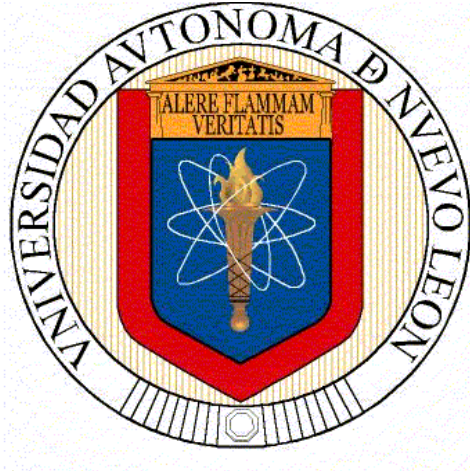


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

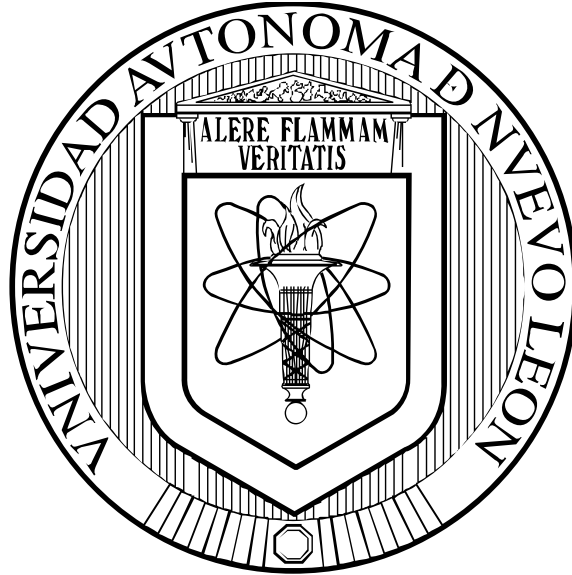
**“DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE PARTÍCULAS (GPF)
PARA SISTEMAS DE ESCAPE EN MOTORES DE GASOLINA”**

**PRESENTA:
GUILLERMO CAMPOS OCAMPO**

**EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**“DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE PARTÍCULAS (GPF)
PARA SISTEMAS DE ESCAPE EN MOTORES DE GASOLINA”**

**PRESENTA:
GUILLERMO CAMPOS OCAMPO**

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**“DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE PARTÍCULAS (GPF)
PARA SISTEMAS DE ESCAPE EN MOTORES DE GASOLINA”**

PRESENTA:
GUILLERMO CAMPOS OCAMPO

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

JULIO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

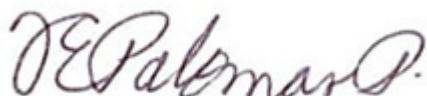
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis “Desarrollo y evaluación de un filtro de partículas (GPF) para sistema de escape en motores de gasolina” realizada por el alumno Guillermo Campos Ocampo con número de matrícula 1651386 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El comité de tesis



Dr. Santos Méndez Díaz

Asesor



Dra. Flor Palomar

Revisor

M.A. Gustavo Canales

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de estudios de posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Julio del 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero brindado durante esta investigación y desarrollo académico brindado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

A Katcon México.

A la Dra. Tania Paloma Berber Solano por su apoyo brindado durante esta investigación.

Al Dr. Santos Mendez Díaz por su incondicional apoyo y enseñanzas durante el desarrollo de toda esta investigación. Su disposición y directriz fueron puntos claves para poder culminar con éxito la Tesis desarrollada.

A la Dra. Flor Esthela Palomar por su apoyo y guía en el desarrollo experimental de la Tesis.

A la Dra. Alejandra Chávez por sus enseñanzas y la Dra. Ana Arizmendi por su apoyo en asesoría.

A mis Padres, Carlota Ocampo Estrada y Guillermo Campos Hernandez por su incondicional apoyo, constante motivación e infinito amor.

A mi hermano Oscar Marco Antonio Campos Ocampo por su amor y apoyo.

A Norma Garza Coello por todo su amor, apoyo y ánimo para lograr mis objetivos.

A mis compañeros Rubén Leal, Nestor Martinez, Fernando Ibarra, Daniel Favela, José Alfredo Perez, Juan Antonio Guerrero por su apoyo y enseñanzas.

Muchas gracias.

DEDICATORIA

Especial Dedicación....

A mis padres:

Carlota Ocampos Estrada

Guillermo Campos Hernández

A mi hermano:

Oscar Marco Antonio Campos Ocampo

A Mi Amor:

Norma Nidia Garza Coello

A Mis Seres queridos:

Virginia Hernández Flores.

Rosa Ocampo Estrada.

TABLA CONTENIDO

Contenido

AGRADECIMIENTOS	5
DEDICATORIA	6
TABLA CONTENIDO	7
LISTA DE ABREVIACIONES.....	10
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN	14
Antecedentes.	14
Justificación.....	21
OBJETIVO.....	23
Objetivo General	23
Objetivo Especifico	23
HIPÓTESIS	24
capítulo 1	25
filtros de partículas en la industria automotriz	25
1.1 Principios de funcionalidad y operación de los filtros de partículas. 25	
1.2 Operaciones Principales	28
1.2.1 Configuración de Filtro.	28
1.2.2 Mecanismo de Filtración.....	31
1.2.3 Regeneración	35
1.2.4 Desempeño.	37
1.2.5 Partículas	39
1.2.6 Origen de los gases de combustión.....	41

Descripción de Substancias que integran lo gases del motor.	42
1.2.7 Sistemas de Escape Automotriz.....	49
capítulo II.....	62
información tecnológica de los diferentes sistemas para la reducción de partículas.	62
2.1 Tecnología en motores de inyección directa. (GDI).....	62
2.1.1 Fuerza impulsora y consumo de combustible.	62
2.1.2 Desempeño en emisión de partículas.	65
2.1.3 Soluciones potenciales para el cumplimiento de partículas	67
2.2 Filtros de Partículas	70
2.2.1 Filtros de Partículas Diésel. (DPF)	70
2.2.2 Filtro de Partículas para Gasolina (GPF)	76
2.2.3 Configuraciones de Empaque para GPF	78
capítulo III	86
procedimiento experimental y mediciones	86
3.1 Parámetros del Proceso.....	86
3.2 Herramientas Computacionales.	88
3.2.2 Unigraphics (Nx)	88
3.2.1 Ansys Fluent	88
3.3 Equipo de Medición.	89
capítulo IV	95
Análisis de resultados y discusiones	95
4.1 Resultados Obtenidos.....	95
4.1.1 Diseño	95
4.1.2 Volúmenes Internos – Mallado de Geometría	100
4.1.3 Análisis de Fluidos	105

4.1.4 Prototipo Alfa.....	115
4.1.5 Validación de Prototipo Alfa, Ciada de Presión.	118
4.1.6 Prueba en motor de gasolina.....	121
4.1.7 Análisis de Fibras.....	125
4.1.7.1 Análisis Microscopia Electrónica de Barrido.....	125
4.1.7.2 Análisis Térmico Simultáneo (TGA).....	133
4.2 Conclusiones.....	138
4.2.1 Simulación CFD en relación con la validación.	138
4.2.2 Efecto del filtrado de las partículas bajo los análisis de Microscopia de Barrido y Termo gravimétrico de las fibras usadas en las pruebas de motor.....	140
4.2.3 Trabajo futuro y recomendaciones.	141
Bibliografía	142
índice de figuras	145
índice de tablas	149

LISTA DE ABREVIACIONES.

AQI: Índice de calidad del aire

ATM: Atmósfera (Unidad)

C: Carbono

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

EC: Elementos de carbono

H₂: Hidrógeno

HC: Hidrocarburos

O: Agua

N₂: Nitrógeno

NO_x: Óxidos de nitrógeno

O₂: Oxígeno

SO_x: Óxidos de azufre

TWC: Catalizador de tres vías

PM: Partículas de Hollín.

GDI: Inyección de Gasolina Directa.

PFI: Inyección de Puerto

NEDC: Ciclo de Manejo Europeo

FSD: Fibra Sucia Directa

FL: Fibra Limpia

FSCF: Fibra Sucia con Filtro

DTA-TGA-DSC: Análisis Térmico Simultáneo.

MEB-EDS: Microscopía Electrónica de Barrido.

EGR: Escape de Recirculación de Gases.

ECS: Sistema de Control de Emisiones.

SS: Stainles Steel (Acero Inoxidable)

CFD: Computational Fluid Dynamics (Análisis de Fluidos Computacional)

FSD: Fibra Sucia Directa

FL: Fibra Limpia

FSCF: Fibra Sucia con Filtro

MIG: Metal Inert Gas (Gas Inerte)

RESUMEN

La energía mecánica; indispensable para poner en acción diferentes máquinas. Se puede obtener utilizando energía térmica, hidráulica, solar y eólica. La que más se utiliza es la energía térmica obtenida de los combustibles de naturaleza orgánica. Los equipos energéticos que más aceptación han tenido, son los motores de combustión interna, a ellos corresponde más de un 80 % de la totalidad de la energía producida en el mundo.

En la Unión Europea se analiza muy de cerca los gases contaminantes expuestos al medio ambiente como lo son dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), PM Partículas (Particulate Matter por sus siglas en inglés) .Por todas estas razones se está intentado por todos los medios posibles la reducción de los gases de escape y sus emisiones contaminantes.

El aire está compuesto básicamente por dos gases: nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂). En un volumen determinado de aire se encuentra una proporción de nitrógeno (N₂) del 79% mientras que el contenido de oxígeno es aproximadamente de un 21%.

El nitrógeno durante la combustión; en principio, no se combina con nada y tal como entra en el cilindro es expulsado al exterior sin modificación alguna; excepto en pequeñas cantidades, para formar óxidos de nitrógeno (NO_x). El oxígeno es el elemento indispensable para producir la combustión de la mezcla.

Cuando se habla de la composición de los gases de escape de un vehículo se utilizan siempre los mismos términos: monóxido de carbono, óxido nítrico, partículas de hollín, hidrocarburos. Estas sustancias representan una fracción considerable del total de los gases de escape.

El problema es que la comisión europea ha permitido límites diez veces superiores a los motores de gasolina que a los diésel en cuanto a número partículas. Es por eso que en el 2017 entrara en vigor la Euro6c, y esta norma iguala ya las emisiones de partículas entre diésel y gasolina, reduciéndolas apreciablemente.

La Euro 5, instaurada en el 2009, insta a los fabricantes a limitar los gramos de aerosoles emitidos por el tubo de escape. Pero lo dañino no es tanto "la masa total" sino el tipo de partículas.

Las partículas emitidas, cuantas más pequeñas sean, más fácilmente se abren paso hasta nuestro sistema respiratorio, quedándose ancladas en los alveolos pulmonares, y por ende, siendo mucho más propensas a generar cáncer.

Sí, y eso es probablemente lo más perturbador. Tal y como ya se hace en algunos motores diésel, la gestión de partículas microscópicas se puede controlar mediante la instalación de filtros de partículas. El uso de estos filtros de partículas en los motores de inyección directa de gasolina lograría reducir las emisiones hasta el estándar de la Euro6c. Instalar un dispositivo de este tipo en un sistema de escape, tendrá un costo agregado al fabricante por coche vendido. Que los fabricantes no lo hagan ya, "porque la normativa no les obliga" nos deja claro que cuando se trata de hablar con enormes industrias de producción de vehículos, está por delante el beneficio económico antes que el cuidado de nuestra salud. Y es que ya no hablamos del medio ambiente o ecología a medio plazo. Estamos hablando de la emisión de partículas cancerígenas que la EU reconoce como contribuyentes de 406.000 muertes anuales en la Unión.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.

En marzo de 2001 la comisión Europea puso en marcha el programa Aire limpio para Europa (CAFE). Esto ha llevado a la adopción de una estrategia temática sobre la contaminación atmosférica que se dio a conocer el 21 de septiembre del 2005. Una de las conclusiones de la estrategia temática es incluir nuevos niveles en la reducción de emisiones del sector transporte (aéreo, marítimo y terrestre), de los hogares y de la energía, como también en los sectores agrícolas e industriales que necesitan ser incorporados para lograr los objetivos en la calidad del aire. En este contexto, la tarea de reducir las emisiones de los vehículos debe abordarse como parte de una estrategia global. Las normas Euro 5 y 6 son una de las medidas destinadas a reducir las emisiones de partículas y precursores de ozono como los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos [1]

El logro de los objetivos de la calidad del aire requiere un esfuerzo continuo para reducir las emisiones de vehículos. Por esa razón, la industria debe proporcionar información clara sobre los futuros valores en los límites de las emisiones [1]. Es por ello que la norma actual incluye, además de Euro 5, la fase Euro 6 en valores límite de emisión.

En particular, una reducción considerable de las emisiones de óxido de nitrógeno en el diésel es necesaria para mejorar la calidad del aire y poder respetar los valores límite de contaminación atmosférica.

Para ello es necesario alcanzar los valores de los límites ambiciosos en la fase Euro 6 sin tener que renunciar a las ventajas del motor diésel en cuanto al consumo de combustible y en las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono. Una configuración alcanzando esta medida para la reducción en las emisiones de óxido de nitrógeno en una etapa temprana proporcionará a largo plazo la seguridad de planificación a nivel europeo para los fabricantes de vehículos.

Basado en los conocimientos actuales, el nivel de las emisiones en partículas procedentes de los motores convencionales de inyección de combustible Fuel Injection (PFI) que inyectan el combustible en los colectores de admisión o en los puertos de entrada en lugar de inyectarlos directamente en la cámara de combustión. Parece justificado limitar la acción reguladora, por el momento solo a los vehículos equipados con motores de inyección directa, sin excluir la investigación y el seguimiento de la evolución de las emisiones de partículas de los motores de encendido por chispa, en particular respecto al espectro de tamaño y composición química de las partículas emitidas, así como a las emisiones reales de conducción. La comisión debería proponer nuevas medidas reglamentarias, en caso de ser necesario, teniendo en cuenta la futura cuota de mercado de los motores de PFI [1]

Reglamento (CE) n ° 692/2008 ha establecido un límite del número de partículas en las emisiones de $6 \times 10^{11} \text{ # / km}$ para los vehículos Euro 6 diesel. En conformidad con el principio de la legislación de neutralidad tecnológica, un límite de emisión respectiva para los vehículos de encendido por chispa debe ser el mismo ya que no hay evidencia que sugiere que las partículas emitidas por los motores de PI tienen una menor toxicidad específica de las partículas emitidas por los motores diésel [2]

Las partículas emitidas por los vehículos pueden depositarse en los alvéolos de los pulmones, que puede conducir a enfermedades respiratorias y cardiovasculares y aumentar la mortalidad. Por lo tanto, está en el interés público tener un alto nivel de protección sobre esas partículas.

Los Filtros de partículas Gasolina (GPF por sus siglas en ingles), es una tecnología eficaz post-tratamiento utilizada para disminuir las partículas emitidas por los vehículos de encendido por chispa, se espera que estén disponibles para su integración en algunos vehículos para la Euro 6, a un costo razonable. Además, parece muy probable que en un plazo de tres años después de las fechas establecidas de la Euro 6 en el artículo 10 del Reglamento (CE) n ° 715/2007, una reducción similar de las emisiones en PN se puede lograr sustancialmente con medidas internas del motor con costos más bajos para muchas aplicaciones. Este reglamento debe ser aplicable a todas las condiciones de trabajo del motor para asegurarse de que en ausencia de sistemas de pos-tratamiento, los niveles de emisiones en condiciones reales no se agraven [2]

Por otra parte, la norma Euro6 se declina en Euro6b y Euro6c con el fin de permitir que el fabricante de automóviles pueda adaptar su vehículo a una legislación muy restrictiva. Entre 2014 y 2017, los vehículos deben pasar la norma Euro6b con la prueba NEDC (New European Driving Cycle) por sus siglas en ingles. En cuanto el vehículo diésel las PM debe estar por debajo de 4,5 mg / km y las PN debe estar por debajo de 6×10^{11} # / km. En cuanto a los vehículos equipados con un motor de gasolina de inyección directa los PM debe estar por debajo de 4,5 mg / km y las PN abajo 6×10^{12} # / km. Esta declinación prepara a los fabricantes para la siguiente Euro6c que entrara en vigor desde 2017 hasta 2020. Esta norma será más restrictiva que la anterior. De hecho, el vehículo tendrá que aprobar la legislación con el WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures) por sus siglas en ingles. Y las pruebas RDE (Real Driving Emission) por sus siglas en ingles. Ambos motores diésel y de gasolina deberán tener las PM por debajo de 4,5

mg / km y las PN debajo 6×10^{11} # / km. Para esta norma ningún vehículos está autorizado a emitir más de 120 mg / km de CO₂ [3].

La Figura 1. 1 explica el comportamiento en los límites de partículas al medio ambiente se puede notar que conforme pasa el tiempo los límites de las emisiones son más estrictos [3]



	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2025
	Euro5		Euro6b			Euro6c		Euro7?		
	NEDC Diesel: PM 5.0 mg/km Gasoline (DI): PM 5.0 mg/km		NEDC Diesel: PM 4.5 mg/km PN 6×10^{11} #/km Gasoline (DI): PM 4.5 mg/km PN6 x 10¹² #/km			WLTC + RDE Diesel/Gasoline (DI): PM 4.5 mg/km PN6 x 10¹¹ #/km All: CO₂ 120 g/km		WLTC + RDE Low Temp? PN / PM? All: CO₂ 95 g/km		
	LEV2		LEV3		LEV3			LEV3		LEV3
	FTP Diesel/Gasoline(DI): PM 10 mg/mile		FTP Diesel/Gasoline (DI): PM 6 mg/mile		FTP Diesel/Gasoline (DI) Phase-in: PM 3 mg/mile			FTP All: PM 3 mg/mile		FTP All: PM 1 mg/mile

FIGURA 1. 1 TENDENCIA EN LA REGULACIÓN DE PARTÍCULAS [4]

Con el fin de limitar la contaminación producida por los vehículos de carretera, el reglamento introduce exigencias comunes a las emisiones de los vehículos de motor (normas Euro 5 y Euro 6). Asimismo, establece medidas que permiten mejorar el acceso a la información sobre la reparación de los vehículos y promover la producción rápida de vehículos que cumplan con las presentes disposiciones [4].

El reglamento [5] se refiere a los vehículos cuya masa de referencia no supera los 2610 kg. Por ejemplo los coches particulares, camionetas y vehículos

comerciales destinados tanto al transporte de pasajeros o mercancías como a algunos usos especiales (por ejemplo, ambulancias), así como vehículos que estén equipados con motores de encendido por chispa (motores de gasolina, de gas natural) o de encendido por compresión (motores diésel).

Además de los vehículos previamente mencionados, se puede solicitar que se incluyan también a los vehículos destinados al transporte de pasajeros o mercancías con una masa de referencia de entre 2610 kg y 2840 kg.

Con el fin de limitar al máximo el impacto negativo de los vehículos sobre el medio ambiente y la salud, el reglamento contempla una amplia gama de emisiones contaminantes: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PM). Entre dichas emisiones se incluyen las emisiones de escape, las de evaporación y las del cárter del motor.

