para analizar los resultados.

10.3.2 RESULTADOS

Se genera una gráfica donde se observa la variación de presión a lo largo de la línea media que se usó para observar los valores en las diferentes simulaciones. Ver Figura 10.8.

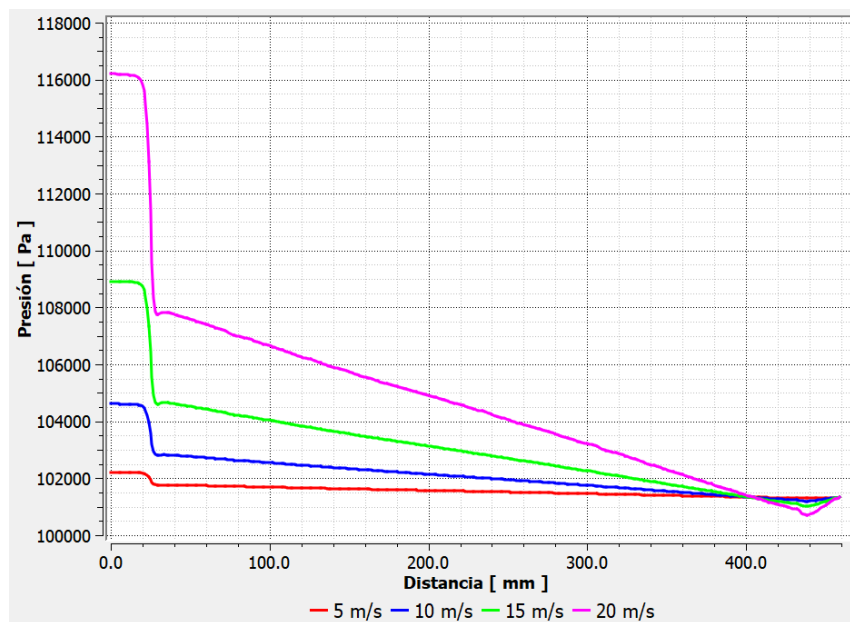


Figura 10.8 Variación de presión con diferentes velocidades de entrada.

La gráfica confirma la hipótesis sobre la cual se han desarrollado las simulaciones. El tener un menor flujo másico implica una menor caída de presión. Todos los casos llegan a la presión atmosférica por ser una condición de frontera. Nótese que la línea de color fucsia, que corresponde a la mayor velocidad de entrada, 20 m/s, presenta mayor delta de presión, Incluso luego de que las líneas se cruzan, esta presenta también una mayor caída. Este comportamiento se va reduciendo, generando un delta y una caída menor, a medida que el flujo másico disminuye. De modo que la línea roja, la de menor velocidad de entrada, presenta un comportamiento casi lineal.

A partir de esto se puede decir que tener en cuenta la salida de flujo másico por los tubos de recolección, la cual es mínima, no generaría condiciones críticas o limitantes, por lo que los rangos de presión no aumentarían. No obstante, esta condición aumentaría el costo computacional y la calidad de la malla necesarios para tratar el problema, además de una configuración más compleja el entorno de Fluent. Debido a esto, la mejor opción es despreciar dicha salida de flujo másico.

10.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN A DIFERENTE ALTURA

Para finalizar el análisis del filtro, se tomó la decisión de comprobar el funcionamiento de este a una presión de operación diferente, es decir, en un lugar con altura diferente. Para esto se toma como referencia la altura y la presión de Bogotá, siendo estas, 2640 m sobre el nivel del mar, y 75.2 kPa respectivamente. Esta presión es sacada de las últimas mediciones tomadas por el IDEAM en el mes de Julio. En la Tabla 10.4 se presentan las diferencias en las variables de presión y velocidad obtenidas al hacer el análisis en ANSYS.

VARIABLE	ALTURA DE ANÁLISIS	
	Nivel del Mar	Bogotá
Presión promedio a la entrada (Pa)	108600	80810
Presión promedio a la salida (Pa)	101300	75160
Delta de presión (Pa)	7345	5651
Velocidad Máxima – línea media (m/s)	114.0	113.9
Eficiencia (%)	98.80	99.97

Tabla 10.4 Resultados obtenidos al hacer el análisis a diferentes alturas.