En el anexo I del reglamento se recogen los valores límite de las emisiones para cada categoría de emisiones contaminantes y para los distintos tipos de vehículos mencionados anteriormente [5].

Norma Euro 5 [2]

Emisiones procedentes de los coches de gasolina o que funcionan con gas natural o con GLP:

Monóxido de carbono: 1000 mg/km

Hidrocarburos no metanos: 68 mg/km

Hidrocarburos totales: 100 mg/km

Óxidos de nitrógeno (NO_x): 60 mg/km (o una reducción del 25 % de las emisiones respecto de la norma Euro 4

Partículas (únicamente para los coches de gasolina de inyección directa): 5 mg/km (introducción de un límite que no existía en la norma Euro 4).

En lo que respecta a las camionetas y otros vehículos comerciales ligeros destinados al transporte de mercancías, el reglamento incluye tres categorías de valores límite de las emisiones en función de la masa de referencia del vehículo: inferiores a 1305 kg, entre 1305 kg y 1760 kg, y superiores a 1760 kg. Los límites aplicables a esta última categoría valen también para los vehículos destinados al transporte de mercancías.

Norma Euro 6

Todos los vehículos equipados de un motor tendrán la obligación de reducir considerablemente sus emisiones de óxidos, HC y de partículas (PM) a partir de la entrada en vigor de la norma Euro 6. Por ejemplo, las emisiones procedentes de los coches y de otros vehículos destinados al transporte se limitarán a 80 mg/km (lo que representa una reducción suplementaria de más del 50 % respecto de la norma Euro 5). Se reducirán, asimismo, las emisiones combinadas de hidrocarburos y partículas de los vehículos (coches y otros vehículos destinados al transporte) para limitarlas [2].

Aplicación de las normas

A partir de la entrada en vigor de las normas Euro 5 y Euro 6 Figura 1. 2, deberán rechazar la matriculación, venta y puesta en servicio de aquellos vehículos que no respeten los límites de emisión. Se concederá un plazo suplementario de un año a los vehículos de transporte de mercancías y a los vehículos diseñados para cubrir necesidades sociales específicas [2].

La norma Euro 5 es aplicable desde el 1 de septiembre de 2009 en lo que respecta a la homologación y será aplicable a partir del 1 de enero de 2011 en lo que se refiere a la matriculación y venta de las nuevas clases de vehículos.

La norma Euro 6 será aplicable a partir del 1 de septiembre de 2014 en lo que respecta a la homologación, y del 1 de septiembre de 2015 en lo que se refiere a la matriculación y venta de las nuevas clases de vehículos.

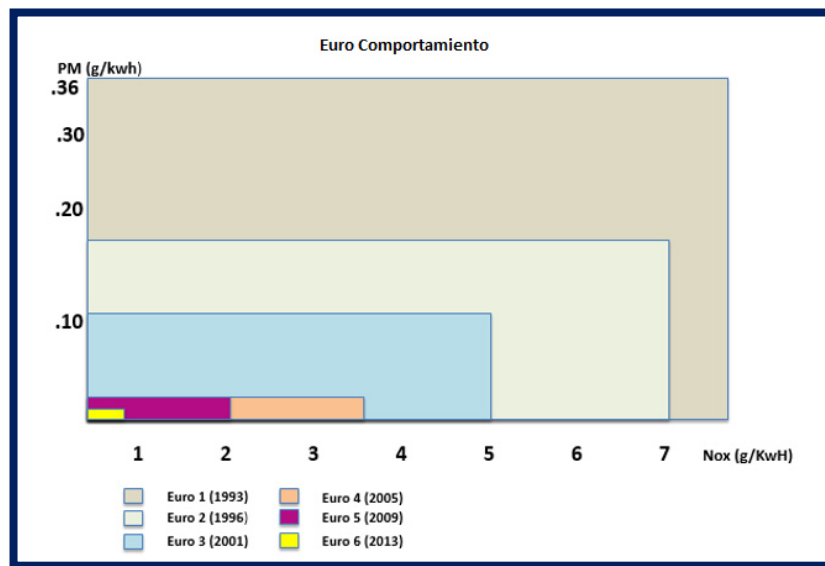


FIGURA 1. 2 COMPORTAMIENTO DE LA NORMA EURO1-2-3-4-5-6 [2]

JUSTIFICACIÓN

Debido al incremento en los niveles de contaminación que impactan al medio ambiente, causado en gran parte por la cantidad de emisiones que producen los vehículos diariamente; especialmente los de combustión interna; el impacto ecológico ha sido significativo.

Pese a los esfuerzos de los fabricantes al realizar modificaciones en el motor para reducir los niveles de contaminación; los gases de escape generados en el proceso de combustión siguen siendo contaminantes, por lo que es necesario que estos gases nocivos se sometan a tratamientos mediante dispositivos adecuados que permitan reducir los niveles de contaminación. En la actualidad, en la industria automotriz no existe en el mercado un filtro de partículas de carbono para motores de gasolina (GPF).

Por la necesidad urgente de preservar el ambiente, se detecta la necesidad como Ingeniero Automotriz de aportar el conocimiento para evitar la contaminación del medio ambiente, mediante la implementación de un filtro que ayude a reducir las emisiones contaminantes provocadas por los vehículos; contribuyendo de esta manera a disminuir y preservar un ambiente sano para las futuras generaciones.

El sistema trabaja con los gases quemados del motor aprovechando las altas temperaturas de los mismos, con esto se logra reducir los niveles de hidrocarburos no quemados y monóxidos de carbono, teniéndose como resultado la disminución en la emisión de gases nocivos para la salud.

Durante el proceso de combustión en el motor de un automóvil se genera una gran cantidad de compuestos que pueden contaminar el aire debido a una combustión incompleta del combustible y de los componentes del aire, tales como hidrocarburos no quemados (Partículas).

La contaminación es la acumulación de productos tóxicos en el aire que pueden provocar graves afecciones a los seres humanos, animales y la vegetación. La contaminación producida por los automóviles proviene de tres fuentes distintas, gases del cárter del motor, gases de escape y vapores de gasolina. Siendo los más contaminantes los gases de escape. Ello nos ha obligado a tomar medidas para reducir la contaminación, limitando el porcentaje de gases nocivos emitidos por el escape a través de la implementación de un sistema de tratamiento de gases de escape.

Este es un sistema que se puede aplicar en todos los vehículos de combustión interna (Gasolina), con el único objetivo de reducir la contaminación del medio ambiente.

OBJETIVO

Objetivo General

Conocer las acciones y comportamientos del filtro de partículas (GPF) en caída de presión, reducción de partículas y su impacto en el sector ambiental para la reducción de las partículas de carbono, que serán reguladas en las nuevas normas europeas.

Objetivo Específico

Desarrollar la configuración para un filtro de partículas GPF; en su modalidad pegada al motor (Close Couple) ; para la reducción de partículas contaminantes, emitidas por motores de gasolina. Implementando una configuración interna del filtro, donde el sistema no se vea afectado por caídas de presión y/o variaciones de temperaturas; que puedan afectar el funcionamiento del sistema de escape u otros componentes.

HIPÓTESIS

Empleando un filtro de partículas para gasolina con fibras metálicas (GPF por sus siglas en inglés) en su configuración pegada al motor (Close-Couple por sus siglas en inglés), se puede reducir emisiones de partículas hacia el medio ambiente; sin presentar afectación o un impacto drástico en la variable de presión en el sistema de escape.

En esta configuración se espera encontrar buenas condiciones de flujo en términos de caída de presión, debido a la configuración geométrica de los componentes internos del filtro.

CAPÍTULO 1

FILTROS DE PARTÍCULAS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

1.1 Principios de funcionalidad y operación de los filtros de partículas.

Los filtros de partículas diésel capturan las partículas de diésel para evitar su liberación a la atmósfera. Algunos de los materiales que son empleados en los filtros se han estado desarrollando con el paso del tiempo y por ende muestran eficiencias muy notables en la filtración de partículas, muchas de las veces mayor al 90%, así como también muestran mejora en la durabilidad mecánica y térmica. De hecho las trampas para diésel son los más eficaces en la reducción de las emisiones de partículas. En específico, debido a los mecanismos usados en sus depósitos de partículas, estas trampas son eficaces en el control de la fracción sólida de partículas, incluyendo el carbono elemental (hollín) y lo relacionado con la emisión de humo negro. Se debe tener en cuenta que las trampas pueden tener una eficacia limitada, o ser totalmente ineficaz, en el control de las fracciones no sólidos de las PM (Particulate Matter por sus siglas en ingles), como en el SOF (Soluble Organic Fraction por sus siglas en inglés) o partículas de sulfato. Por esta razón, los sistemas de las trampas están diseñadas para controlar el total de las emisiones de las partículas y son propensos a incorporar componentes adicionales dirigidos a este tipo de emisiones como lo son para el SOF (por ejemplo, catalizadores de oxidación) y las partículas de sulfato [6].

Todos los filtros de partículas diésel son llamados filtros DPF (Diesel Particulate Filter por sus siglas en inglés). Aunque el término "trampa" abarca una gama más amplia de dispositivos, a menudo se utiliza como sinónimo de "filtro de partículas". El término "trampa de partículas" para este tipo de dispositivos es usado más frecuentemente en la literatura antigua. Hoy en día, el término "filtro de partículas" se utiliza más comúnmente.

Existen varios mecanismos de deposición de partículas, como lo es asentamiento por gravedad, la separación centrífuga, y la captura electrostática, se usan comúnmente en los equipos de separación de polvo industrial. El asentamiento por gravedad y separación centrífuga son ineficaces en la captura de partículas debido a su pequeño tamaño de micras y su baja densidad.

Debido a la baja densidad aparente de las partículas, que es típicamente por debajo de $0,1 \text{ g / cm}^3$, los filtros de partículas diésel pueden acumularse rápidamente grandes volúmenes de hollín [6].

Todos los días, varios litros de hollín se pueden recolectar de un camión pesado o motor del autobús. Estas partículas causarían una caída fuerte de presión en el filtro, lo cual afectaría negativamente al funcionamiento del motor. Por lo tanto, los sistemas de filtros deben proporcionar una manera de eliminar las partículas del filtro con el fin de restaurar su capacidad de recolección de hollín. Esta eliminación de partículas, conocida como regeneración del filtro, puede llevarse a cabo bien de forma continua, durante el funcionamiento regular del filtro, o con el sistema tiempo a tiempo, después de una cantidad acumulada pre-definida de hollín. En cualquier caso, la regeneración de los sistemas de filtro debe ser realizada sin la intervención del conductor. En la mayoría de los casos, se utiliza la regeneración térmica de filtros, donde las partículas recogidas se eliminan de la trampa por oxidación, principalmente en el dióxido de carbono (CO_2).

La regeneración térmica, representada esquemáticamente en la Figura 1. 3, es sin duda el método más limpio y más atractivo de operar en los filtros.

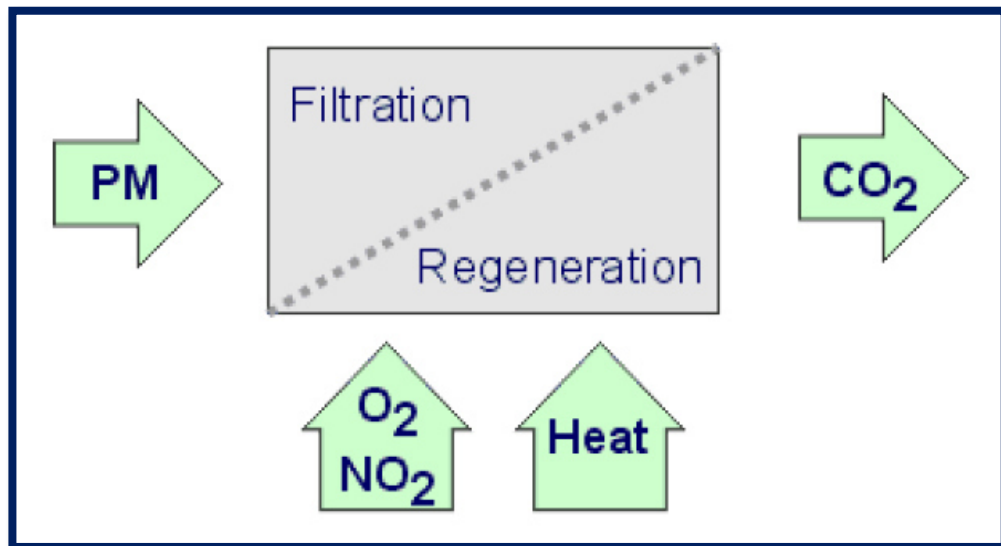


FIGURA 1. 3. ESQUEMA DEL DPF CON REGENERACIÓN TÉRMICA.

Para asegurar una regeneración eficiente, el filtro debe operar a suficiente temperatura y con los suficientes gases oxidantes, como el oxígeno o el dióxido de nitrógeno, que deben de suministrarse al filtro. En algunos sistemas de filtrado, la fuente de calor (así como de los gases oxidantes) está en la propia corriente del gas, dentro del escape. En este caso, es conocido como el filtro pasivo, el filtro se regenera continuamente durante el funcionamiento regular del motor. Los filtros pasivos trabajan a una temperatura de oxidación del hollín a un nivel que puede ser alcanzado por los gases del escape durante el funcionamiento del vehículo. Otro enfoque que puede ser considerado para facilitar la regeneración del filtro, es la de utilizar una estrategia activa para aumentar la temperatura del filtro. La regeneración de este tipo de sistemas, son conocidos como filtros activos, generalmente se realiza dentro de un periodo, según lo determinado por el sistema de control del vehículo [6].

1.2 Operaciones Principales

1.2.1 Configuración de Filtro.

El diseño más común para un filtro de partículas, hablando específicamente en un filtro de partículas para diésel está basado en el monolito cerámico. Se trata de un extruido cerámico de forma cilíndrica oval con muchos canales paralelos de tamaño pequeño que corren en la dirección axial del substrato cerámico. Esta es una extensión de la familia de los catalizadores y de su tecnología que es muy similar a la de un convertidor catalítico. De hecho, el diseño de los filtros de partículas para diésel, se ha derivado de los substratos de flujo continuo usado en los automóviles. Sin embargo, hay dos importantes diferencias entre estas estructuras; una son los monolitos de flujo de pared que están hechos de cerámicas de alta porosidad la cual es controlada con precisión, y la otra son los canales adyacentes en las paredes de flujo del filtro que están conectados alternativamente en cada extremo, obligando así a que el gas fluya a través de las paredes porosas que actúan como un medio de filtración. La diferencia entre el patrón de flujo a través de la pared del substrato se ilustra en la Figura 1. 4. La Figura 1. 4, nos muestra este patrón de flujo a través del substrato; así como su comportamiento [7].

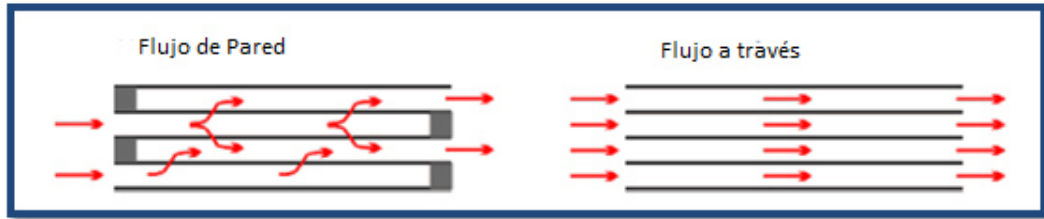


FIGURA 1. 4 PAREDES DE FLUJO Y PATRONES DE FLUJO A TRAVÉS DE LOS SUBSTRATOS

Las paredes de los substratos utilizadas en los filtros se distinguen fácilmente de los substratos de un catalizador por el patrón característico de tablero de ajedrez creado por las celdas abiertas conectadas a su entrada así como en la salida. En la Figura 1. 5. Se muestra se muestra la foto de las paredes de los substratos utilizados en catalizadores como en filtros.

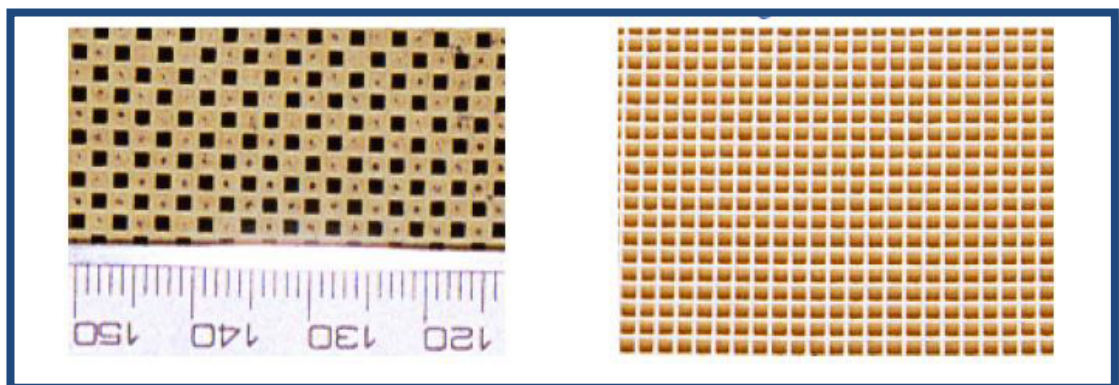


Figura 1. 5 MUESTRA INTERNA DE LAS CELDAS DE UN FILTRO Y DE UN CATALIZADOR.
IZQ. FILTRO DER. CATALIZADOR AMBOS SUBSTRATOS CERÁMICOS.

Otros tipos de diseño se han intentado desarrollar basados en cartuchos hechos de fibras cerámicas, en varios tipos de espumas, o estructuras de metal sinterizado. Una visión general de estas tecnologías se presenta en los artículos de investigaciones sobre filtros para partículas [7].

Independientemente del tipo de material o diseño, los filtros son embutidos en un recipiente de acero comúnmente llamada carcasa y que va instalada en el sistema de escape del vehículo. El DPF (Diesel Particulate Filter por sus siglas en inglés) puede ser empaquetado como una unidad independiente; se asemeja a un convertidor catalítico pero por lo general de tamaño más grande. En un diseño alternativo, el DPF se coloca dentro de un silenciador. Sin embargo, debido a las buenas propiedades de atenuación de ruido de muchos de los filtros, este puede sustituir con frecuencia el silenciador sin ningún tipo de dispositivo adicional para la atenuación del ruido. Un ejemplo de diseño de un filtro de partículas diésel se muestra en la Figura 1. 6.



Figura 1. 6 MUESTRA INTERNA DE UN FILTRO DE PARTÍCULAS PARA DIÉSEL.

1.2.2 Mecanismo de Filtración.

La recolección de partículas hecha por un filtro de partículas ya sea diésel o de gasolina; se basa en la separación de partículas quemadas que son transportadas con la corriente del gas que está dentro del sistema y que se van depositando en una superficie de “recolección” del filtro. Esta separación implica el paso del gas a través de una barrera porosa que retiene las partículas. Los filtros, dependen del tipo de la barrera, se pueden dividir en filtros de profundidad y los filtros de tipo superficie. En los filtros de profundidad, el tamaño del poro del filtro es más grande que el diámetro de las partículas a recolectar [7]. Las partículas se depositan en los canales de filtrado a través de una combinación de los mecanismos de filtración que son accionados por diversos campos de fuerza. Como un ejemplo, esos campos de fuerza pueden estar relacionadas con la velocidad o la concentración de gradientes en el gas. En los filtros de tipo superficie el diámetro del poro es menor que el diámetro de partícula. Las partículas se depositan en la pared del filtro a través de un tamizado. Estos dos tipos de filtración se muestran en la Figura 1. 7.

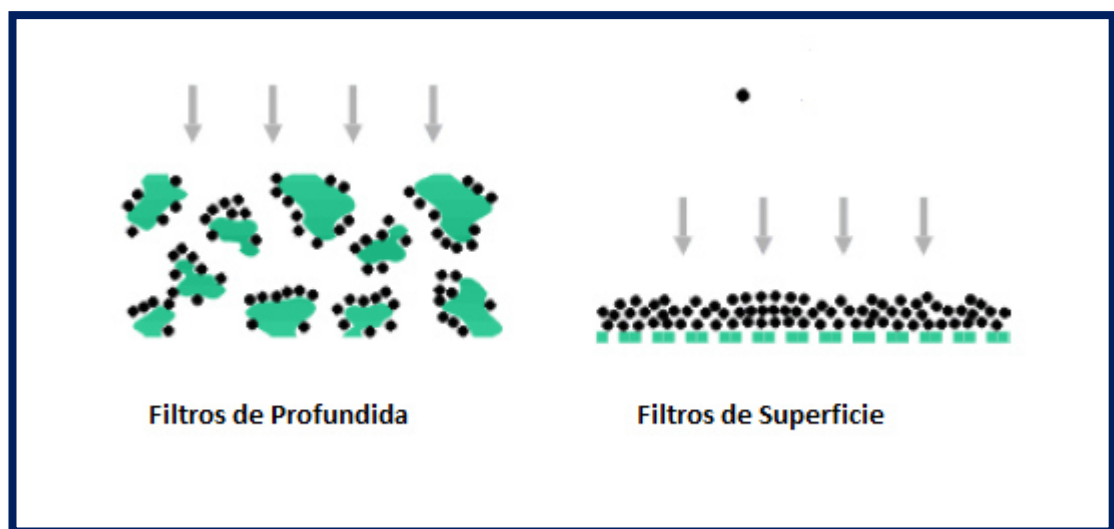


Figura 1. 7 MECANISMOS DE FILTRACIÓN.

La filtración de profundidad es el principal mecanismo de filtración en la mayoría de los dispositivos de filtración de partículas, así como en la mayoría de los filtros de diésel. Por ejemplo, los limpiadores para admisión de aire del motor, trabajan primordialmente a través de la filtración profunda. En el filtrado de superficie la capa de partículas, es en sí mismo el medio de filtro principal en los filtros tipo superficie. Esa capa se conoce comúnmente como "Pastel de filtración" y el proceso se denomina como "filtración tipo pastel". Es muy común en la filtración de líquidos. Sin embargo, los filtros de partículas, tales como los monolitos de pared cerámica, pueden trabajar a través de una combinación de filtrado de profundidad y filtrado de superficie. Una filtración de superficie desarrolla cargas de hollín más altas, cuando la capacidad de la filtración profunda está saturada y se forma una capa de partículas que comienza a cubrir la superficie [7].

La filtración de profundidad se basa en tres mecanismos de deposición:

Deposición por difusión.

Deposición inercial.

Intercepción de flujo.

Estos mecanismos se ilustran en la Figura 1.9 y Figura 1.10. El círculo en el centro representa un cuerpo colector en el filtro, por ejemplo una fibra en un filtro de fibra cerámica. Los flujos de gases del escape se muestran en todo el filtro, como lo indican la Figura 1.9 y Figura 1.10. Las pequeñas esferas en naranja representan partículas que viajan con el flujo del gas.

Deposición por difusión:

Figura 1. 8 Depende del movimiento Browniano exhibido por las partículas más pequeñas, en particular aquellos por debajo de 0,3 micras de diámetro. Estas partículas no se mueven de manera uniforme a lo largo de las líneas de corriente del gas. Más bien, se difunden desde el gas a la superficie del cuerpo recolector.

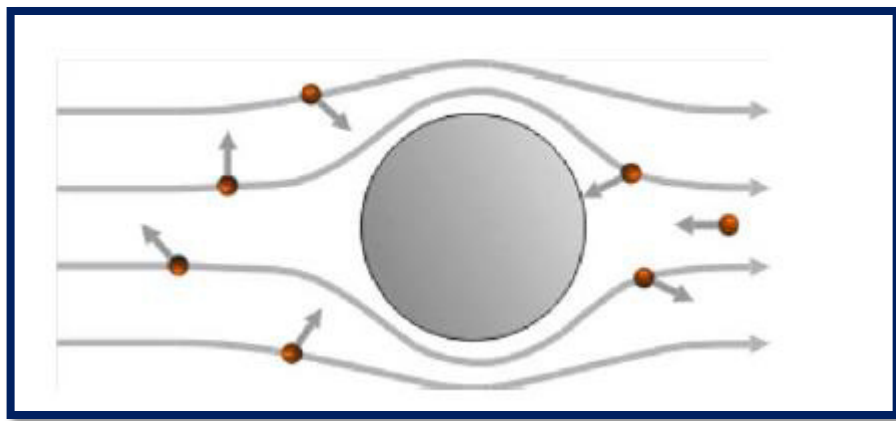


FIGURA 1. 8 DEPOSICIÓN POR DIFUSIÓN.

Deposición Inercial

También llamada interceptación por inercia, se hace más presente con el aumento de tamaño de partícula (masa). Las partículas arrastradas por la corriente del gas; al acercarse al cuerpo recolector, tienden a seguir la corriente golpeando al cuerpo debido a su inercia Figura 1. 9.

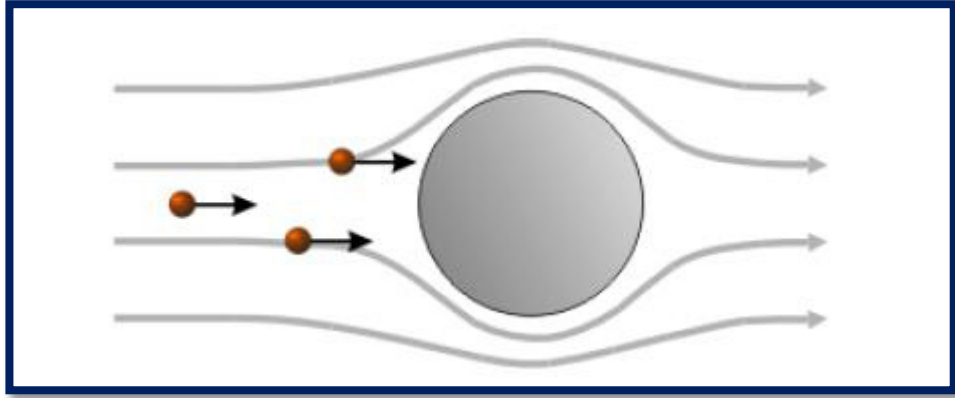


FIGURA 1. 9 Deposition por Inercial.

Intercepción en Línea de Flujo:

Se puede producir cuando una línea de flujo pasa dentro de un radio del tamaño de una partícula o menor a esta alrededor del cuerpo recolector. Entonces, una partícula que viaja a lo largo de la línea de la corriente va a tocar el cuerpo recolector y puede ser recogido sin la influencia de la difusión Browniano o de Inercia Figura 1. 10.

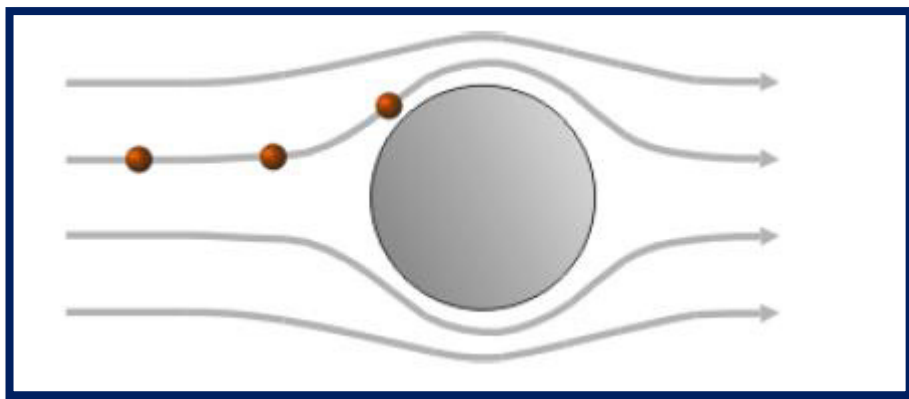


FIGURA 1. 10 Intercepción en línea de flujo.

El rendimiento de los filtros de partículas se puede expresar como la eficiencia de filtración o de penetración. La eficiencia de filtración es la relación de masa de la materia recogida en el filtro con la materia en partículas que entra en el filtro. La penetración es la relación de masa de las partículas que escapan relacionadas con las partículas que entran en el filtro. Tanto la eficiencia de filtración y la penetración pueden ser expresadas como porcentajes [7].

La filtración de profundidad se caracteriza por la baja eficiencia de filtración y por tener menor caída de presión que la filtración de pastel. Partículas que ya están depositadas en un filtro de profundidad pueden ser también re-arrastradas por el gas causando una disminución en la eficiencia de la filtración. Ese fenómeno se denomina "presión excesiva" de la materia recogida. La presión excesiva se produce a altas velocidades de flujo de gas del escape o en aceleraciones flujo rápido.

La filtración de pastel se caracteriza por una mayor eficiencia de filtración y relativamente en alta caída de presión. La caída de presión aumenta constantemente con el aumento de espesor de la superficie de partículas formada por la filtración de pastel.

1.2.3 Regeneración

Todos los materiales que se emplean en el filtro están diseñados para mantener una cierta cantidad de partículas. Si el filtro se sobrecarga, las partículas empiezan a crear una obstrucción en el flujo de gas, que se manifiesta en un aumento de la caída de presión y puede dar lugar a la obstrucción del filtro.

Por lo tanto, el sistema del filtro debe proporcionar mecanismos confiables de regeneración para garantizar un funcionamiento sin problemas. Algunos sistemas de filtrado de partículas están regenerando continuamente. Otros, que se regeneran periódicamente, deben realizar esta operación con bastante frecuencia, por lo general al menos una vez por día. El gas del escape y/o la temperatura del filtro es el parámetro más importante.

La oxidación de las partículas de carbono se puede considerar un proceso cinético, lo cual puede ser descrito por las leyes de la cinética. Ciertas analogías pueden ser comparadas entre la oxidación de los gases en el convertidor catalítico y la oxidación del hollín en los filtros de partículas, el cual puede ser descrito por las leyes de la cinética por una reacción química.

Una vez más, ciertas analogías se pueden comprar entre la oxidación de los gases en el convertidor catalítico y la oxidación de hollín en los filtros, especialmente los que funcionan en el régimen de la regeneración continua. Los filtros proporcionan tiempos de residencia más largos (en relación con convertidores catalíticos), que son necesarios para oxidar las partículas grandes de tamaño (en relación con moléculas de gas). El rango de oxidación de las partículas aumentan a temperaturas más altas, posiblemente hay desaceleración a cero, a bajas temperaturas. Contrariamente al convertidor catalítico, sin embargo, el material que no se oxida, no puede ser liberado del filtro [7].

En lugar de ello, las partículas no oxidadas se acumulan hasta que las condiciones cambien (por ejemplo, como resultado del aumento de temperatura), el rango de oxidación aumentan. Es importante que el sistema del escape pueda proporcionar mecanismos que impiden la acumulación de partículas y que por ende exceda la capacidad de retención en el filtro.

Las fallas en el sistema del filtrado por lo general resultan tener un mayor impacto en el vehículo que los mismos convertidores catalíticos. Un catalizador desactivado genera emisiones excesivas, pero en la mayoría de los casos no crea efectos adversos para el motor o del vehículo. Por otro lado, un filtro de partículas que presente fallas y que no hace la reacción de regenerar es probable que se tape, sature el motor y genere la inmovilización del vehículo [7].

1.2.4 Desempeño.

Debido a los mecanismos de recolección física de partículas, como se mencionó anteriormente, los filtros son efectivos en la recolección de la fracción sólida de partícula, incluyendo el carbono y cenizas. La eficacia de los filtros en el control de la fracción orgánica (SOF Soluble Organic Fraction por sus siglas en inglés) depende del tipo de filtro y de sus condiciones de operación. Además, los filtros de partículas no sólo son ineficaces en el control de partículas de sulfato, puede aumentar significativamente esta emisión a través de la oxidación catalítica del dióxido de azufre debido al convertidor catalítico.

El impacto de cada partícula en la composición de las PM se ilustra en la Figura 1. 11. Es claro a partir de la de la gráfica que el filtro de partículas es extremadamente eficaz en la eliminación de partículas elementales de carbono (negro, parte inferior de cada barra). SOF fracciones de combustible y de aceite están algo reducida por la porción de catalizador del sistema de filtro. A pesar del uso de combustibles de ultra bajo contenido de azufre, las partículas de sulfato se incrementan.

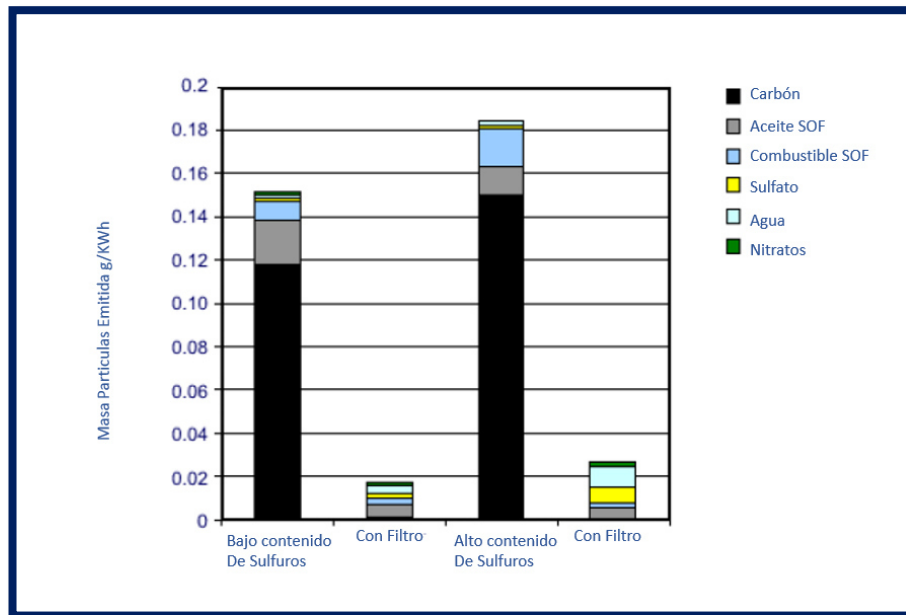


FIGURA 1.11 Efecto del filtro de partículas en la composición de pm.

Para entender las capacidades de rendimiento de los filtros de partículas, uno tiene que estar familiarizado con la definición y composición de partículas. Las partículas se componen de tres fracciones principales: (1) carbono elemental y cenizas, (2) de la fracción orgánica (SOF), y (3) las partículas de sulfato. Los mecanismos explicados para la recolección de partículas son eficaces en la recolección de sólidos. Sin embargo, una parte significativa de partículas líquidas, tanto SOF y sulfatos, están en la fase gaseosa cuando las condiciones son de alta temperatura dentro del sistema. La formación de partículas líquidas (condensación) se produce sólo después de que los gases de escape son enfriados.

Cuanto mayor sea la temperatura del filtro, más de las partículas SOF pasaran a través como vapores. La mayoría de los filtros pasivos incorporan catalizadores que disminuyen la temperatura de oxidación de partículas para facilitar la regeneración.

Dado que estos catalizadores también oxidan los hidrocarburos debido a que son más eficaces en la eliminación de partículas SOF. Las partículas de sulfato se componen principalmente de ácido sulfúrico que se forma dentro del sistema. Esto se produce sólo a bajas temperaturas del sistema de escape. Por esta razón los filtros pueden mostrar la disminución de la eficiencia de filtración debido a la generación de partículas de sulfato. Los filtros que utilizan catalizadores de oxidación de alta actividad deben funcionar con combustibles de azufre en baja cantidad (digamos, por debajo de 50 ppm S) para controlar la emisión de partículas de sulfato. Si se utilizan combustibles de niveles más altos de azufre, el catalizador genera sulfatos, lo que resulta en un riesgo para la filtración de partículas. Según la carta de este tipo de regulaciones, la generación de ácido sulfúrico en el filtro no se considera un proceso contraproducente. Si se descuidan los sulfatos, la eficiencia total de la mayoría de los sistemas de filtrado estará en el 85% - 95%.

1.2.5 Partículas

Si bien la mayor parte de las emisiones de partículas están compuestas de materia sólida, que son el principal contribuyente en las emisiones de las partículas. Si observamos que el material líquido, incluyendo sulfatos y SOF, se forma en el sistema de muestreo de partículas, es decir, después del filtro, este mismo será ineficaz en la reducción de partículas de las emisiones [8].

Las emisiones de alto número de partículas están claramente relacionados con sulfatos, que se generan a altas temperaturas del escape, como lo indican los números de partículas en las pruebas con mayor contenido de azufre en el combustible.

En lo general, el impacto en los filtros de los diferentes precursores en la filtración de las partículas, está por definirse. Los principales parámetros que influyen en el rendimiento de los filtros o en la evaluación del desempeño se pueden enumerar de la siguiente manera:

- La presencia de precursores de nano partículas. Esto incluye SO_3 / ácido sulfúrico que puede ser generado a partir de los precursores de azufre en el combustible. Por lo tanto, el combustible con contenido de azufre más bajo resultará en una menor emisión de nano partículas. Los hidrocarburos son otro tipo de precursores de nano partículas. Si los HC se eliminan del sistema, por ejemplo, mediante el uso de un catalizador, se puede esperar que las emisiones de nano partículas sean muy bajas. Tales fenómenos como la adsorción / desorción de los HC del hollín que se acumula en el sistema de escape que también puede contribuir a la emisión global del número de partículas [8].

- La temperatura del gas en el escape. Las partículas de sulfato se forman en condiciones de alta temperatura a plena carga del motor. Por lo tanto, el mayor número de partículas se medirán durante los ciclos de prueba cuando el motor este más calientes.

- Los parámetros de muestreo para partículas. En ausencia de métodos de mediciones estándar para la emisión de número de partículas, los laboratorios son libres de elegir cualquier configuración de medición y parámetros. Tales como relaciones de dilución o tiempos de residencia en el túnel de dilución.

Varios laboratorios usan técnicas de acondicionamiento donde la muestra se hace en gas "seco" mediante la eliminación de los precursores de nano partículas volátiles. Si los filtros de partículas se evalúan utilizando esta

técnica, muestran consistentemente buen rendimiento en la reducción del número de partículas, como se muestra en el ejemplo gráfico de la Figura 1.12. Esto es una indicación de que las nano partículas sólidas son retenidas con una alta eficiencia.