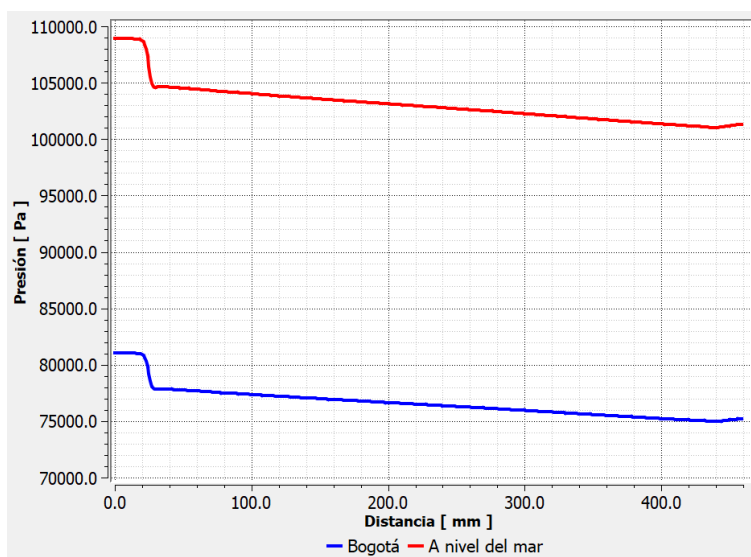


Figura 10.9 Variación de presión a alturas diferentes.

Es evidente que la presión alcanzada dentro del filtro ya sea máxima o mínima, depende completamente de la presión atmosférica en la que se encuentre este, siendo estas directamente proporcionales, es decir, a menor presión atmosférica, menor será la presión máxima interna alcanzada dentro del filtro y así mismo con la presión mínima.

Por otro lado, se evidencia que a menor presión atmosférica es menor la caída o el cambio de presión dentro del filtro, significando que el fluido que atraviesa a este presentará menos turbulencias y tendrá un comportamiento más estable. La diferencia entre los deltas de presión es de alrededor del 30 %. Todo esto indica que la presión atmosférica a nivel del mar es la condición más crítica posible en cuanto presiones de operación posibles para el filtro, ya que, al aumentar la altura, se genera un efecto positivo para el filtro al estar sometido a menores cambios de presión.

Por último, se nota un incremento en la eficiencia del filtro cuando la presión de trabajo externa es menor. Esto se da ya que, a menor presión externa, las partículas alcanzan una mayor velocidad media dentro del filtro, afectando el número de Deutsch, mencionado anteriormente en la teoría, y así mismo a la eficiencia, por lo que se deduce que a menor presión de trabajo mayor será la eficiencia del filtro, y también que la presión a nivel del mar siempre va a ser la presión más crítica de operación.

Adicionalmente, en ciudades como Bogotá en donde la alcaldía junto con la Secretaría Distrital de Ambiente estableció que a partir del año 2014 en caso tal de la implementación de un filtro, este debe cumplir con tener una eficiencia de recolección mínima del 97% [67], significando que la aplicación del filtro en alturas como Bogotá es completamente viable y cumple con los requerimientos establecidos.

10.5 CONDICIONES OPTIMAS PARA EL FLUJO

En primera medida, es necesario resaltar que el tratamiento que se le dé a las variables afecta a la eficiencia del filtro. Estas variables son usualmente difíciles de controlar y algunas dependen del lugar de operación del filtro, el cual va a tener un rendimiento variable de acuerdo con las mismas. Las variables que se han contemplado en este proyecto, las cuales también influyen en el comportamiento y desarrollo del flujo dentro del filtro son: la presión de operación, la velocidad del flujo y la sustancia que fluye dentro del precipitador. Algunas de estas son teóricamente controlables.

Inicialmente, la presión de operación no se puede controlar, ya que esta está determinada por las condiciones atmosféricas del lugar en donde opere el filtro. Aun así, el rendimiento óptimo del filtro, en cuanto a la presión, se logra operando en zonas de mayor altura posible, la cual, para Colombia, se encuentra en la Ruta Nacional 55 en el sector del Páramo del Almorzadero a 3864 metros sobre el nivel del mar. Si se hace referencia a algún municipio en específico, la mayor altura posible se encuentra en Vetás, Santander, municipio que se encuentra a una altura de 3350 metros sobre el nivel del mar.

La siguiente variable que influye en el comportamiento del flujo es la velocidad, la cual está determinada por dos factores, el flujo volumétrico de salida de los gases del motor, y el diámetro de la tubería por donde esté pasando el flujo. Según las comprobaciones realizadas, una menor velocidad del flujo representa un mejor comportamiento de este, por ende, al momento de estar en funcionamiento el ESP, el flujo óptimo de operación se da cuando la velocidad es la mínima posible.

Adicionalmente, el flujo volumétrico de los gases a la salida depende de la velocidad a la que esté operando el motor, entre mayor sea el número de revoluciones por minuto, mayor será el flujo volumétrico. Esto quiere decir que para un mejor comportamiento se debe operar el vehículo a la menor cantidad de revoluciones por minuto posible, a pesar de que este factor es difícil de controlar ya que depende de las condiciones de desplazamiento del vehículo, de la reglamentación del lugar, incluso de la habilidad de manejo del conductor. Por otro lado, el diámetro tiene una relación inversa con la velocidad del flujo, pues a mayor diámetro, mayor será el área transversal por la que pasa el fluido, y así, la velocidad será menor. En la zona de los tubos de recolección se puede hablar de un diámetro o área equivalente al sumar las áreas transversales de todos estos tubos, pero este factor también tiene restricciones, pues no se puede aumentar el diámetro excesivamente ya que las dimensiones de los tubos de escape tienen un límite.

Ahora bien, en lo que se refiere a sustancia o composición del flujo, si bien no es una variable que se pueda controlar ya que está determinada por el tipo de combustible seleccionado, se sabe que, debido a las comprobaciones, el filtro operará mejor con una mezcla de gases que con aire, ya que en este se presenta una menor caída de presión, pero, para reducir tiempos de simulación y costos, la mejor opción es trabajar con aire.

Por otro lado, en la utilización del combustible en la aplicación real, este es óptimo cuando se usan gases de combustión producto de una mezcla estequiométrica. Si la mezcla resulta ser pobre, es decir, con exceso de aire, el delta de presión empieza a aumentar ya que el aire genera una condición más crítica en cuanto a la variación de presión. Manejar una mezcla rica, exceso de combustible, no garantiza que se haga combustión completa, por lo que pueden quedar elementos no quemados que generen condiciones diferentes a las analizadas en el proyecto, además de resultar más costoso en cuanto a la operación del vehículo.

Teniendo estos aspectos en cuenta, se desarrolla la Tabla 10.5 resumiendo las condiciones a las cuales el flujo se desarrolla de manera óptima.

Variable	Cantidad óptima	Condición	En el proyecto
Presión de operación	Menor presión posible	Mayor altura posible	Aunque la condición óptima se desarrolle a la mayor altura y con menor presión de operación, se realiza el estudio con la presión más alta posible para asegurar el funcionamiento en cualquier zona.
Velocidad	Menor velocidad posible	Mayor área transversal que se pueda implementar	Se implementaron un total de 31 tubos de recolección. Este es el número máximo posible según las dimensiones establecidas. Con esto se minimiza el incremento en la velocidad en la zona de recolección.
Sustancia	Gases – Mezcla estequiométrica	Sin exceso de aire.	En ocasiones se suelen utilizar mezclas con exceso de aire. La menor caída de presión dependiente de la sustancia se logra cuando la mezcla es estequiométrica.

Tabla 10.5 Condiciones para desarrollo óptimo del flujo.

10.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de realizar una breve comparación de los resultados obtenidos en este proyecto respecto a algunos antecedentes de investigaciones anteriores, se usarán los datos de las Tabla 4.1 y Tabla 4.2, las cuales resumen los resultados de algunas investigaciones y estudios recientes en esta temática. Se generan dos nuevas tablas en donde se incluyen también los datos obtenidos de este proyecto. Ver Tabla 10.6 y Tabla 10.7.

Estudio	Eficiencia [%]	Voltaje [kV]	Flujo Vol. [m ³ /s]	Longitud [mm]	Diámetro/ altura [mm]	Diámetro partícula [μm]	Notas
Chilinquila y Toro	99.97	12.0	0.243	450	110	1.0	-Tubular
Jaworek	>97.0	24.0	0.32	2000	330	2.5	-Tubular -Dos etapas -Forma de alambre de púas
Kawakami	99.0	8.0	0.03	375	130	0.2 – 5.0	-Una y dos etapas -Reducción de efecto de re-arrastre.
Hayashi	>99.0	12.5	0.25	100	50	0.5	-Tubular -Combinación de ESP y DPF
Proyecto	>98.74	21.3	0.12	400	100	0.04	-Tubos perforados -Una etapa

Tabla 10.6 Eficiencia en recolección con ESP. Estudios previos vs resultados del proyecto.

Estudio	Contra presión [kPa]	Caída de presión [kPa]	Velocidad (inicial) [m/s]	Diámetro/ separación [mm]	Características
Srinivaas, Sathian y Ramesh	0.65	0.2	17.26	120 → 200	-Empaquetamiento hexagonal -Papel aislante -Ensanchamiento en zona de recolección
Turner	-	0.5 - 2.5	21.6	110 - 190	-Generalidad de precipitadores
Hoon Lee	-	3.5 - 5.0	20	105	-Filtro con rejilla cuadrada extendida por donde fluye el gas.
Proyecto	2.5	7.3	15	100	-Contracción en zona de recolección

Tabla 10.7 Comportamiento de flujo en ESP. Estudios previos vs resultados del proyecto.

Para empezar con el primer análisis, se hace una revisión de los aspectos relacionados con el efecto de precipitación y la eficiencia, en los cuales se observa que la eficiencia obtenida en este proyecto es menor a la mayoría de los estudios citados. Este aspecto se puede entender al observar el diámetro de partícula usado en el proyecto, pues es considerablemente menor con un valor de 0.04 μm, estando 5 veces por debajo del diámetro usado en el estudio de Kawakami, el cual entre todos los estudios es en donde se maneja el menor diámetro, siendo este 0.2 μm. Aún así, el valor de eficiencia mostrado en este proyecto es la menor posible dentro del filtro para velocidades de flujo a la entrada iguales o menores a 15 m/s, en condiciones de operación críticas, significando que la eficiencia en otras condiciones de operación puede llegar a ser igual al de los otros trabajos.