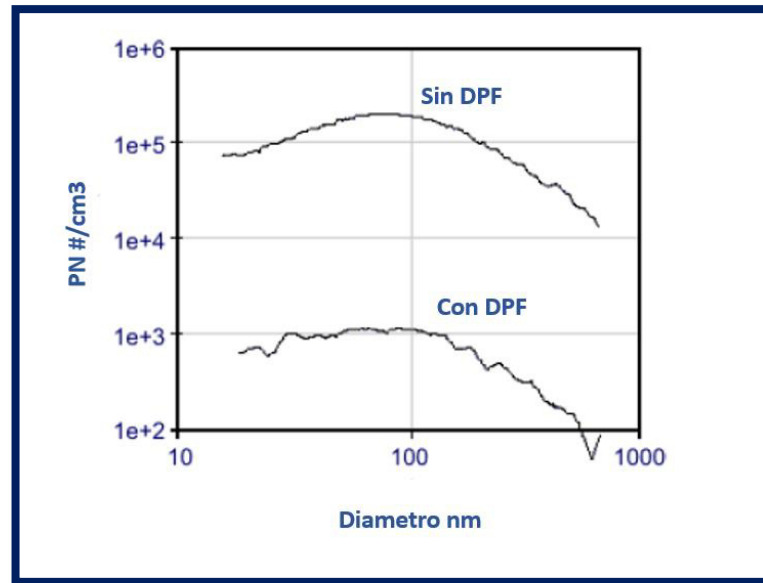


FIGURA 1.12 Muestreo de partículas con y sin filtro [8]

1.2.6 Origen de los gases de combustión.

La energía química contenida en el combustible, cuando es quemada es liberada en forma de calor produciendo trabajo, para que el combustible se quemara es necesario que exista oxígeno (aire), y ese porcentaje de aire introducido varía de acuerdo a las necesidades del motor y al tipo de combustible.

Cuando la quema es completa, todo el carbono (C) presente en el combustible, reacciona con el oxígeno formando dióxido de carbono CO₂; todo el

hidrógeno (H) presente en el combustible, también reacciona con el oxígeno (O₂) formando vapor de agua H₂O; y finalmente todo el hidrógeno (H₂) existente en el aire, no participa en la reacción siendo expedido de la misma manera.

CONTAMINANTE.	ORIGEN.	EFFECTOS.
CO	Combustión incompleta.	Disminuye la absorción del oxígeno por células rojas, afecta la percepción y la capacidad de pensar, disminuye los reflejos y puede causar inconsciencia. Afecta el crecimiento fetal en mujeres embarazadas.
HC	Combustión incompleta o evaporación.	Irritación de los ojos, cansancio y tendencia a toser. Puede tener efecto carcinógeno. Percusiones de smog foto químico.
Partículas (hollín)	Combustión incompleta.	Puede iniciar enfermedades respiratorias (afectando a niños y ancianos) y provocar cáncer en los pulmones.
NO _x	Altas temperaturas.	Irrita los ojos, nariz, garganta y pulmones y puede causar dolores de cabeza.
SO ₂	Contenido de azufre en la gasolina.	Irrita las membranas del sistema respiratorio. Daños a la vegetación.

Tabla 1. 1 EFECTO DE LOS GASES CONTAMINANTES

Descripción de Substancias que integran lo gases del motor.

Nitrógeno (N₂)

El nitrógeno es un gas no combustible, incoloro e inodoro, se trata de un componente esencial del aire que respiramos (78 % nitrógeno, 21 % oxígeno, 1 % otros gases) y alimenta el proceso de la combustión conjuntamente con el aire de admisión. La mayor parte del nitrógeno aspirado vuelve a salir puro en los gases de escape; sólo una pequeña parte se combina con el oxígeno O₂ (óxidos nítricos NO_x).

Oxígeno (O₂)

Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Es el componente más importante del aire que respiramos (21%). Es imprescindible para el proceso de combustión, con una mezcla ideal el consumo de combustible debería ser total, pero en el caso de la combustión incompleta, el oxígeno restante es expulsado por el sistema de escape.

Agua (H₂O)

Es aspirada en parte por el motor (humedad del aire) o se produce con motivo de la combustión "fría" (fase de calentamiento del motor). Es un subproducto de la combustión y es expulsado por el sistema de escape del vehículo, se lo puede visualizar sobre todo en los días más fríos, como un humo blanco que sale por el escape, o en el caso de condensarse a lo largo del tubo, se produce un goteo. Es un componente inofensivo de los gases de escape [8].

Dióxido de carbono (CO₂)

Se produce al ser quemados los combustibles que contienen carbono (gasolina). El carbono se combina durante esa operación con el oxígeno aspirado. Es un gas incoloro, no combustible.

El dióxido de carbono CO_2 a pesar de ser un gas no tóxico, reduce el estrato de la atmósfera terrestre que suele servir de protección contra la penetración de los rayos UV (la tierra se calienta). Las discusiones generales en torno a las alteraciones climatológicas (efecto "invernadero"), el tema de las emisiones de CO_2 se ha hecho consciente en la opinión pública.

Monóxido de carbono (CO)

Figura 1. 13 Se produce con motivo de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono. Es un gas incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico. Bloquea el transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos. Es mortal, incluso en una baja concentración en el aire que respiramos. En una concentración normal en el aire ambiental se oxida al corto tiempo, formando dióxido de carbono CO_2 .

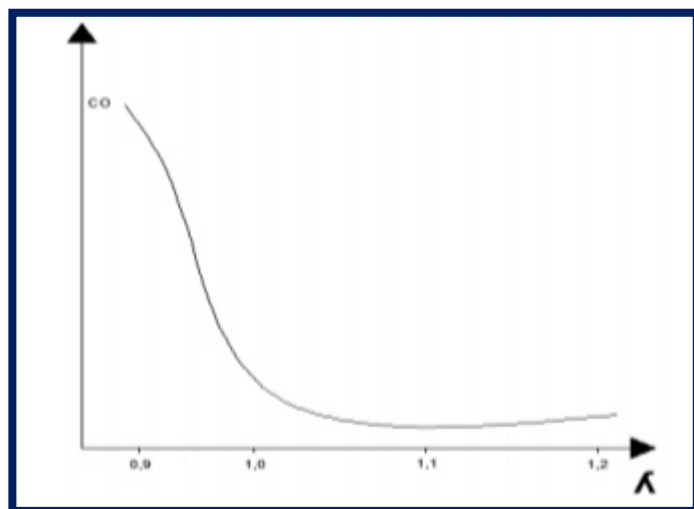


FIGURA 1. 13 PROPORCIÓN DEL CO EN FUNCIÓN DE LA MEZCLA.

Óxidos nítricos (NO_x)

Son combinaciones de nitrógeno N₂ y oxígeno O₂. Los óxidos de nitrógeno se producen al existir una alta presión, alta temperatura y exceso de oxígeno durante la combustión en el motor. El monóxido de nitrógeno (NO) Figura 1.14 es un gas incoloro, inodoro e insípido. Al combinarse con el oxígeno del aire, es transformado en dióxido de nitrógeno (NO₂), de color pardo rojizo y de olor muy penetrante, provoca una fuerte irritación de los órganos respiratorios [8].

Las medidas destinadas a reducir el consumo de combustible suelen conducir lamentablemente a un ascenso de las concentraciones de óxidos nítricos en los gases de escape, porque una combustión más eficaz produce temperaturas más altas. Estas altas temperaturas generan a su vez una mayor emisión de óxidos nítricos.

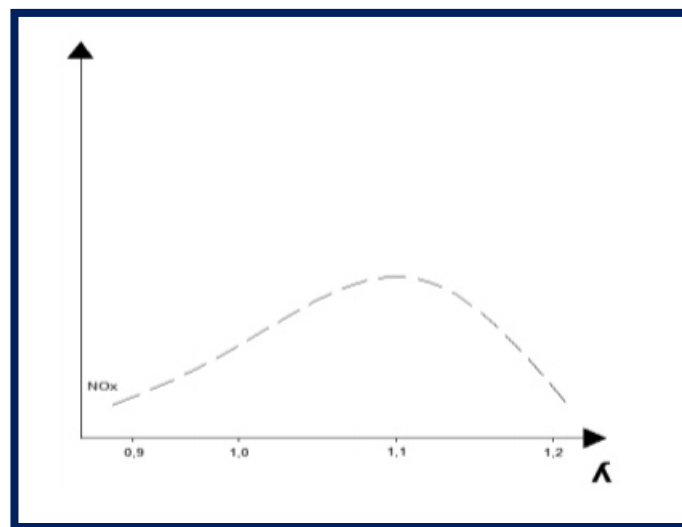


FIGURA 1.14 PROPORCIÓN DE NO_x EN FUNCIÓN DE LA MEZCLA.

Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso propicia las enfermedades de las vías respiratorias, pero interviene sólo en una medida muy reducida en los gases de escape. Es un gas incoloro, de olor penetrante, no combustible. Si se reduce el contenido de azufre en el combustible es posible disminuir las emisiones de dióxido de azufre.

Plomo (Pb)

Ha desaparecido por completo en los gases de escape de los vehículos. En 1985 se emitían todavía a la atmósfera 3.000 t, debidas a la combustión de combustibles con plomo.

El plomo en el combustible impedía la combustión detonante debida al auto ignición y actuaba como una sustancia amortiguadora en los asientos de las válvulas. Con el empleo de aditivos ecológicos en el combustible sin plomo se han podido mantener casi idénticas las características antidetonantes [8].

HC - Hidrocarburos

Son restos no quemados del combustible, que surgen en los gases de escape después de una combustión incompleta. La mala combustión puede ser debido a la falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica) o también por una baja velocidad de inflamación (mezcla pobre), por lo que es conveniente ajustar la riqueza de la mezcla.

Los hidrocarburos HC se manifiestan en diferentes combinaciones y actúan de diverso modo en el organismo. Algunos de ellos irritan los órganos sensoriales, mientras que otros son cancerígenos Figura 1. 15.

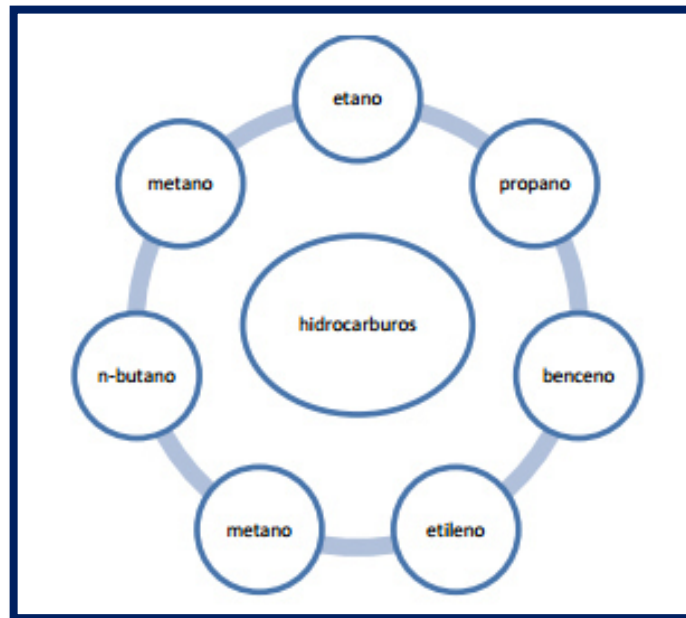


FIGURA 1. 15 COMPONENTES DE LOS HIDROCARBUROS [8]

Las partículas de hollín MP (masa de partículas; inglés: particulate matter)

Son generadas en su mayor parte por motores gasolina y/o diésel, se presentan en forma de hollín o cenizas. Los efectos que ejercen sobre el organismo humano son cancerígenos.

Las partículas de hollín Figura 1. 16 generadas por un motor son perceptibles por el denso humo negro que deja tras de sí un vehículo en plena aceleración. El gasóleo está formado por cadenas de hidrocarburos. Cuando el motor trabaja a cargas medias y bajas se inyecta muy poco combustible en comparación con el aire introducido en los cilindros, de modo que en todo el volumen de la cámara hay una gran cantidad de oxígeno para completar la

combustión. Sin embargo, cuando se hace trabajar el motor a plena carga (por ejemplo, en una aceleración), puede ocurrir que una parte de la gran cantidad de combustible inyectada no encuentre en sus inmediaciones un volumen suficiente de oxígeno como para terminar la oxidación, haciendo que queden tras la combustión largas cadenas de hidrocarburos parcialmente oxidadas, que tienden a reagruparse y formar el hollín. Estas partículas se producen por falta de oxígeno a causa de una combustión incompleta.

En el proceso de la combustión en un motor se producen partículas de hollín. Son esferas microscópicas de carbono, con un diámetro aproximado de 0,05 μm . En su núcleo constan de carbono puro. En este núcleo se asocian diversas combinaciones de hidrocarburos, óxidos metálicos y azufre. Ciertas combinaciones de hidrocarburos se catalogan como sustancias críticas para la salud. La composición exacta de las partículas de hollín depende de la tecnología aplicada en el motor, las condiciones de aplicación y el combustible empleado.

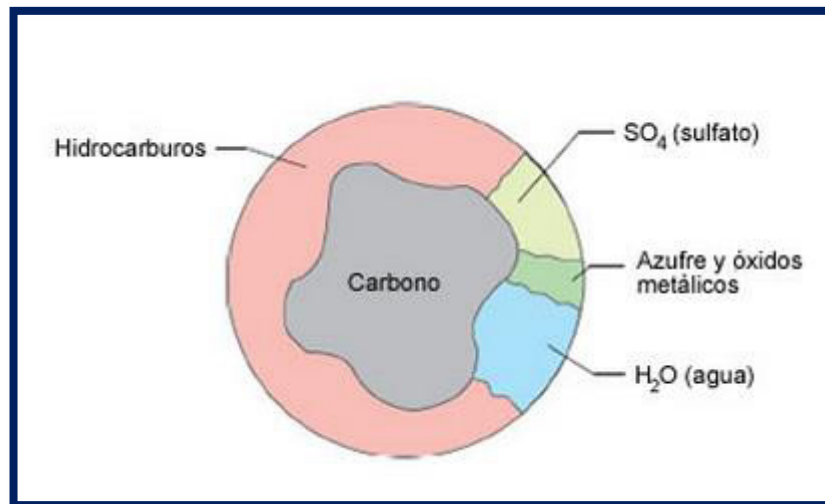


FIGURA 1. 16 ESQUEMA DE UNA PARTÍCULA DE HOLLÍN

1.2.7 Sistemas de Escape Automotriz

El sistema de escape de gases quemados en un motor de combustión interna tiene la misión de canalizar la salida de los gases producidos en la combustión, desde el motor hacia el exterior de vehículo. Otra función importante del sistema es la de reducir el ruido producido por los gases de escape debido a las ondas de presión que se generan en el flujo de los gases, el sistema de gases de escape es eventualmente considerado un dispositivo de seguridad porque transporta gases quemados hacia un extremo justo detrás del compartimiento de pasajeros para liberarse al aire libre. [9]

El sistema de escape influye directamente sobre el funcionamiento del motor. Si es demasiado libre, el motor aumenta su potencia (el cilindro se vacía mejor después de cada explosión), pero se calienta aún más y aumenta el consumo de combustible. Si está demasiado obstruido, el motor denota falta de potencia.

En vehículos sin control de emisiones, el sistema de escape consta de los siguientes elementos ver Figura 1. 17:

Colector de escape.

Silenciador.

Conductos de evacuación.

Sujetadores de la tubería.

En cambio los vehículos equipados con sistemas de control de emisiones constan de los siguientes elementos:

Colector de escape.

Conductos de evacuación.

Convertidor catalítico.

Filtros de Partículas.

Silenciadores.

Sujetadores de la tubería.



FIGURA 1. 17 SISTEMAS DE ESCAPE AUTOMOTRIZ.

Múltiple de escape.

El colector de escape es un complejo de tuberías encargado de conducir el aire quemado que sale del interior de los cilindros y canalizarlo hacia una tubería larga que se dirige hacia la parte posterior del vehículo, el colector de escape se ubica hacia las cabezas de los cilindros a un costado del cabezal y cuenta

con entradas por donde circulan los gases quemados que deben ser trasladados hacia el exterior. [9]

El colector está diseñado con suaves curvas y tiene ángulos precisos que ayudan a evitar contrapresiones dentro del sistema, mejorando así la salida de los gases. La disposición y forma de los colectores varía según el diseño de los fabricantes para cada motor específico, en los motores que funcionen a altas revoluciones suelen montarse colectores especiales denominados “header” que está formados por tubos independientes de igual diámetro y del mismo largo ver Figura 1. 18.

La función del header es la de expulsar con mayor velocidad los gases de escape, este es un diseño que permite una optimización del funcionamiento del motor cuando trabaja en altas revoluciones, el colector se fabrica en fundición de hierro para que soporte las altas temperaturas de los gases de escape. [9]



FIGURA 1. 18 COLECTOR DE GASES DE ESCAPE.

Tubería de evacuación de los gases de escape

Los conductos de evacuación dentro del sistema de escape se encargan de conducir los gases desde el colector hasta la parte posterior del vehículo. Debido a las altas temperaturas a las que salen los gases, al apagar un motor y llegar a enfriarse todo el sistema, dentro del escape se produce la condensación de los vapores, esto luego se transforma en agua, lo que causa posteriormente la oxidación, por esta razón los conductos son fabricados de acero inoxidable con el fin de evitar oxidación, ya que cualquier perforación produce altos niveles de ruido en el sistema de escape. En vehículos equipados con sistemas de inyección electrónica, y cuyo sistema de escape consta de un sensor de oxígeno que envía señales al ECM (módulo de control electrónico) para realizar correcciones de mezcla aire combustible, pueden presentar problemas de alto consumo de combustible cuando existen perforaciones en los conductos del sistema de escape y como consecuencia directa aumentan la emisiones contaminantes en los vehículos. [9]

Dentro del sistema de escape se encuentran los siguientes tipos de conductos:

Conducto inicial: transporta los gases y el vapor recolectados del múltiple o colector del escape a otro componente ubicado corriente abajo en el sistema de escape.

Conducto intermedio: conecta el tubo de escape con el silenciador o el resonador. Su propósito es llevar los gases al silenciador para silenciarlos o al resonador para silenciarlos adicionalmente. No todos los automóviles tienen tubos intermedios. Este componente también se puede denominar tubo extensor o tubo conector.

Conducto final: completa la tarea de diseño de un sistema de escape, dirigiendo los gases de escape al exterior del vehículo hasta un punto en que no pueden entrar en el compartimiento de pasajeros. Generalmente, un conducto de escape final mide más de un 35cm. de longitud. El conducto de escape final es el último elemento del sistema de escape.

Convertidor catalítico.

Debido a la necesidad que tenemos de cuidar nuestro ambiente se van tomando medidas de control en todas las partes involucradas en actividades que producen contaminación. La industria automotriz al estar entre las actividades que más contribuyen a la contaminación del ambiente, ha ido aportando cada vez más al control de emisiones producidas por la combustión. Los catalizadores al inicio fueron diseñados para que pasara a través de él solo la mitad de los gases de escape. [9]

La otra mitad pasaba directamente a la atmósfera. Este sistema se discontinuó en 1979, debido a los avances en el desarrollo de sistemas de control de emisiones por parte de los fabricantes de vehículos.