En cuanto al voltaje requerido, este depende tanto de las dimensiones que se establezcan, no solo del filtro sino de los electrodos que se hayan escogido para generar el efecto corona, sino también de las condiciones de operación. Mientras que en varios estudios se requieren cerca de 10-12 kV, en este proyecto ese valor se duplica, al igual que en el estudio de Jaworek estando cerca de los 20 kV requeridos, esto ya que, al estar trabajando con presiones a nivel del mar, para poder generar el efecto corona, es necesario que el voltaje sea mínimo de 20kV, mientras que, a alturas mayores, este valor disminuye considerablemente como se ve reflejado en los otros estudios.

Para este proyecto se estableció una longitud de recolección de 400 mm, valor similar al utilizado en los estudios de Chilinguila con 450 mm, y de Kawakami con 375 mm, los cuales son adecuados, y más aún cuando se comparan con el modelo de Jaworek el cual tiene una longitud 5 veces mayor. Esta diferencia en la longitud se debe a que dicho estudio es general y no específica que el objetivo sea aplicarlo a vehículos, teniendo un enfoque hacia las condiciones y disposiciones del precipitador. Por otro lado, Hayashi muestra que es posible lograr una eficiencia elevada en un filtro con una longitud de recolección corta, al proponer un modelo con solo 100 mm de longitud para la recolección de material, logrando eficiencias superiores al 99%. Esto lo logra con una implementación del efecto de precipitación a un modelo convencional de DPF.

La longitud en este proyecto se encuentra dentro de valores convencionales, que se justifican al tener en cuenta que la zona de recolección no presenta ensanchamientos como suele suceder en muchos modelos de precipitadores, esto para que sea más factible implementarlo en las cavidades de los vehículos sin que se deban realizar modificaciones complejas a la zona de los tubos de escape.

Siguiendo con el comportamiento del flujo, se observa que en la investigación presente se genera mayor contrapresión, así como una mayor caída de presión. Srinivaas es su investigación obtiene un resultado con una contrapresión cerca de 5 veces menor a la obtenida en este proyecto. Así mismo la caída de presión que obtiene, con 200 Pa, es tan solo un 2.73 % de la caída de 7315 Pa que se presentó en el modelo propuesto. Aunque la diferencia con los estudios de Turner y Hoon Lee en cuanto a la caída de presión no es tan drástica, sigue existiendo una diferencia representativa, la cual es de mínimo 2315 Pa respecto al estudio de Hoon Lee y de 4815 Pa con el estudio de Turner.

Estas diferencias no son necesariamente un punto para afirmar que el modelo propuesto no es eficiente o que podría presentar fallas. Entendiendo que el modelo es funcional y aplicable como se demostró, se puede analizar el porqué de la diferencia en cuanto a la presión, si bien las velocidades en los estudios tienen valores que no se alejan considerablemente uno del otro, sí se presenta una variación considerable en los diámetros que se utilizaron. Por ejemplo, Srinivaas realiza un modelo en donde el diámetro en el área de recolección aumenta, de 120 a 200 mm, en este proyecto, aunque la carcasa mantiene el mismo diámetro, no toda el área es utilizada para el paso del flujo, ya que lo que se tiene es un área efectiva que depende del diámetro de los tubos de recolección, así como de la cantidad de estos, siendo en realidad un área menor. Esto quiere decir que el desarrollo del flujo en su estudio se comporta con una tendencia laminar sin cambios de velocidad o de presión bruscos. Caso similar pasa con los precipitadores descritos por Turner, los cuales usan un diámetro cerca de 2 veces mayor al propuesto, lo cual aumentará el área transversal considerablemente ya que el diámetro interviene como una variable al cuadrado en el cálculo del área.

Por otro lado, aunque el modelo de Hoon Lee posee dimensiones transversales similares al modelo propuesto, él usa un sistema de rejilla en donde no se presentan espacios entre canales por donde fluye el gas, distinto del modelo analizado en donde existen espacios entre los tubos de recolección para la recolección del material. Esta diferencia se da debido a diferentes métodos de recolección utilizados. En general su modelo termina teniendo un área transversal mayor a la del modelo propuesto.

Este análisis conlleva a pensar que es mejor realizar entonces un modelo con un diámetro mayor. Esto implicaría que al momento de instalar el filtro en el vehículo se deban realizar mayores modificaciones a este. El modelo propuesto está pensado para que sea funcional y se eviten la mayor cantidad de complicaciones en su implementación al vehículo, teniendo en cuenta también que se requiere espacio para el circuito de generación de voltaje.

Para finalizar, se resumen las ventajas y desventajas del modelo propuesto respecto a los diferentes estudios en la Tabla 10.8.

	Aspecto	Desempeño
Puntos Negativos	Voltaje	El voltaje requerido es casi el doble de otros modelos propuestos.
	Eficiencia	Tiene una eficiencia de 98.74% mientras en la mayoría de los estudios está por encima de 99%. (Puede aumentar si se toma un tamaño de partícula similar o si se trabaja con diferentes condiciones de operación)
	Presión	La caída presión y contrapresión generada es considerablemente mayor.
Puntos Positivos	Tamaño de partícula	El tamaño de partícula es más pequeño y se asegura la eficiencia para estas. En otros estudios solo se asegura para tamaños mayores.
	Longitud	La longitud se encuentra dentro de un rango apropiado.
	Diámetro	El diámetro es menor que el utilizado en los estudios de comparación. Esto representa menos espacio requerido para su implementación.

Tabla 10.8 Resumen de comparación del modelo propuesto.

10.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- En primera medida se comprobó la validez de las condiciones que fueron supuestas para el flujo, lo cual representa que, al tratar el fluido como gases en la simulación, no se generan condiciones críticas ni valores limitantes en comparación con las anteriores simulaciones. Esta misma situación se presenta al analizar la condición de salida de flujo másico y al variar la presión y seleccionar una altura diferente a la del nivel del mar.
- Se determinó que la condición óptima de desarrollo del flujo, donde se presentan las menores turbulencias y caída de presión posible, depende de tres factores: la altura de operación, en donde el flujo opera mejor entre mayor sea esta; la velocidad del flujo, en donde se busca sea la menor posible aumentando tanto como sea permisible el área de las diferentes zonas del volumen de control; y por último, de la sustancia que fluye dentro del precipitador, en donde se busca que la mezcla de gases siempre sea estequiométrica para que haya menor caída de presión.

- El modelo propuesto presenta mayores requerimientos de voltaje y mayores variaciones en la presión dentro de este. Así mismo la eficiencia asegurada se muestra con un porcentaje menor, valor que se entiende ya que se tienen en cuenta tamaños de partículas muy pequeños. Además de esto presenta una geometría con la cual se requieren procedimientos menos complejos para su implementación y un menor espacio sin que esto afecte la funcionalidad de este. Esto hace que se reduzca la probabilidad de tener que realizar modificaciones significativas en las zonas cercanas a los tubos de escape.

CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de los capítulos expuestos en este proyecto se ha dado respuesta a los diversos puntos planteados acerca de la simulación eléctrica de un precipitador electrostático y de la simulación del flujo dentro de este a través de lo cual se puede concluir lo siguiente:

- Se determinó que, para la aplicación del filtro, es necesario utilizar el efecto corona, ya que es capaz de cargar eléctricamente partículas de tamaños inferiores a 40 micras, tales como el PM resultante de la combustión del diésel. Esta corona debe ser negativa por efectos de direccionamiento de las partículas hacia las cavidades del filtro, además de que los electrodos soportan mejor este tipo de carga. Con esto cargarán las partículas de PM con tamaños inferiores a 1 μm .
- Se desarrolló la simulación del circuito que cumplió con el requerimiento de voltaje calculado, con valor de 21.3 kV. EL circuito consistió en 3 componentes principales que constan de: una fuente de corriente alterna de 220 V, un transformador lineal de dos bobinas con relación de tensiones de 0.011, y un puente rectificador de onda completa de tipo MMC con un capacitor de 1000 μF . Estos valores mencionados aseguran un voltaje por encima del requerido.
- En la realización de la propuesta de modelo CAD se tuvo en cuenta las dimensiones y el flujo volumétrico de un motor Mercedes-Benz OF1721 y un requerimiento de eficiencia mínimo a partir del cual se estableció que el filtro se conformará de una carcasa con diámetro interno de 100 mm, espesor de 5 mm, y longitud de 460 mm, dentro de la cual se da una zona de admisión con longitud de 400 mm conformada por 31 tubos de recolección perforados basado en la recolección de PM a través de agujeros. Este prototipo, a condiciones atmosféricas a nivel del mar, brinda una eficiencia de 98.74 % de recolección.
- La simulación del flujo a través del diseño propuesto muestra un delta positivo de presión con un valor de 7.3 kPa. Esto representa que el flujo se dirige en la dirección adecuada, de la entrada hacia la salida del filtro. Aunque también se presenta contrapresión, con un valor de 2.55 kPa, esta no ocasiona un bloqueo gracias al delta positivo mencionado. No obstante, esta simulación se realizó con consideraciones tales como aire como fluido, presión atmosférica a nivel del mar, y salida de flujo másico despreciable en la zona de recolección. En primera instancia se confirma la viabilidad y funcionabilidad del filtro en cuanto a un adecuado comportamiento del flujo a través de él.
- Se estableció que la condición óptima de desarrollo del flujo se presenta a la mayor altura de operación posible, con un diseño de filtro donde la velocidad alcanzada por el flujo sea mínima, y donde la combustión de gases se haya llevado a cabo de manera estequiométrica. Al ser condiciones difíciles de controlar, y al no poder asegurar que estas se cumplan en todo momento, se realizaron las simulaciones utilizando condiciones críticas para el problema y así garantizar la funcionabilidad del filtro en los instantes en que se presenten valores diferentes a los óptimos como puede ser la altura al nivel del mar o una mezcla de gases con exceso de aire.