Los catalizadores pueden ser de tres tipos:

Oxidante de una sola vía: contiene un solo monolito cerámico que permite la oxidación del CO y de los hidrocarburos. El monolito contiene como elementos activos el platino y el paladio, elementos que ayudan a producir la oxidación. Figura 1. 19



FIGURA 1. 19 CATALIZADOR DE UNA VÍA.

De dos vías (reductor, de doble cuerpo): (ver Figura 1. 20) es un doble catalizador de oxidación con toma intermedia de aire. El primer cuerpo actúa sobre los gases ricos del escape reduciendo los NOx. El segundo lo hace sobre los gases empobrecidos gracias a la toma intermedia de aire, reduciendo el CO y los hidrocarburos.



FIGURA 1. 20 CATALIZADOR DE DOS VÍAS.

De tres vías (TWC): Es el más complejo y evolucionado. Elimina los tres contaminantes principales, es decir, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxido de nitrógeno (CO, HC y NO_x), produciéndose las reacciones de oxidación y reducción simultáneamente. Su mayor eficacia depende de forma importante de la mezcla de los gases en la admisión. La mezcla se debe mantener muy próxima a un valor estequiométrico que se considera óptimo para $\lambda=1$ ($\lambda=1$).

Por ello, se emplea un dispositivo electrónico de control y medida permanente de la cantidad de oxígeno en los gases de escape, mediante la llamada sonda lambda, que efectúa correcciones constantes sobre la mezcla inicial de aire y combustible según el valor de la concentración de oxígeno medida en el escape. En su interior contiene un soporte cerámico o monolito, de forma cilíndrica, con una estructura de múltiples celdillas en forma de panal, con una densidad de éstas de aproximadamente 450 celdillas por cada pulgada cuadrada (unas 70 por centímetro cuadrado).

Su superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos nobles metálicos, tales como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que permiten la función de oxidación, y Rodio (Rh), (ver Figura 1. 21) que interviene en la reducción, internamente el monolito dispone de una tela metálica que evita daños por vibraciones y de un aislante cerámico que evita la pérdida de calor en períodos breves de motor apagado. Estos metales preciosos actúan como elementos activos catalizadores; es decir, inician y aceleran las reacciones químicas entre otras sustancias con las cuales entran en contacto, sin participar ellos mismos en estas reacciones. Los gases de escape contaminantes generados por el motor, al entrar en contacto con la superficie activa del catalizador son transformados parcialmente en elementos no contaminantes reduciendo la proporción en la emisión de éstos. [9]

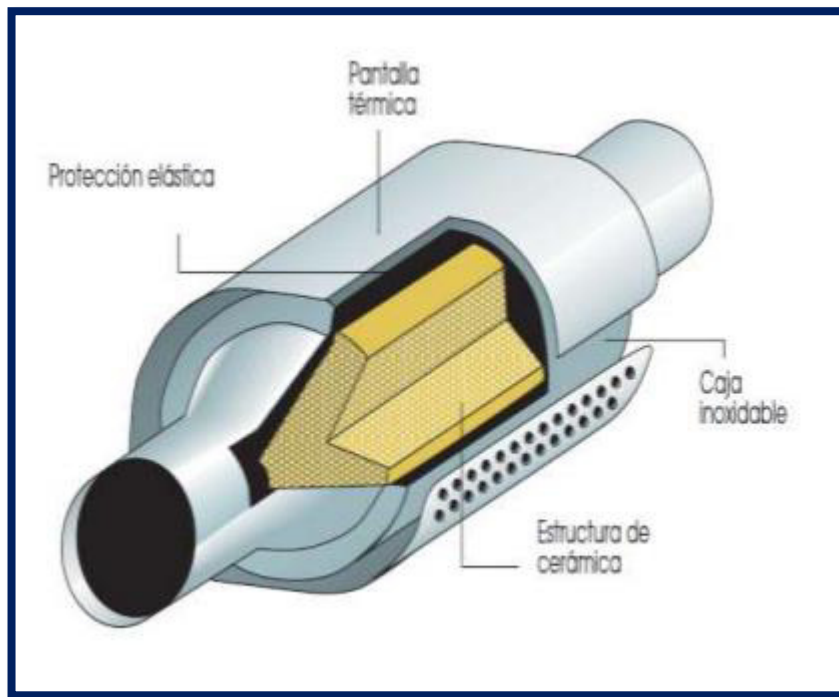


FIGURA 1. 21 CATALIZADOR DE TRES VÍAS.

La temperatura óptima de funcionamiento de un catalizador está comprendida entre los 400 a 700 grados centígrados, a temperaturas menores a los 400 grados centígrados el catalizador no entra en funcionamiento y como consecuencia se tienen altos niveles de emisiones durante el arranque en frío ya que el motor está funcionando con una mezcla demasiado rica (exceso de combustible) hasta alcanzar la temperatura óptima de funcionamiento del motor (92C). Esto tarda aproximadamente unos cinco minutos. Para contrarrestar este tiempo muerto actualmente los catalizadores incorporan un sistema adicional de precalentamiento, con esto se logra que el catalizador comience a trabajar casi inmediatamente después del arranque en frío, el tiempo de activación del catalizador se reduce a unos 90 segundos, lo que permite que el sistema comience con la reducción de gases mucho más rápido.

Silenciador:

El silenciador (ver Figura 1. 22) es el elemento encargado de reducir el ruido y la vibración en el sistema de escape, su diseño es determinante para reducir al máximo el ruido y evitar pérdidas de potencia al pasar los gases de escape por él y que pueda crear una retención.

Existen determinados tipos de silenciadores:

Silenciadores por reflexión: Los silenciadores por reflexión provocan en el interior una contrapresión entre los mismos gases de escape. Son los más económicos pero a su vez son los que provocan mayores pérdidas de potencia. Los silenciadores por reflexión están formados por cámaras largas diferentes que están unidas entre sí mediante tubos, de esta forma se producen la contrapresión entre los mismos gases a través de esos tubos.

Silenciador por absorción:

Está formado por un material absorbente que retiene las vibraciones (y por tanto el ruido) producido por el sistema de escape. Están formados por una cámara por la que pasa un tubo perforado. La cámara está rellena de material absorbente.

El silenciador es el elemento que normalmente se sitúa al final de la instalación, pero realmente da igual donde lo situemos. Es el único elemento el cual no requiere de una ubicación específica, pero es recomendable al final, ya que dejamos la parte delantera de la instalación para elementos que trabajan mediante temperatura y evitamos también exponer al silencioso a altas temperaturas.



FIGURA 1. 22 SILENCIADOR.

Filtros de Partículas:

Diseñado e instalado en estos últimos años está enfocado a acabar con las partículas de hollín que se generan, sobre todo, en los motores de combustión interna. El filtro de partículas (ver Figura 1. 23) retiene a las partículas sólidas de hollín de forma que se evita que salgan al exterior reduciendo los elementos contaminantes [10].



FIGURA 1. 23 FILTRO DE PARTÍCULAS SECCIONADO.

El filtro de partículas cerámico está formado, al igual que el monolito cerámico del catalizador, por una gran cantidad de canales paralelos. Sin embargo estos canales están cerrados alternativamente. Por ello, los gases de escape deben circular a través de las paredes porosas del cuerpo tipo nido de abeja. Las partículas sólidas se quedan en los poros al pasar. Según la porosidad del cuerpo cerámico, la eficiencia de filtración, su rendimiento, puede ser de hasta del 97%.

El filtro de partículas (ver Figura 1. 24), con el paso del tiempo y de los kilómetros, se obstruye debido a que cada vez acumula mayor número de partículas de hollín, es por eso que el filtro de partículas debe de regenerarse, para lo cual existen dos procedimientos [10].



FIGURA 1. 24 FILTRO DE PARTÍCULAS FUNCIONAMIENTO.

Procedimiento activo: Este procedimiento se lleva a cabo con filtros de partículas que están situados cerca del motor aprovechando así las altas temperaturas de los gases de escape en esa área. En el procedimiento activo, el filtro se lleva a la temperatura necesaria para la combustión del hollín a través de medidas externas. Esto se puede realizar mediante un quemador montado delante del filtro (método poco común) o mediante una inyección posterior de combustible a través de la gestión motor y con la incorporación de un pre catalizador, así, los gases de escape alcanzan temperaturas muy altas quemando las partículas de hollín y regenerando el filtro de partículas [10].

Procedimiento pasivo: se utiliza para vehículos que por su diseño llevan el filtro de partículas demasiado alejado del motor y la temperatura a la que llegan los gases de escape a esa zona ya es demasiado baja para proceder con una regeneración. En este procedimiento se inyecta un aditivo (mediante gestión motor) en el sistema de alimentación de combustible. Este aditivo sale

junto con los gases de escape y al entrar en contacto con el hollín del catalizador lo debilita, reduciendo así la temperatura a la que puede ser quemado.

CAPÍTULO II

INFORMACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS DIFERENTES SISTEMAS PARA LA REDUCCIÓN DE PARTÍCULAS.

2.1 Tecnología en motores de inyección directa. (GDI)

2.1.1 Fuerza impulsora y consumo de combustible.

La tecnología de inyección directa de gasolina (GDI) surgió de la necesidad de mejorar la eficiencia termodinámica y por lo tanto reducir el consumo de combustible y mejorar la potencia de salida de la chispa de ignición en los motores de inyección directa. En los motores de GDI, el combustible se pulveriza directamente en la cámara de combustión donde se evapora y así refresca la carga. Este enfriamiento por evaporación, suprime la tendencia de golpeo; que es causada por temperaturas excesivamente altas de las mezclas no quemadas durante la combustión, permitiendo así el uso de una relación de compresión más alta [11], pero también aumentando la eficiencia volumétrica derivada del aumento en la densidad de la carga entrante. La mejora de la eficiencia asociada es debido al aumento de las pérdidas parásitas relacionadas a las altas presiones de combustible en comparación con los Motores PFI (Port Fuel Injection, por sus siglas en inglés). El beneficio general en el consumo del combustible es originado al inyectar directamente el combustible en el cilindro (Ver Figura 2.5). Existen algunas estimaciones en la reducción del consumo de combustible que van desde 1 al 4% [11].

Los motores GDI pueden mejorar aún más la eficiencia termodinámica cuando se operan en modo de mezcla pobre. En el modo de operación de baja velocidad y en condiciones de baja carga. Se permite reducir la estrangulación del aire de admisión, y por lo tanto reduce las pérdidas de bombeo y del consumo de combustible; así como también las pérdidas de calor (el exceso de aire reduce la temperatura de combustión, que a su vez reduce la pérdida de calor para los sistemas de refrigeración y de escape) [11]. En el modo de mezcla pobre, el combustible es inyectado cerca de la bujía durante la compresión para crear una carga estratificada. Bajo ciertas condiciones de funcionamiento, la relación total de aire-combustible puede ser tan alta como 20: 1 a 40: 1 en comparación con 14,7: 1 para la combustión estequiométrica. Esta operación permite una reducción adicional de hasta 8 - 14% en el consumo de combustible en comparación con la estequiométrica.

Una ventaja adicional de la tecnología GDI es que permite una turboalimentación eficaz y una reducción en tamaño y peso. En teoría, el uso de un turbocompresor ayuda a lograr la potencia de un motor similar usando un motor más pequeño; maximizando el uso del combustible mediante la reducción en pérdidas de fricción en cargas ligeras. Sin embargo, en el consumo de combustible se observó a través de pruebas; que el beneficio de la turboalimentación y reducción de tamaño sólo sirvió en aplicaciones de GDI. El estimado adicional de la reducción en el consumo de combustible fue alrededor de 3,5% a 5%.[11].

El primer diseño de máquina GDI utilizaba el método de inyección de pared-guiada o aire-guiada para la inyección del combustible (ver Figura 2. 1). En este tipo de sistemas de combustión, el inyector se coloca a gran distancia de la bujía, y el combustible inyectado es dirigido hacia la bujía por el movimiento del aire en el cilindro o bien definido por la interacción de la pulverización en la cavidad del pistón. Hoy en día, el diseño de los motores

GDI utilizan la inyección por pulverización guiada a través de ajuste en el cierre del inyector y la bujía, proporcionar estrecho acoplamiento entre la preparación de combustible y el encendido. Esta configuración permite una operación más eficiente en el proceso de la combustión [12], lo que mejora aún más la economía de combustible. Por ejemplo BMW solicitó una reducción de hasta 20% en el consumo de combustible en un vehículo de inyección de puerto, a través del uso de un sistema de pulverización guiada con mezcla pobre [13]. La eficiencia del combustible fue del 19% al 23% en condiciones de ralentí.

Debido a su potencial para lograr importantes mejoras de eficiencia en el uso del combustible, los vehículos de gasolina GDI son identificados como una tecnología clave en la dirección para reducir emisiones de gases de efecto invernadero. El reglamento de control del dióxido de carbono (CO₂) para automóviles de pasajeros y vehículos ligeros ya está en vigor en Europa y EE.UU. El reglamento Europeo establece que para vehículos ligeros el promedio debe ser 130 g/km bajo el NEDC ciclo normalizado Europeo y a partir del 2012; con el objetivo de reducir aún más será de 95 g/km en 2020 y 70 g/km en 2025. Los límites de la regulación Americana indican que las emisiones de CO₂ para camiones ligeros y semipesados son de 155 g/km a partir del 2016. Actualmente se está trabajando para definir los límites de la norma para 2017-2025.

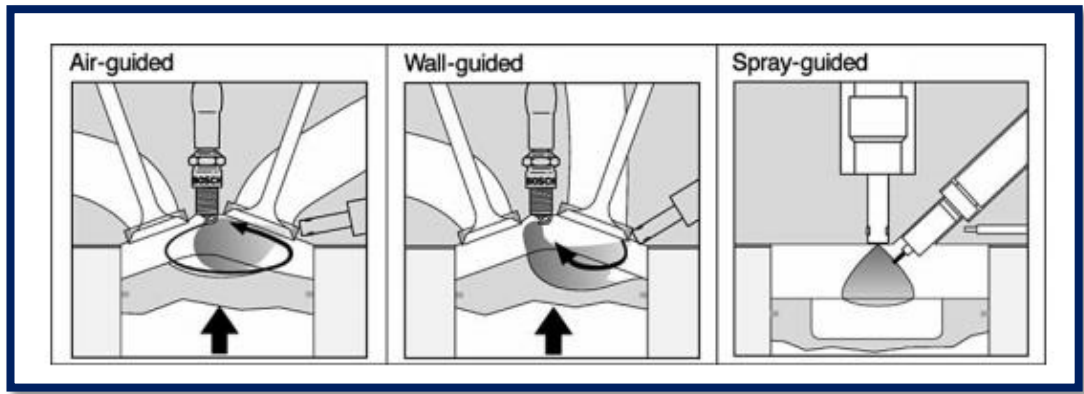


FIGURA 2. 1 TIPOS DE INYECCIÓN EN MOTOR GDI [13]

Una serie de tecnologías son consideradas por los fabricantes para lograr este objetivo, incluyendo avanzados motores de gasolina y diésel, transmisiones avanzadas, electrificación, reducción de masa en los vehículos y mejoras de la tecnología en gestión térmica. Entre estas opciones, la compactación y la turbo alimentación en la tecnología GDI parece ser la tecnología más madura; teniendo como expectativa una alta penetración de vehículos GDI en los mercados de la Unión Europea y de los Estados Unidos. Se prevé que la cantidad de vehículos GDI en el mercado de EE.UU aumentara del 58% al 62% en 2016. Del mismo modo, la cantidad de mercado de vehículos GDI en Europa se espera un aumento del 13% al 18% en 2015. La producción mundial de vehículos GDI se prevé un aumento de 5 millones en 2010, a 21.6 millones en 2015 alcanzando 35 millones en 2020, constituyendo 7%, 23% y 35% del total de vehículos producidos en el mundo [Marzo 2014 - la información presentada en el taller].

2.1.2 Desempeño en emisión de partículas.

El principal inconveniente de los motores GDI, son sus emisiones de partículas que son de manera muy elevada. Datos experimentales recogidos [14] sugiere que mientras que GDI vehículos pueden cumplir fácilmente con la norma de PM 4,5 mg/km (ya se aplica en un Euro Etapa 5a), sus emisiones de número de partículas sólidas supera la norma PN 5 a 25 veces.

Sobre el desempeño de emisiones; los datos experimentales de los vehículos GDI no muestran un claro beneficio estequiométrico. Las emisiones PN de los motores GDI son superiores a los de los vehículos PFI convencionales en más de un orden de magnitud. Estas observaciones apuntan a la falta de tiempo para la preparación de la mezcla en los motores GDI en comparación con los motores de PFI.

En otras palabras, algunas gotas de combustible pueden sobrevivir a la evaporación resultante en zonas de mezcla rica donde se lleva a cabo la formación de hollín. En contraste, en un motor de PFI se inyecta el combustible en los puertos de admisión. El calor de los puertos y la válvula de admisión facilitan la vaporización del combustible que resulta que tiene un alto grado de homogeneidad en la mezcla al momento de la chispa.

Los líquidos que se forman en las paredes del pistón a través de la pulverización de combustible también fueron identificados como una fuente significativa de hollín. El efecto puede suprimir la evaporación de tales películas de líquido que se quema con retraso a través de las llamas de difusión con efectos altos de hollín. Por lo tanto, se espera que la tecnología de motores GDI la técnica de pulverización guiada pueda mostrar un mejor rendimiento de emisión de partículas. De hecho, se observó una significativa reducción de PN con la tecnología de pulverización guiada, pero aun así sus emisiones son mayores que los motores de PFI. Evaluando el número de emisiones de partículas sólidas en las tecnología de pulverización guiada en los vehículos

de GDI que fueron probados durante el NEDC resultaron ser en promedio 12.5 y 3.5 veces por encima el límite PN. [14]

2.1.3 Soluciones potenciales para el cumplimiento de partículas

La perspectiva del límite en el número de partículas emitidas para los vehículos GDI ha estimulado considerablemente recientemente el trabajo en la investigación sobre la posibilidad de mejorar el rendimiento de la emisión de partículas a través de medidas internas del motor. Se investigaron dos enfoques principales uno de ellos es la creación de un PFI híbrido y los motores GDI; por otro lado la optimización del proceso de preparación de la mezcla. PFI híbrido y los motores GDI utilizan un sistema de inyección doble, lo que permite la inyección de combustible, ya sea en el puerto de entrada (puerto de inyección de combustible) o en el interior del cilindro del motor (inyección directa), o incluso en ambos, dependiendo de las condiciones de funcionamiento. Esta capacidad de cambiar libremente entre los dos sistemas de inyección proporciona los medios para generar una reducción significativa de las emisiones en el número de partículas, junto a una reducción adicional en el consumo de combustible [15]. Se ha investigado en el desarrollo de una inyección doble de alto rendimiento donde según el fabricante ya se refleja una notable mejoría en la reducción de partículas emitidas. Ese motor ya ha entrado en el proceso de producción en la instalación de la familia Audi B8 y la intención es que se introducirá en varios modelos del grupo Volkswagen en 2012. Sin embargo, no hay datos publicados sobre el rendimiento de la emisión de partículas número de tales vehículos. También hay un número creciente de publicaciones; sobre trabajos de investigación para la calibración de motores

GDI generando baja en el número de emisiones [15]. Los estudios arrojaron que reducción sustancial en las emisiones PN puede ser realizada mediante la optimización del número de inyecciones, en la duración de la inyección, en la presión de inyección de combustible, en la sincronización de la inyección y en la relación aire combustible.