RECOMENDACIONES

- En este proyecto se modeló y se hizo el respectivo análisis de un filtro de precipitación de una sola etapa, se recomienda hacer el análisis para un filtro de dos etapas, carga y recolección, con el fin de observar si presenta una eficiencia mayor, y si esta es justificable de acuerdo con el comportamiento de las variables dentro del flujo.
- Algunos trabajos hechos anteriormente mencionan una etapa previa de aglomeramiento de partículas para juntarlas hasta que se adquiriera un determinado tamaño que sea más sencillo de recolectar. Se recomienda realizar un estudio acerca de la implementación de este método a modo de determinar la variación que puede tener en la eficiencia de recolección.
- Debido a que en este proyecto se analizaron los gases de escape producto de una mezcla estequiométrica en el motor, se recomienda analizar las variaciones de presión y de velocidad cuando esta mezcla es pobre o es rica, así mismo determinar si hay un incremento o una disminución significativos en la contrapresión generada.
- Se recomienda investigar acerca de la implementación del efecto de precipitación en un modelo convencional de filtro de partículas para diésel, con el fin de realizar una propuesta que tenga en cuenta la combinación de los dos métodos para determinar la viabilidad de su implementación.
- En caso de que se quieran hacer nuevas simulaciones con diferentes condiciones de operación, se recomienda trabajar con condiciones de operación del filtro críticas, ya sean las máximas o las mínimas, principalmente la presión, con el fin de asegurar que los análisis realizados y modelos que se propongan sean aplicables en cualquier altura o cualquier situación.
- Adicionalmente, el desarrollo de simulaciones de esta u otras aplicaciones similares en los que se traten gases de escape, se recomienda utilizar aire como sustancia para el flujo, tratándolo como gas ideal. Esto con el fin de reducir tiempos de simulación y así mismo evitar procesos de configuración complejos en Fluent.
- Finalmente, ya que se comprobó la funcionabilidad del filtro con las condiciones y valores tratados en este proyecto, se recomienda realizar un estudio acerca de los materiales que pueden ser usados para el diseño, en donde se seleccionen y se realicen simulaciones de esfuerzos mecánicos que validen la selección y se puedan generar planos de diseño.

REFERENCIAS

- [1] WHO, «IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic,» World Health Organization, Lyon, France, 2012.
- [2] A. Baraya Rubiano, «Colombia, cerca y lejos de Euro V,» 28 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://www.motor.com.co/actualidad/industria/colombia-cerca-lejos-euro-v/29098>.
- [3] Ayuntamiento de Valladolid, «Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.valladolid.es/en/rccava/contaminantes/material-particulado-pm10-pm2-5>.
- [4] Instituto para la Salud Geoambiental, «Qué hacemos: Material particulado,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>.
- [5] WHO, «Health Effects of Particulate Matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia,» World Health Organization: Regional Office for Europe, Copenhagen, 2013.
- [6] WHO, «Air Quality Guidelines Global Update 2005,» World Health Organization: Regional Office for Europe, Copenhagen, 2005.
- [7] E. Samoli, R. Peng, T. Ramsay, M. Pipikou, G. Touloumi, F. Dominici, R. Burnett, A. Cohen, D. Krewski, J. Samet y K. Katsouyanni, «Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHENA Study,» *Environmental Health Perspectives*, vol. 116, p. 1480–1486, 2008.
- [8] ENHIS, «Exposure to Air Pollution (Particulate Matter) in Outdoor Air,» Organización Mundial de la Salud: Regional for Europe, Copenhagen, 2011.
- [9] P. M, G. U, B. R, W. M, G.-A. L, A. AM, B. X, B. C, C. M, F. F, d. H. K, G. R, G. O, H. G, J. A, K. C, K. IM, K. U, K. J, P. D y P. DS, «Elemental Constituents of Particulate Matter and Newborn's Size in Eight European Cohorts,» *Environ Health Perspect*, p. 141–150, 2015.
- [10] WHO, «Health Relevance Of Particulate Matter From Various Sources,» World Health Organization: Regional Office for Europe , Bonn, 2007.
- [11] IARC, «Diesel and Gasoline Engine Exhaust and some Nitroarenes,» WHO: International Agency for Research on Cancer, Lyon, 2012.
- [12] IARC, «Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures,» WHO: International Agency for Research on Cancer, Lyon, 2010.
- [13] IARC, «Household Use of Solid Fuels and High-temperature Frying,» WHO: International Agency for Research on Cancer, Lyon, 2010.

- [14] ACEA, «Industry topics: Euro Standards,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.acea.be/industry-topics/tag/category/euro-standards>.
- [15] C. Carrión, «Abecé de la Ley que regula las emisiones de gases contaminantes de vehículos de ACPM y motocicletas,» PResidencia de la República, Bogotá, 2019.
- [16] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th edition, New York: McGraw-Hill Education, 2004.
- [17] T. D. Eastop y A. Mcconkey, *Applied Thermodynamics for Engineering Technologists*, 5th edition, London, UK: Pearson Prentice Hall, 1993.
- [18] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw-Hill Education, 1988.
- [19] R. Prasad y V. R. Bella, «A Review on Diesel Soot Emission, its Effect and Control,» *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, pp. 69-86, 2010.
- [20] A. Majewski W y M. K. Khair, *Diesel Emissions and Their Control R-303*, USA: SAE International, 2006.
- [21] A. Azam, S. Ali y A. Lqbal, «Emissions from Diesel Engine and Exhaust After Treatment Technologies,» de *4th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development*, Sindh, 2016.
- [22] Y. A. Cengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [23] R. L. Mott y J. A. Untener, *Applied Fluid Mechanics*, London: Pearson, 2015.
- [24] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [25] M. J. Castro, *Trasnporte de momentum y calor. Teoría y aplicaciones a la ingeniería de proceso*, Mérida, Yucatán: UADY, 2005.
- [26] R. L. Mott y J. A. Untener, *Applied Fluid Mechanics*, London: Pearson, 2015, pp. 228, 231.
- [27] S. Ebnesajjad, «*Fluoroplastics, Volume 2,*» Amsterdam, 2015.
- [28] J. L. Escamilla Reyes, R. M. Guadalupe García Castelán y L. J. Neri Vitela, *Fluidos, ondas y calor. Volumen 1*, Monterrey: Editorial Digital del Tecnológico de Monterrey, 2014.
- [29] V. A. Chilingua Toro y J. G. Ramón Chávez, «Estudio de factibilidad de la ionización de partículas de CO₂ emitidas por automotores a Diésel, para su empleo en el desarrollo de filtros electroestáticos,» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2016.
- [30] A. Sudrajad y A. Fitri Yusof, «Review of Electrostatic Precipitator Device for Reduce of Diesel Engine Particulate Matter,» *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 370-380, 2015.

- [31] A. Jaworek, A. Marchewicz, A. Sobczyk, A. Krupa y T. Czech, «Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM_{2.5} particle emission,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 67, pp. 206-233, 2018.
- [32] H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, M. Kuboshima, Y. Ehara y T. Yamamoto, «Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator,» *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, vol. 5, n° 2, pp. 179-184, 2010.
- [33] H. Hayashi, M. Kimura, K. Kawahara, Y. Takasaki, K. Takashima y A. Mizuno, «Collection of diesel exhaust using electrostatic charging prior to mechanical filtration.»
- [34] Z. He y E. T. Mohan Dass, «Correlation of design parameters with performance for electrostatic Precipitator. Part I. 3D model development and validation.,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 57, pp. 633-655, 2018.
- [35] D. Yang, B. Guo, X. Ye, A. Yu y J. Guo, «Numerical simulation of electrostatic precipitator considering the dust particle space charge,» *Powder Technology*, vol. 354, pp. 552-560, 2019.
- [36] A. Srinivaas, S. Sathian y A. Ramesh, «Design and Optimisation of Electrostatic Precipitator for Diesel Exhaust,» *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 310, n° 1, 2018.
- [37] J. H. Turner, P. A. Lawless, T. Yamamoto y D. W. Coy, «Controles de materia particulada,» Research Triangle Park, Durham, 1999.
- [38] H. Lee, «Integrating Filtration Mechanism with 3D Diesel Particulate Filter (DPF) Model using STAR-CCM+,» de *STAR Global Conference*, Orlando, Florida, 2013.
- [39] A. Fridman y L. A. Kennedy, *Plasma Physics and Engineering*, New York: CRC Press, 2004.
- [40] K. L. Kaiser, *Electrostatic Discharge*, New York: CRC Press, 2005.
- [41] M. J. Hurley, D. T. Gottuk y J. R. J. Hall, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Switzerland: Springer, 2015, p. 683.
- [42] G. Lüttgens, S. Lüttgens y W. Schubert, *Static Electricity: Understanding, Controlling, Applying*, Weinheim, Germany: John Wiley and Sons, 2017, p. 94.
- [43] D. Wang y L.-S. Fan, *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*, Oxford: Woodhead Publishing, 2013, pp. 60-64.
- [44] K. Zhang, S. Chen, L. Tan, M. Xu, H. Zhang y D. Zhang, «Study on Mechanism and Characteristics of Particle Charging In Electrostatic Precipitator,» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 667, n° 3, 2019.
- [45] PPC, «Lesson 3: ESP Design Parameters and their Effects on Collection Efficiency,» PPC industries, Texas, USA, 2020.