Mediante la aplicación de una calibración (no de pulverización guiada) estequiométrica en un vehículo GDI, se observó una reducción del 65% en las emisiones de PN sobre el ciclo de manejo NEDC, sin mostrar efectos en el consumo de combustible o que llevara a la conducción de otros contaminantes. No se mencionó si podría cumplir con el límite PN .

Se busca que el vehículo cumpla con las normas Euro 6 para todos los contaminantes gaseosos. Se identificó que a través de la temporización precisa y la medición de inyección del combustible en todos los cilindros se obtiene una mejora en la emisión de partículas. Un sistema avanzado de inyección que permite hasta cinco inyecciones divididas, mostró la reducción en el número de partículas y al mismo tiempo estabilidad en la combustión.

Un estudio reciente [16] ha investigado el potencial de reducción de emisiones de partículas que ofrece el escape de recirculación de gases (EGR). Hasta un 65% de reducción en la masa de partículas emitidas, fueron observadas, pero el efecto del EGR en las emisiones del número de partículas no era consistente. Bajo ciertas condiciones de funcionamiento el uso del EGR genero incrementos en el número de partículas. Esta inconsistencia se atribuyó a cambios en el tamaño de partículas emitidas.

Los motores de inyección directa se están convirtiendo en una preocupación con respecto a la materia de partículas (PM). Las próximas regulaciones Euro 6 pueden requerir de una drástica reducción en las emisiones de partículas sólidas de los motores GDI. La Junta de Recursos del Aire de California genero los reglamentos LEV III para el 2017 que también requerirán algunas medidas de reducción de PM. Como resultado, es necesario caracterizar las emisiones

de partículas de los motores GDI e investigar estrategias que supriman la formación de partículas durante la combustión. [16] El objetivo principal sobre el uso de los gases de escape en recirculación (EGR); es utilizarlo principalmente como un medio para reducir las partículas en la salida del motor con una estequiometría en la mezcla de combustible aire.

Un motor GDI turboalimentado fue operado en una condición de estado estacionario con diferentes niveles de gases de recirculación (EGR) para caracterizar el total de partículas respecto al tamaño, número y masa. Todo eso ha ayudado a identificar los mecanismos que contribuyen a dominar las emisiones de partículas en los motores GDI en diferentes condiciones de operación y determinar qué estrategias serían más eficaces para reducir las partículas del motor. [16]

[16] El número de partículas sólidas siguió la tendencia en la masa, pero mostró una tendencia opuesta para algunos funcionamientos del motor. Estos resultados presentan cierta complejidad en la reducción de partículas sólidas.

El EGR en el motor, aumento el número de partículas que se forman principalmente durante la dilución y enfriamiento de escape caliente (ver Figura 2. 2).

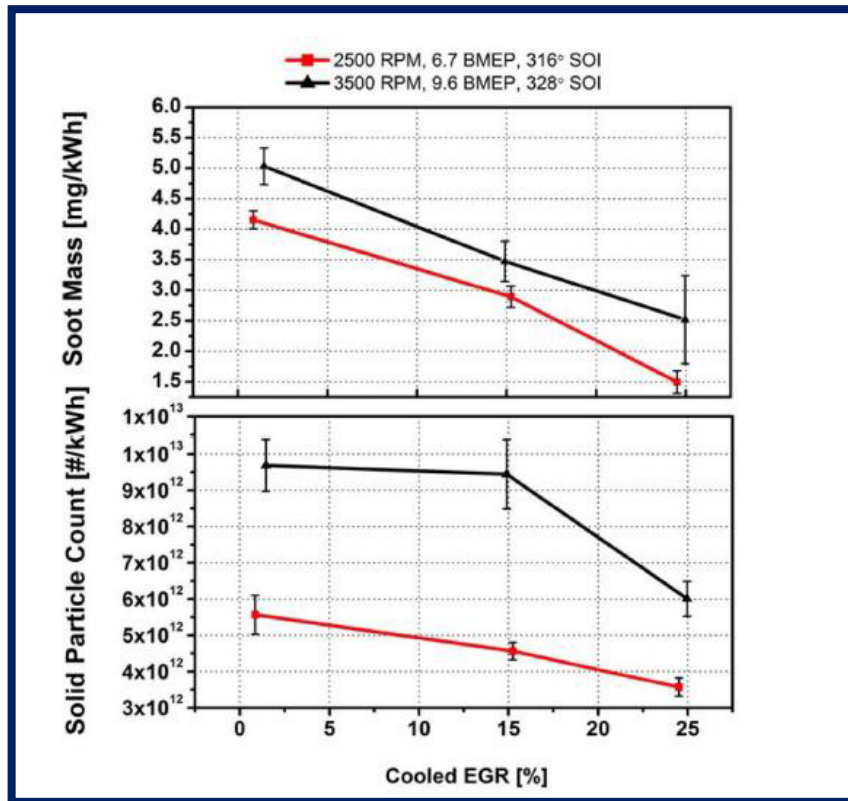


FIGURA 2. 2 MASA Y PARTÍCULAS SÓLIDAS DURANTE LA OPERACIÓN CON INCREMENTO EGR [16]

2.2 Filtros de Partículas

2.2.1 Filtros de Partículas Diésel. (DPF)

Los filtros basados en substratos cerámicos como lo son los filtros de partículas para Diésel (DPF por sus siglas en inglés) se usan ampliamente en Europa y EE.UU. La primera implementación exitosa de los DPF se remonta en el año 2000 por Peugeot y desde ese entonces varios millones de automóviles comerciales de pasajeros que utilizan el filtro DPF se han vendido. Después de la introducción de una norma relativa al número de partículas emitidas por

los motores de combustión en una primera etapa Euro 5b, donde menciona que todos los vehículos diésel serán equipados con sistemas de DPF.[17] [18]

El principio de funcionamiento de los sistemas de DPF se basa en la separación de las partículas (ver Figura 2. 3) de la corriente gaseosa por medio de la deposición sobre una superficie recolectora. Varios tipos de filtros se han desarrollado a lo largo de los años, incluyendo los que manejan el flujo con pared cerámica, espumas y otros filtros de flujo continuo. Sólo el desarrollo de flujo de pared cerámica DPF demostró alta eficiencia en la filtración requeridas por las normas. Se compone de una estructura de cerámica en forma de panal con canales alternativos, forzando que el gas del escape fluya a través de las paredes porosas que actúan como un medio de filtro. Materiales cerámicos disponibles como lo son la cordierita, carburo de silicio y nitruro de silicio conforman estos filtros. [18]

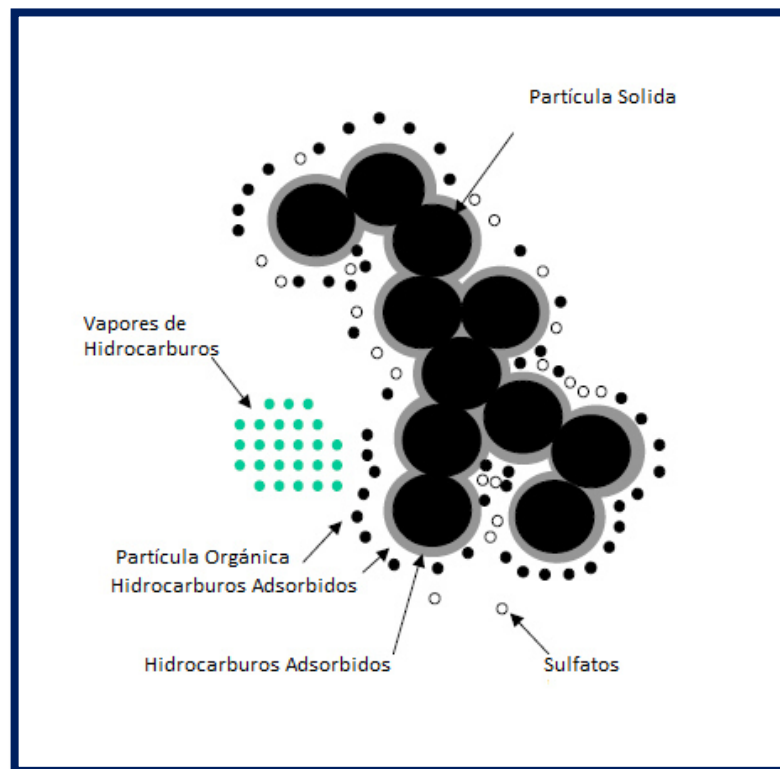


FIGURA 2. 3 PARTÍCULAS DIÉSEL Y COMPONENTES [17]

El reto principal en aplicaciones de los DPF (ver Figura 2. 4) es eliminar de manera eficiente las partículas filtradas con el fin de evitar un excesivo aumento de contrapresión e incluso taponamiento del filtro. La eliminación se logra a través de la oxidación de las partículas recogidas en un proceso llamado regeneración. La oxidación de partículas a través del exceso de oxígeno disponible en el las emisiones del sistema, requiere temperaturas de 450 ° C o más. El uso de un catalizador de oxidación puede ayudar a la regeneración del DPF. [18]



FIGURA 2. 4 FILTRO DE PARTÍCULAS DPF

Durante el proceso de combustión las nano-partículas se mezclan con el hollín por debajo de 300 ° C. [17] En un DPF, el sustrato de cerámica se recubre con un revestimiento delgado catalítico, típicamente Platino, esto es para facilitar la regeneración, aunque no lo hace en la medida como lo hace un catalizador. Un DPF catalizado tiene un costo relativamente más alto debido al precio del metal precioso.

Este tiene la ventaja de que no requiere mantenimiento, debido a las cantidades que son muchos menores en las partículas que almacena gracias a la rápida regeneración.

El uso de un catalizador de oxidación antes del DPF (comercializado por Johnson Matthey) (ver Figura 2. 5) facilita la regeneración a través de la producción de dióxido de nitrógeno (NO₂), que es un agente oxidante fuerte. El catalizador de oxidación convierte monóxido de nitrógeno (NO) en los gases de escape a NO₂. NO₂ oxida el hollín y las partículas a temperaturas entre aproximadamente 250 y 450 ° C. Este enfoque tiene la desventaja de producir emisiones elevadas de dióxido de nitrógeno.

Bajo ciertas condiciones de funcionamiento, la temperatura del gas de escape puede exceder la temperatura requerida para la oxidación de partículas acumuladas, esto que depende de la configuración empleada y de la carga de hollín en el DPF, en este momento es cuando se produce la regeneración en el DPF. Este tipo de regeneración, se refiere a la regeneración pasiva ya que se produce naturalmente, sin necesidad de ningún tipo de interferencia del sistema de control de emisiones.



FIGURA 2. 5 FILTRO DE PARTÍCULAS DPF INSTALADO J.M.

La regeneración pasiva juega un papel muy importante, incluso en sistemas activos, ya que es asociado con poca o ninguna penalización del consumo de combustible.

Con el fin de asegurar de que el DPF se regenerará con regularidad que es lo más importante, se debe evitar la acumulación excesiva de partículas. El ECS (Sistema de Control de Emisiones por sus siglas en inglés) monitorea continuamente la caída de presión a través del DPF. Si se considera necesario, el ECS también puede desencadenar la regeneración (regeneración activa) con el fin de aumentar la temperatura del gas a niveles para iniciar y mantener la regeneración. [19]

Esto es logrado por medio de la generación de una reacción exotérmica a través de la inyección de combustible en el cilindro o incluso una post-inyección de combustible en el colector de escape.

La contrapresión que es introducida por el DPF genera una penalización en el consumo de combustible. El aumento en el consumo de combustible debido a contrapresión se cuantifica a ser de 1% a 2%. Esto dependerá en gran medida de las condiciones de manejo. Las condiciones de baja temperatura con paradas frecuentes requerirán regeneraciones activas que llevan al consumo de combustible, hasta un 2.5% de penalización. [19]

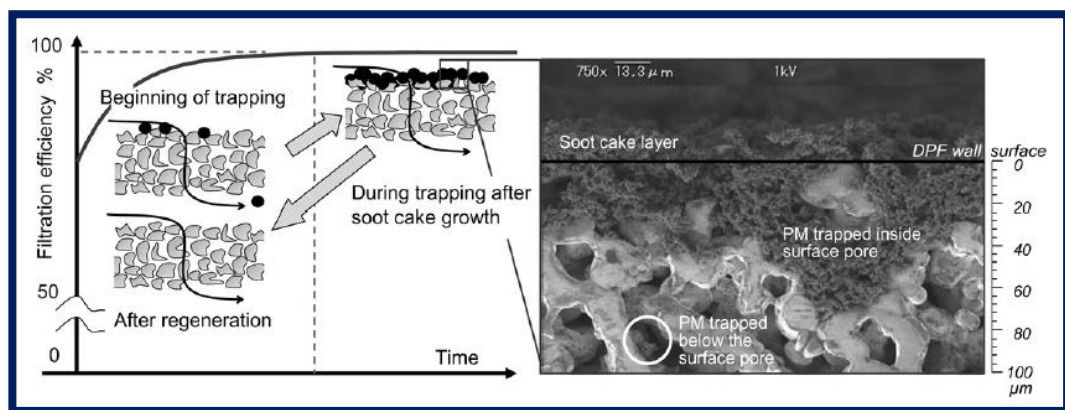


FIGURA 2. 6 DPF EFICIENCIA EN FILTRACIÓN, POROS Y SUPERFICIES.[19]

Los sistemas de DPF se han aplicado a los vehículos desde el año 2000. La tecnología DPF ha experimentado avances significativos en estos años, a través de la estrategia en la optimización de la regeneración, así como en el sustrato y en la mejoras de catalizadores. Una mejora significativa fue, la comprensión y el mejor entendimiento del proceso de oxidación de las partículas; durante la regeneración activa y pasiva (ver Figura 2. 6). Al mismo tiempo, se introdujeron materiales avanzados en los sustratos cerámicos, donde se exhibe una mejora de la eficiencia en filtración y en contrapresiones cuando existe carga de partículas. La dinámica de la acumulación de partículas se entendió de tal manera que los diseños fueron mejorando sus capacidades de almacenamiento; haciéndolos mejores en su funcionamiento. Por último, los recubrimientos catalíticos con materiales avanzados mejoraron en un gran porcentaje la regeneración del filtro. [19]

En la Figura 2. 7 se puede observar el comportamiento del filtrado dentro de filtro. Como se acumulan las partículas y como se lleva a cabo la regeneración pasiva dentro del filtro.

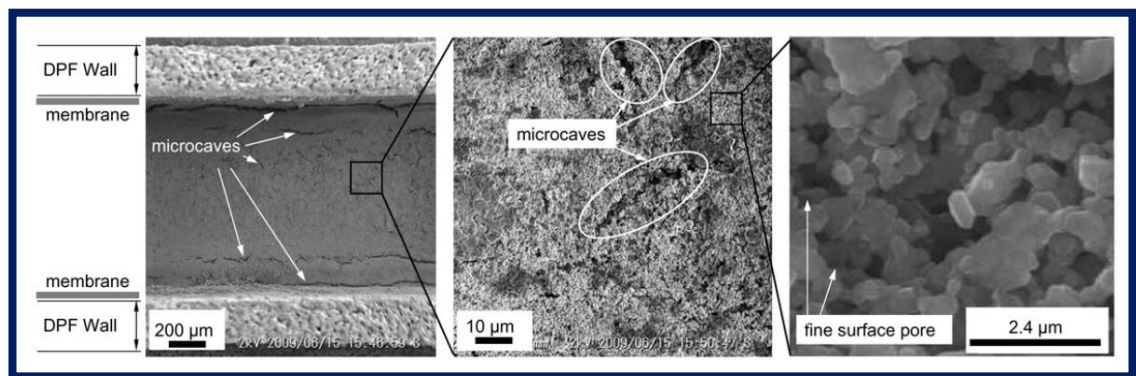


FIGURA 2. 7 MICROSCOPIA DE LAS PAREDES DE FILTRO DPF [19]

En la Figura 2. 7 se puede observar las paredes de los filtros, sus cavidades y los poros de la superficie que son la principal herramienta para la filtración de las partículas.

2.2.2 Filtro de Partículas para Gasolina (GPF)

Los filtros de partículas resultaron ser muy eficiente en el control de las emisiones de número de partículas por lo cual fueron considerados como una opción para la nueva generación de vehículos GDI.

Parte de la información sobre la posible aplicación de un filtro de partículas para vehículos GDI ya está disponible en la literatura [20] todo esto ayuda en la formulación de los posibles enfoques de la tecnología, a estimar los costos de implementación y estimar el tiempo para la integración al vehículo.

Las temperaturas en los escapes de motores de gasolina son relativamente más altos de los de diésel. Las temperaturas de salida del motor oscilan entre 300 ° C y 500 ° C, bajo la conducción urbana, pero puede llegar a 700 ° C a alta velocidad como en una autopista. Si bien estas temperaturas son suficientemente altas para sostener la regeneración pasiva de un filtro de partículas Gasolina (GPF), la regeneración se observa generalmente en la desaceleración del vehículo en el punto donde se corta el combustible y el oxígeno esté disponible en los gases de escape. Los GPF catalizados con capacidades de almacenamiento de oxígeno pueden también permitir cortos períodos de funcionamiento con mezcla pobre para iniciar la regeneración

pasiva o activa. En los motores de mezcla pobre es más sencillo esta oxidación, ya que existe generalmente un exceso de oxígeno en el escape y esto ayuda a la oxidación de las partículas. Las concentraciones de partículas en GDI son mucho más bajas, en comparación con las de los motores diésel. Por lo tanto se espera que la acumulación de hollín sea mucho más baja.

Un estudio reciente [21] también mostró que el hollín emitido por los vehículos GDI se oxida mucho más rápido (ver Figura 2. 8) que el hollín del diésel. Se encontraron tasas de agotamiento en las partículas emitidas por motores GDI 2.5 veces más altos que en las de diésel.