- [46] T. Luke, «Evaluation of an Electrostatic Filter System for Capturing Diesel Engine Particulates,» UniSA, Adelaide, Australia, 2015.
- [47] F. W. Peek, Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, Ann Arbor, Michigan: McGraw-Hill Book Company, 1920.
- [48] S. Jennings, «The mean free path in air,» *Journal of Aerosol Science*, vol. 19, n° 2, pp. 159-166, 1988.
- [49] B. E. Rapp, Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics, Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [50] E. Cunningham y J. Larmor, «On the Velocity of Steady Fcdl of Spherical Particles through Fluid Medium,» *19Proc. R. Soc.*, pp. 357-365, 1910.
- [51] K. B. Schnelle y C. A. Brown, Air Pollution Control Technology Handbook, Bellingham, Washington: CRC Press, 2016.
- [52] G. Buelna Quijada, «Propuesta de diseño y construcción de un sistema de lavado y purificado de gases de un sistema de combustión, en planta piloto; método de absorción-adsorción,» Universidad de Sonora, Hermosillo, México, 1995.
- [53] N. P. Deshpande, Electronic devices and circuits: principles and applications., New Delhi: McGraw-Hill, 2008.
- [54] R. E. Thomas, A. J. Rosa y G. J. Toussaint, The Analysis and Design of Linear Circuits, Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [55] A. P. Godse y U. A. Bakshi, Basic Electronics Engineering, Pune: Technical Publications Pune, 2008.
- [56] R. Dufo-Lopez, J. Krzywanski y J. Singh, Emerging Developments in the Power and Energy Industry, London: Taylor & Francis Group, 2020.
- [57] Mathworks, «Help Center: Simscape/electrical,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fullbridgemmc.html>.
- [58] Mathworks, «Help center: Simscape/electrical,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/powergui.html>.
- [59] Mercedes-Benz, «Nuestros modelos: Chasis OF 1721,» 2020. [En línea]. Available: https://www.mercedes-benz-bus.com/es_AR/models/of1721.html.
- [60] J. A. Pozo Palacios, «Influencia de la disposición del conducto de escape en el índice de contaminación de los buses de transporte masivo de pasajeros de la ciudad de Cuenca,» Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2010.
- [61] ANSYS Inc, «Workbench User's Guide,» 2017. [En línea]. Available: http://ecourses.ou.edu/fem/manuals/Workbench_Users_Guide_v18.2.pdf.

- [62] ANSYS Inc., «Meshing user's guide,» 2020. [En línea]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/wb_msh/msh_book_wb.html.
- [63] ANSYS Inc., «Fluent user's guide,» 2020. [En línea]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v201/en/flu_ug/flu_ug.html.
- [64] S. Velasco, F. L. Román, A. González y J. A. White, «A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air,» *Am. J. Phys.*, vol. 72 (2), pp. 276-279, Febrero 2004.
- [65] L. Hookyung, C. Sangmin y K. Bonhkeun, «Understanding Coal Gasification and Combustion Modeling in General Purpose CFD Code,» *Journal of the Korean Society of Combustion*, vol. 15, p. 17, 2010.
- [66] A. Shaha, *Combustion engineering and fuel technology: Optimum utilization of fuels*, New Delhi: Oxford and IBH Publishing Company, 1974.
- [67] Secretaría distrital de Ambiente, «Programa de Filtros de Partículas Diesel para Bogotá - BDPF,» Alcaldía Mayor de Bogotá, Bogotá, 2014.
- [68] Quality of Urban Air Review Group, «Diesel Vehicle Emissions and Urban Air Quality,» Institute of Public and Environmental Health, Birmingham, 1993.
- [69] Departamento Nacional de Planeación, «Los costos en la salud asociados a la degradación ambiental en Colombia ascienden a \$20,7 billones,» 7 Mayo 2017. [En línea]. Available: [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradaci%C3%B3n-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx).
- [70] Robert Bosch GmbH, *Emissions-Control Technology for Diesel Engines: Bosch Technical Instruction*, Germany: Bentley Pub, 2005.
- [71] P. A. Tipler y G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología I*, Barcelona: Reverté, 2004.
- [72] European comission, «on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles,» *Official Journal of the European Communities*, pp. 171-191, 1970.
- [73] N. Thonglek y T. Kiatsiriroat, «Agglomeration of sub-micron particles by a non-thermal plasma electrostatic precipitator,» *Journal of Electrostatics*, vol. 72, nº 1, 2013.