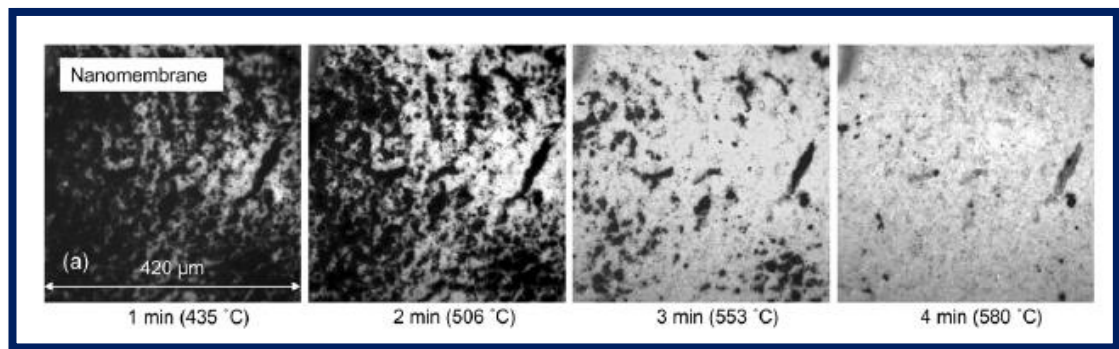


FIGURA 2. 8 REGENERACIÓN DE PARTÍCULAS A DIFERENTES TEMPERATURA [19]

Después de un funcionamiento prolongado en condiciones reales de manejo. Se notó la baja carga de partículas en el filtro por consecuente permite el uso de filtros más compactos y por lo tanto menos costosos que los de diésel, debido al menor volumen y en el caso del GPF por el contenido de metales preciosos que es inferior que el de un DPF. Mientras que en los vehículos diésel, el volumen del filtro es típicamente 1.5 a 2.5 veces mayor que los sistemas GPF ya que los GPF prevén tener un tamaño mucho más pequeño (Ver figura 2.9). De hecho, el tamaño óptimo de la GPF muy probablemente dependerá del

nivel de emisiones, que se espera a ser mayor en los vehículos de gasolina debido a que el motor alcanza mayores velocidades. [21] Algunos fabricantes GPF ya han realizado estudios específicos en evaluación de las capacidades de almacenamiento de partículas, que no revelan la acumulación de partículas o cualquier deterioro por el corto volumen de GPF examinados, hay más investigación en proceso.

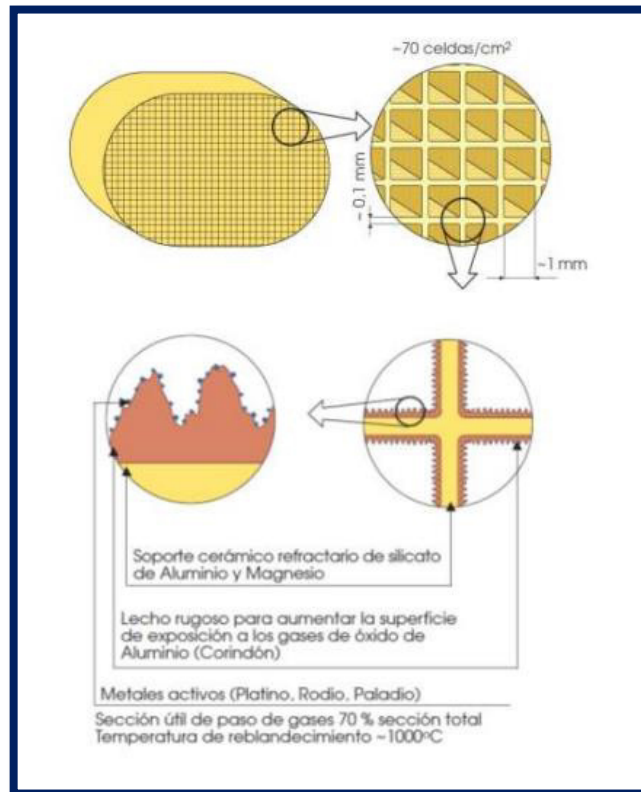


FIGURA 2. 9 COMPONENTES INTERNOS DE UN FILTRO DE PARTÍCULAS.

2.2.3 Configuraciones de Empaque para GPF.

Existen varios enfoques que se consideran para la instalación del GPF en el sistema de escape, se pueden clasificar en dos opciones principales: Close-

Couple (Acoplado al Motor) o la configuración Underfloor (por debajo del vehículo). Un filtro GPF pegado al motor es muy probable que también se le tenga que incorporar algún revestimiento catalítico actuando como un catalizador de cuatro vías. En la configuración Underfloor puede o no incorporar actividad catalítica.

GPF Por debajo del vehículo:

Una instalación debajo del vehículo (ver Figura 2. 10), tiene la desventaja potencial del requerimiento o soporte de algún tipo de regeneración activa debido a las temperaturas relativamente más bajas, en particular bajo operación prolongada en condiciones de manejo urbano. Sin embargo, se observó que no hay acumulación de partículas en los filtros. [22]. Un fabricante de GPF mencionó que hizo pruebas y estudios en un filtro que recorrió de 100,000 kilómetros en un vehículo GDI con una configuración no catalizada e instalada por debajo del vehículo, comentó que no hubo necesidad de mantenimiento de ningún tipo. Sin embargo, se observó excesiva acumulación de partículas bajo la operación de arranque y paradas continuas en ambiente de temperaturas bajo cero.

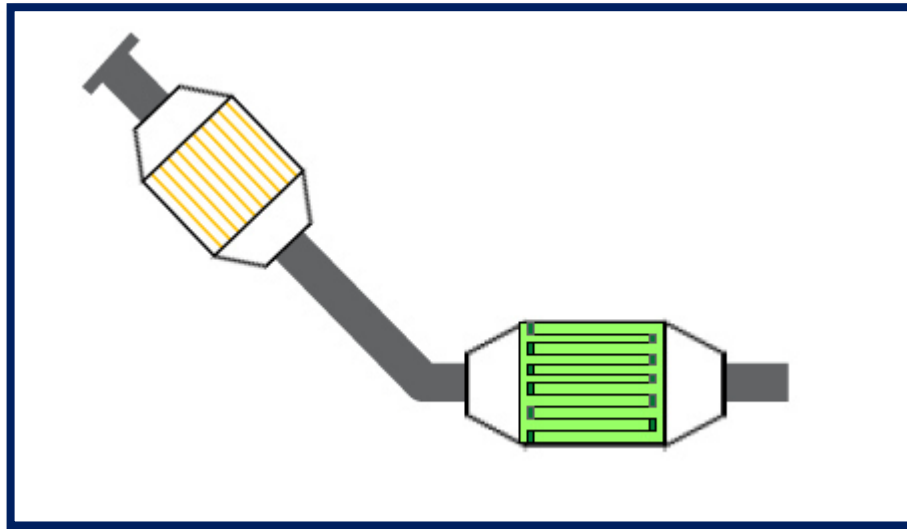


FIGURA 2. 10 CONFIGURACIÓN POR DEBAJO DEL VEHÍCULO DE GPF. [22]

Toda la información disponible sugiere que los sistemas GPF instalados por debajo del vehículo, con o sin recubrimiento se regeneran principalmente de forma pasiva, y no habrá requerimiento de regeneración activa. Este último puede lograrse a través de inyección de combustible retardada y sincronización de la chispa en el motor GDI o después de la inyección del combustible en el caso de los motores de mezcla pobre, todo esto con el objetivo de reducir los gases contaminantes en las emisiones de arranque en frío. La tecnología necesaria ya está disponible, por lo que no debería haber ninguna necesidad de investigación. [22]. Este argumento se apoya en datos experimentales recogidos en el CCI, presentado en la (ver Figura 2. 11). El gráfico muestra las temperaturas de entrada con un filtro GPF en un vehículo GDI probado durante NEDC a -7°C y 22°C a temperatura ambiente. Un fuerte aumento de la temperatura se observa en los primeros 20 segundos de la prueba, superando incluso a 400°C a -7°C . Las temperaturas en las pruebas bajo cero alcanzaron e incluso superaron los de 22°C en menos de 100 s.

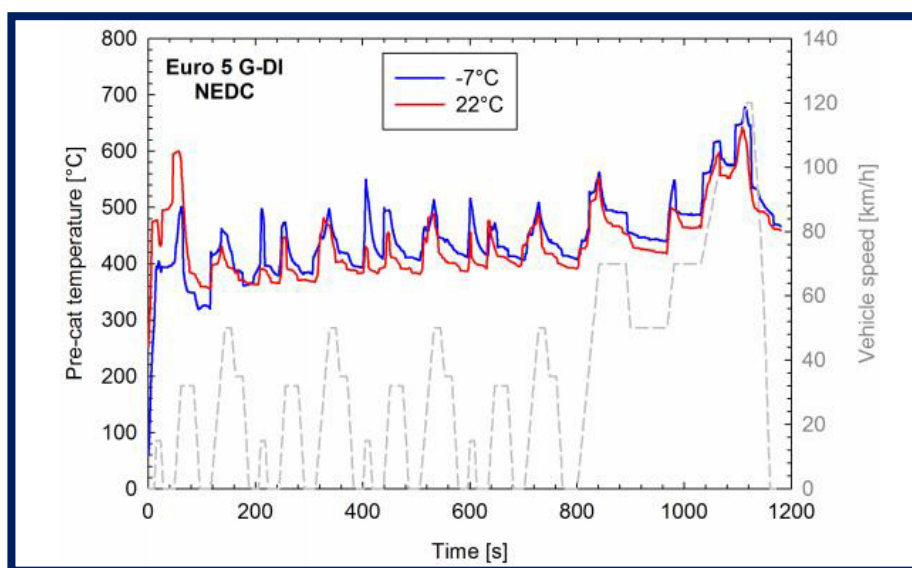


FIGURA 2. 11 MEDICIÓN DE TEMPERATURAS EN ARRANQUE EN FRÍO DE MOTORES GDI. [22]

La ventaja de usar la configuración de instalación por debajo del vehículo, es que el espacio que se puede manejar para la instalación impone menos limitaciones de tamaño, lo que permite la introducción de volúmenes relativamente grandes para el GPF. [22] Respecto a la posibilidad de alta acumulación de partículas podría ser necesario el uso de un GPF más largo, aunque no hay evidencia de acumulación excesiva de partículas. Datos de avance que se ha obtenido en el GPF es usando un filtro catalizado por debajo del vehículo en lugar de un catalizador. Un GPF catalizado emplea la misma cantidad de contenido de carga de metales que un catalizador de tres vías y también es capaz de cumplir con la norma Euro 6 respecto a todos los contaminantes regulados y el límite en PN. Otras de las ventajas que han resultado, es la atenuación de ruido. Se están haciendo estudios para analizar la posibilidad de poder eliminar el silenciador y reducir el costo de implementación del mismo.

GPF pegado al motor:

Esta instalación acoplada cerca del motor (ver Figura 2. 12) se considera como la solución más deseable dentro del sistema de escape. En esta configuración se permite la plena utilización de la alta energía térmica de los gases de escape provenientes del motor, que no requiere esencialmente de regeneración activa para el funcionamiento del filtro. Un inconveniente práctico de esta configuración es la falta de espacio que podría imponer limitaciones en el volumen del GPF. El principal desafío en esta configuración es para lograr tiempos de oxidación de los gases como lo hace un catalizador de tres vías. En general, la masa térmica aumenta, y en consecuencia, las emisiones de gases; monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, esto solo se da durante el arranque en frío.

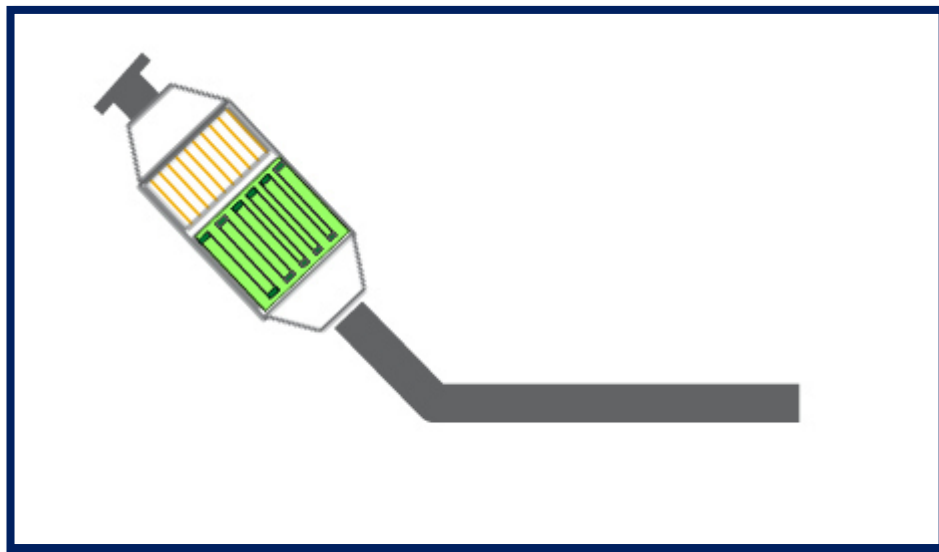


FIGURA 2. 12 CONFIGURACIÓN GPF PEGADA AL MOTOR.

Datos experimentales no publicados sobre las emisiones de número de partículas de 24 vehículos comerciales GDI, fueron presentados y se observó que se requerirá de una mejora en la filtración; que va del 54% al 90% con el fin de alcanzar el límite PN diésel de $6 \times 10^{11} \text{ # / km}$ (ver Figura 2. 13). [20] vale la pena señalar sin embargo, que un fabricante GPF en particular presentó los datos de un vehículo que emite por debajo $8 \times 10^{11} \text{ # / km}$, verificando que existe un potencial y áreas de oportunidad de trabajar en los motores en fin de bajar las emisiones de las partículas emitidas. Todos los datos mostraron que bajo la operación real de los GPF, estos están limpios la mayor parte del tiempo y por lo tanto, estos tienen una alta eficiencia de filtración inicial. Estas observaciones están en comparación [20] con la tecnología de trampas de partículas actuales; que no aprobaron lo suficiente eficacia para reducir las emisiones de los vehículos GDI y alcanzar los estándares de la norma.

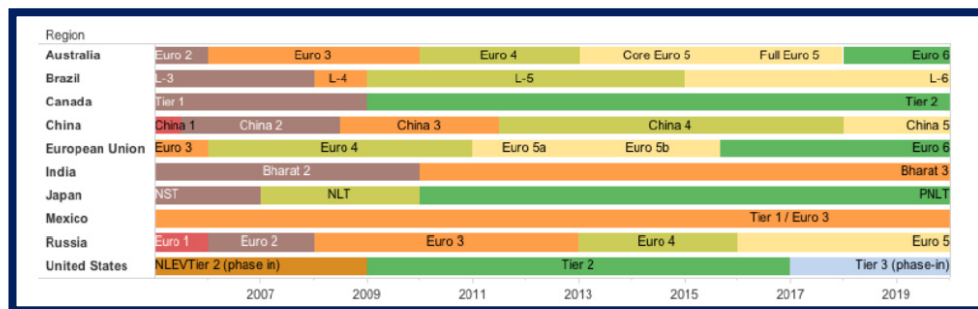


FIGURA 2. 13 REGULACIONES EN EMISIÓN DE PARTÍCULAS.

[20] Todos los datos experimentales presentados en la revista SAE no sugirieron ninguna penalización sobre el consumo de combustible en el ciclo de manejo NEDC, tampoco en condiciones urbanas y rurales. El aumento del consumo de combustible por un máximo del 3% sólo se observó a altas velocidades del motor y la carga completa, lo que sugiere un aumento de aproximadamente el 1% en condiciones de conducción de autopista. [20] El mismo grupo informó en un estudio posterior efecto insignificante en el consumo de combustible durante la conducción del ciclo de manejo CADC. No observaron ninguna penalización del consumo de combustible medible excepto a 180 kilómetros por hora y 200 kilómetros por hora donde se cuantificó en alrededor de un 2-3%.

Algunas pruebas también se realizaron en JRC (Join Research Centre, Centro de Investigación Unido por sus siglas en Inglés) para acceder a la realización de un estudio de GPF no catalizado en las emisiones de CO₂ en un vehículo GDI. Los resultados de estos experimentos se presentan en detalles en la (ver Figura 2. 14) donde compara las emisiones de CO₂ medidas del vehículo en su configuración OEM (De fábrica) contra la instalación del GPF instalado abajo del vehículo usando un catalizador de tres vías bajo los ciclos de manejo NEDC y CADC.

No hay penalización en el consumo de combustible y podría ser identificado en todas las pruebas incluyendo la parte de autopista bajo el ciclo CADC. Los datos sugieren una disminución pequeña en las emisiones de CO₂. En general, el efecto de la contrapresión introducido por los sistemas de GPF al sistema de escape es optimizado, se espera que el consumo del vehículo sea insignificante.

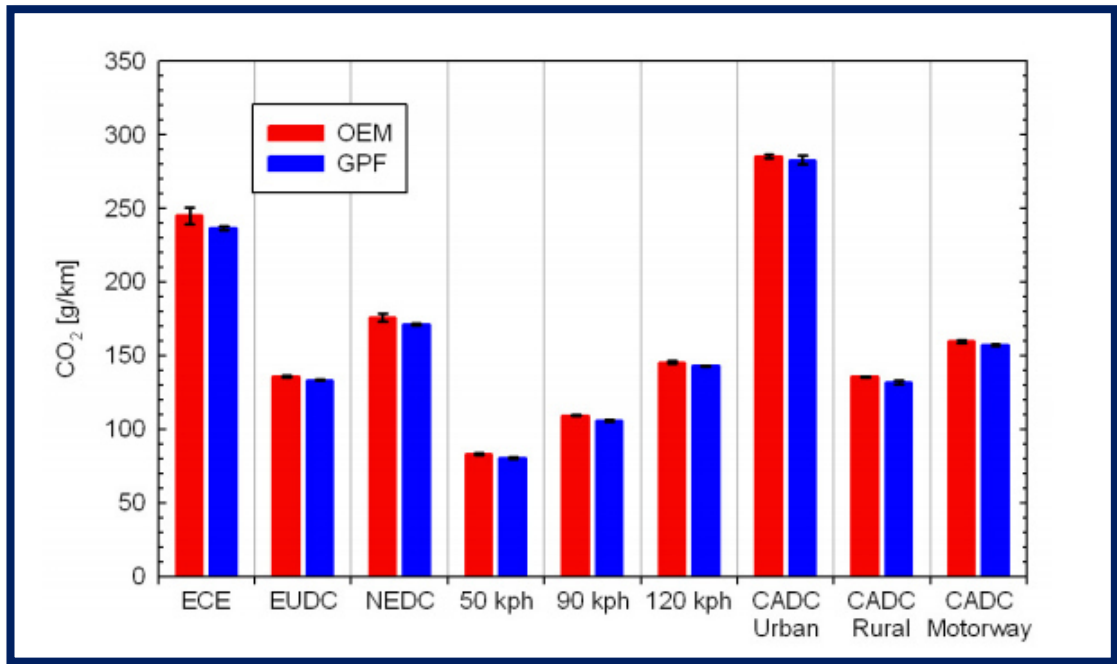


FIGURA 2. 14 COMPARACIÓN DE OEM VS GPF EN EMISIONES DE CO2. [22]

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

3.1 Parámetros del Proceso.

Para el desarrollo de los experimentos realizados al filtro de partículas, se han utilizado los siguientes parámetros y valores; mencionados en las siguientes tablas. Tabla 1 Tabla 2 Tabla 3 Tabla 4. Estos valores fueron utilizados para poder realizar cada uno de los experimentos del proyecto. En análisis de fluidos, laboratorio de validación y en el análisis de las fibras que fueron utilizadas en el filtro. Estos datos fueron obtenidos de las fichas técnicas de cada producto proporcionados por los proveedores. Las cuales son copias controladas por acuerdos de confidencialidad. El uso de los datos es y será con fines de investigación académica.

Parametros CFD	
Flujo Másico	160 SCFM / (90g/s)
Temperatura Gas	700 C
Calor Especifico	1135 J/Kgk
Conductividad	.06581 w/mK
Densidad	.3627 Kg/m ³

TABLA 1 PROPIEDADES DEL AIRE- CFD CENGEL, Y.A. 2003 TRANSFERENCIA DE CALOR, TABLA A15. [23]

Parametros Substrato	
Diametro	118.4 mm
Largo	136 mm
Volumén	1.5 L
Densidad	62 Celdas/cm ²
Espesor	.114 mm

TABLA 2 SUBSTRATO CERÁMICO.

Fibra Metálica	
Espesor	.30 mm
Peso	450 g/mm ²
Porosidad	80%
Permeabilidad	3.73E-10

TABLA 3 FIBRA METÁLICA.

Parametros Motor	
Marca	GM
Tipo	Vortec
Combustible	Gasolina Magna
HP	300
Cilindros	8
Litros	5.3
Torque	325Lb/Ft @4000 rpm

TABLA 4 MOTOR.

3.2 Herramientas Computacionales.

3.2.2 Unigraphics (Nx)

Unigraphics es un completo sistema CAD/CAM/CAE en tres dimensiones. Donde se puede diseñar, analizar, crear planos y programas de mecanizado del producto. Proporciona diseño basado en curvas y superficies paramétricas. Esta es una de sus principales y más importantes características, ya que asegura una total integración del diseño, tanto internamente como externa.

Se utilizó este programa CAD para realizar todo el diseño del filtro, así como todos los planos y sus geometrías; que fueron utilizados como base durante todo el proceso de la investigación; en la simulación de fluidos y creación del prototipo.

3.2.1 Ansys Fluent

El software Ansys Fluent contiene amplias características de modelado físico que se necesitan para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones aplicadas al flujo de aire. Las características interactivas, permiten examinar los resultados, realizar cambios y ajustes, y continuar con el cálculo de la simulación.

Permite una conexión de primer nivel con los principales sistemas de modelado; en este caso fue utilizado el programa Unigraphics (Nx). Teniendo la capacidad de modelar sistemas de combustión dentro de cilindros, filtros, modelos aero-acústicos, turbo-maquinaria y modelos multifase por nombrar algunos ejemplos. Es por eso que este programa fue utilizado para la

simulación del filtro. Por tener la capacidad de arrojar los resultados y mostrar el comportamiento de los parámetros, para la interpretación exacta del diseño en la investigación.

3.3 Equipo de Medición.

Quemador:

Gas Burner (ID: 003)

Temperature Range: 0-1200° C

Flujo: 0 - 400 SCFM

Este quemador fabricado por la empresa AT&E se puede llevar a cabo pruebas de ciclos térmicos a diferente gama de productos. Someterlos a ciertas temperaturas, simulando el calor generado por un motor de combustión, en un tiempo determinado, puede llegar hasta los 1200° C. Por otro lado se pueden hacer pruebas de enfriamiento para validar el perfil de enfriamiento del producto y a su vez evaluar el desempeño térmico de los componentes.



FIGURA 3. 1 QUEMADOR MARCA AT&E

Termopares y Sensores de Presión:

Marca Omega

Modelo Tipo K Versión Bayoneta de 1/8"

Equipos de medición de temperatura de 0 a 1200 C.

Estos sensores nos ayudan a la medición de temperaturas en diferentes puntos del sistema como también nos ayudarían a medir la presión y las caídas de presión en diferentes puntos. Pueden estar localizados antes y después del sistema.

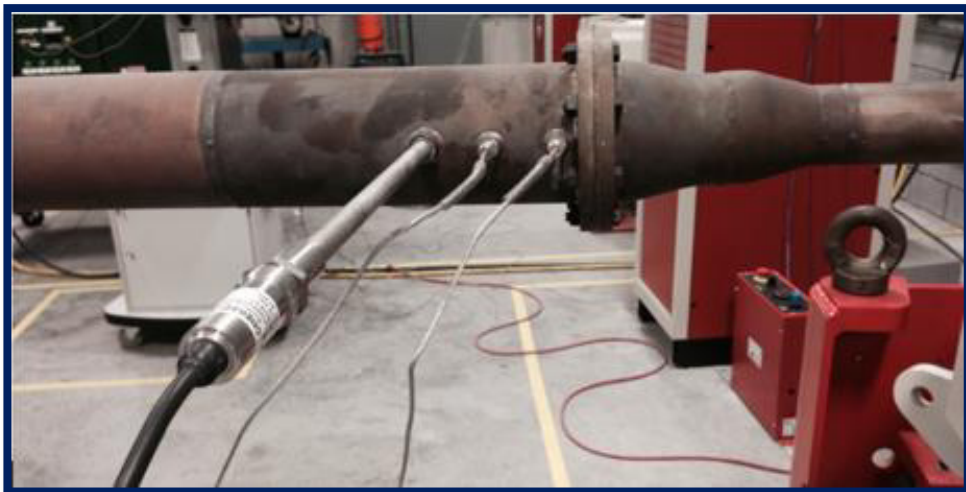


FIGURA 3. 2 TERMOPARES Y SENSORES DE PRESIÓN.

Vibrador:

Shaker LDS B&K Model V8-440 Serial Number: 991808

Manufacturer: Bruel & Kjaer LDS

Model: V440 - SPA56K

0 - 30 g-rms

50 - 2000 Hz

Con estos vibradores se puede someter el producto a validar dentro de varios perfiles de rangos de frecuencia, esto para someter la pieza bajo un stress determinado por cierto tiempo. Con este procedimiento se valora si el producto es válido bajo los requerimientos del cliente.



FIGURA 3. 3 VIBRADOR LDS.

Centro de Recolección de Datos:

Data Acquisition Equipment (Por sus Siglas en Inglés)

Software Lab View de National Instruments.

Tarjetas para grabar señales de temperatura y presión. Con este equipo se recolectaron todas las mediciones y valores arrojados en la experimentación de caída de flujo del filtro.



FIGURA 3. 4 RECOLECTOR DE DATOS Y LECTURAS.

Cámara de Inspección:

Inspección Interna.

Con este instrumento se pueden obtener imágenes internas del prototipo para revisar que no haya sufrido daño alguno.



FIGURA 3. 5 CÁMARA DE INSPECCIÓN INTERNA

Motor:

Vortec 5.3 L , 400 HP , de Inyección electrónica. GM.

Silverado , Camaro , Corvette , General Motors, 8 Cilindros , Gasolina.

Con este motor Vortec se realizaron las pruebas para la inyección de partículas dentro del filtro. Realizando diferentes corridas con distintas configuraciones.

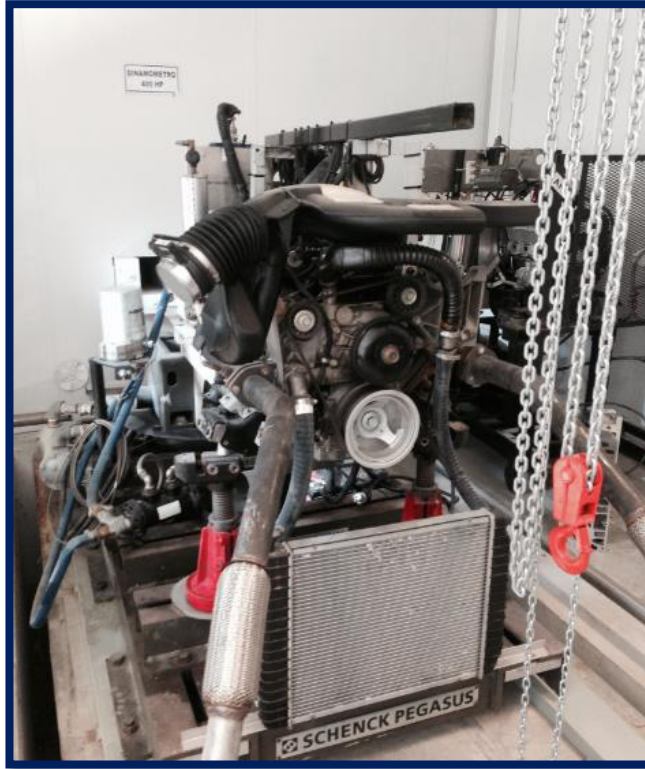


FIGURA 3. 6 MOTOR VORTEC GM ,V8 , GASOLINA.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados Obtenidos

4.1.1 Diseño.

Este diseño conduce a la construcción de un prototipo alfa de un filtro de partículas GPF, el cual será evaluado para obtener datos que nos ayudaran a definir la funcionalidad del filtro. Se evaluara en simulación de fluidos CFD, se construirá un prototipo alfa, se probara en un motor de gasolina y se evaluaran las fibras bajo la metodología de análisis térmico simultaneo (DTA-TGA-DSC) y Microscopía de barrido (MEB). La interacción ocurre cuando el prototipo se ajusta para satisfacer las necesidades de las normas ambientales, sin dañar el sistema de escape automotriz donde será aplicado.

A continuación se explicara la configuración usada para el filtro de partículas así como cada uno de sus componentes.

En la Figura 4. 1 se muestra el filtro desde una vista exterior, donde se puede observar el enlatado que tiene un largo total de tapa a tapa de 449.1 mm, un diámetro de 131.1 mm de acero inoxidable 409 SS acero inoxidable.

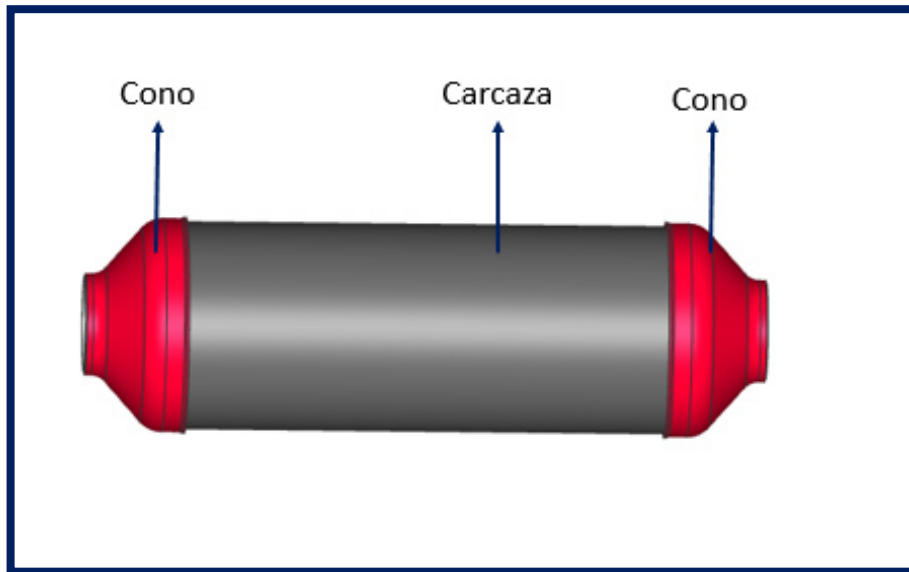


FIGURA 4. 1 FILTRO DE PARTÍCULAS PARA GASOLINA, VISTA EXTERIOR.

Las Figura 4. 2 Figura 4. 3 muestran los componentes internos del filtro, que son el sustrato, aislante, piezas metálicas y zonas de fibras metálicas.

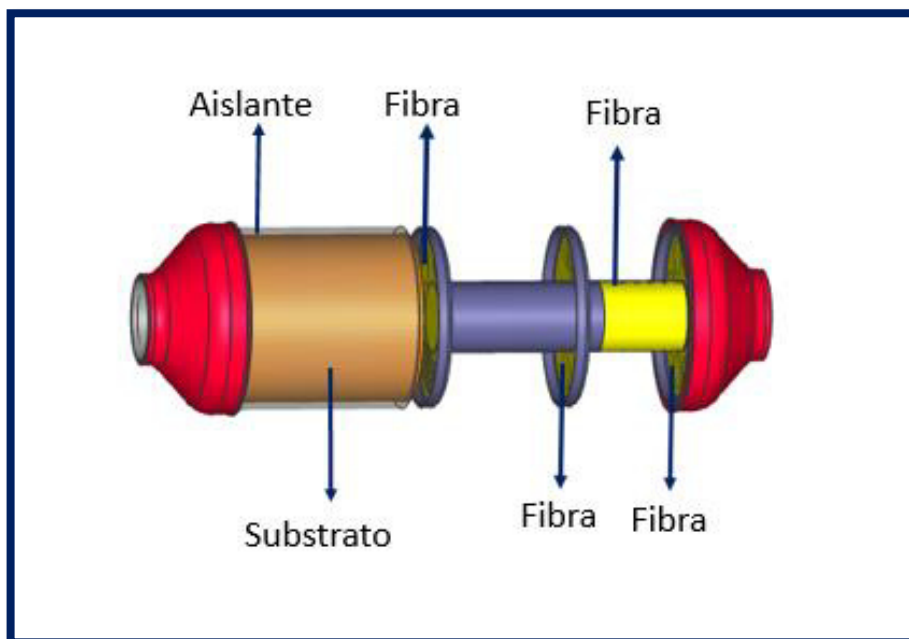


FIGURA 4. 2 PARTES INTERNAS DE FILTRO DE PARTÍCULAS.

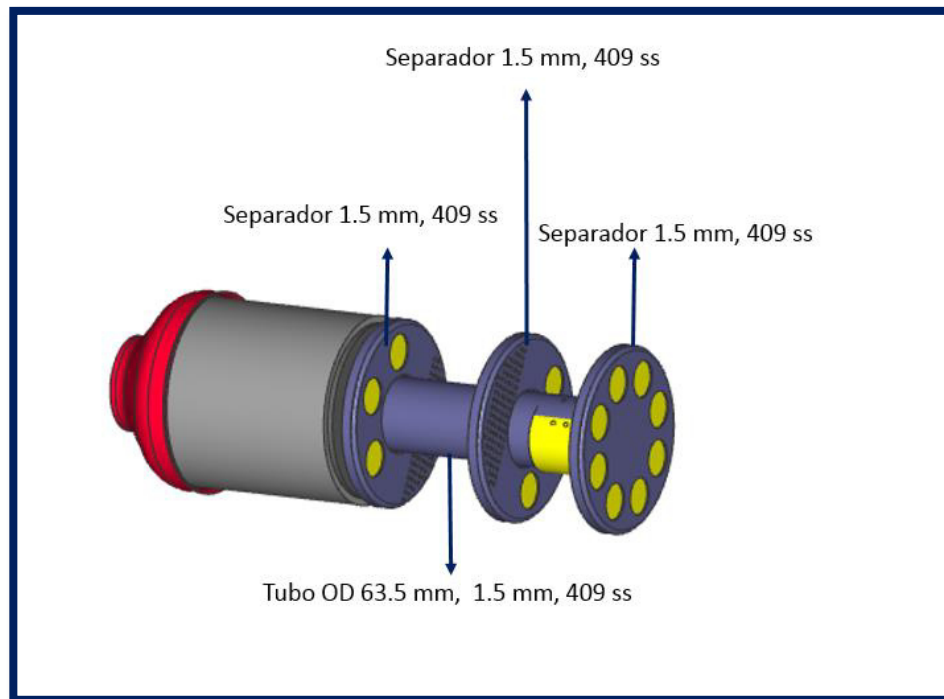


FIGURA 4. 3 PARTES INTERNAS DE FILTRO DE PARTÍCULAS.

Las piezas internas son de un metal inoxidable para evitar la formación de óxido y la corrosión del filtro. Este tipo de acero inoxidable es muy común en la industria automotriz por sus precios económicos en el mercado y su durabilidad ante los procesos sometidos como lo son la deformación, altas temperaturas, estrés y procesos de soldadura. El material usado es el material 409 inoxidable conocido como 409 SS (Stainless Steel por sus siglas en inglés.) En la Figura 4. 4 podemos observar su composición química y los porcentajes de sus componentes. El principales elementos es el carbono su máximo porcentaje presentado es del 3% y el Cromo que está en un rango de 10.5 % al 12.5 %.

Especificaciones Técnicas	409						Nombre: 409.pdf
	Acero Inoxidable Ferrítico						
	W. Nr.: 1.4512 / DIN: X2CrTi12 / AISI: 409						Hoja: 1 de 1
Composición química (en %)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Otros
≤0,03	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,015	10,50 12,50	6x(C+N) ≤0,65	-

FIGURA 4. 4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO 409 INOXIDABLE

A continuación observaremos algunos dibujos de construcción y ensamble que se pueden observar en las Figura 4. 5 Figura 4. 6 Figura 4. 7. Una vez creados estos planos se puede proceder a la creación del prototipo alfa. En estos dibujos se indican número de parte, materiales, dimensiones geométricas, tolerancias, posicionamiento de ensamble.

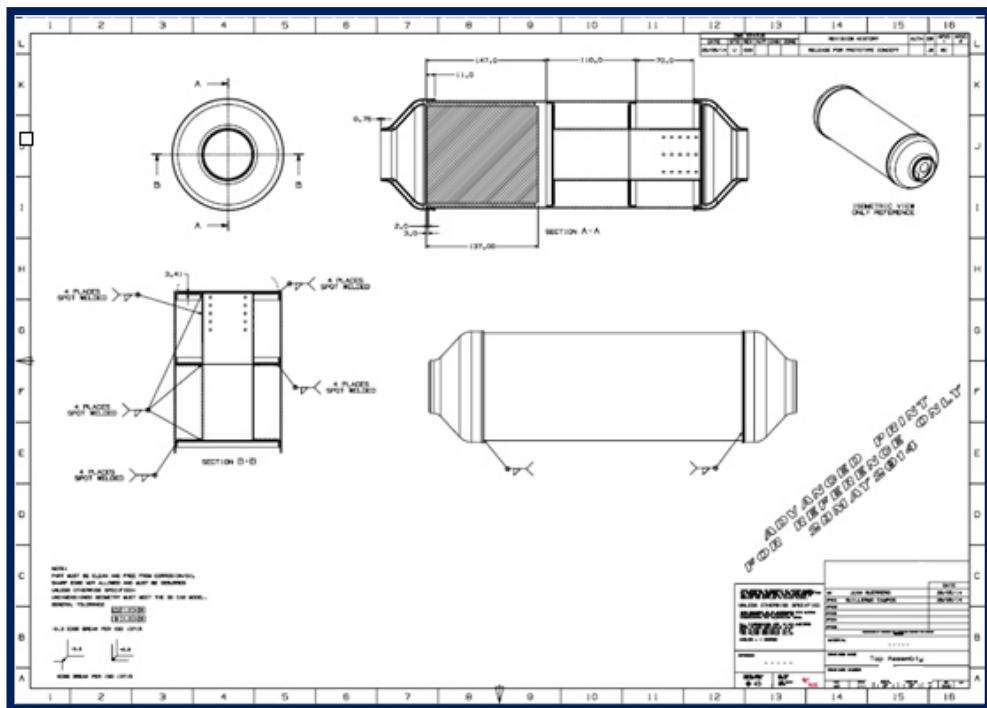


FIGURA 4. 5 DIBUJO DE ENSAMBLE TOTAL DE PROTOTIPO ALFA, USANDO EN EXP.

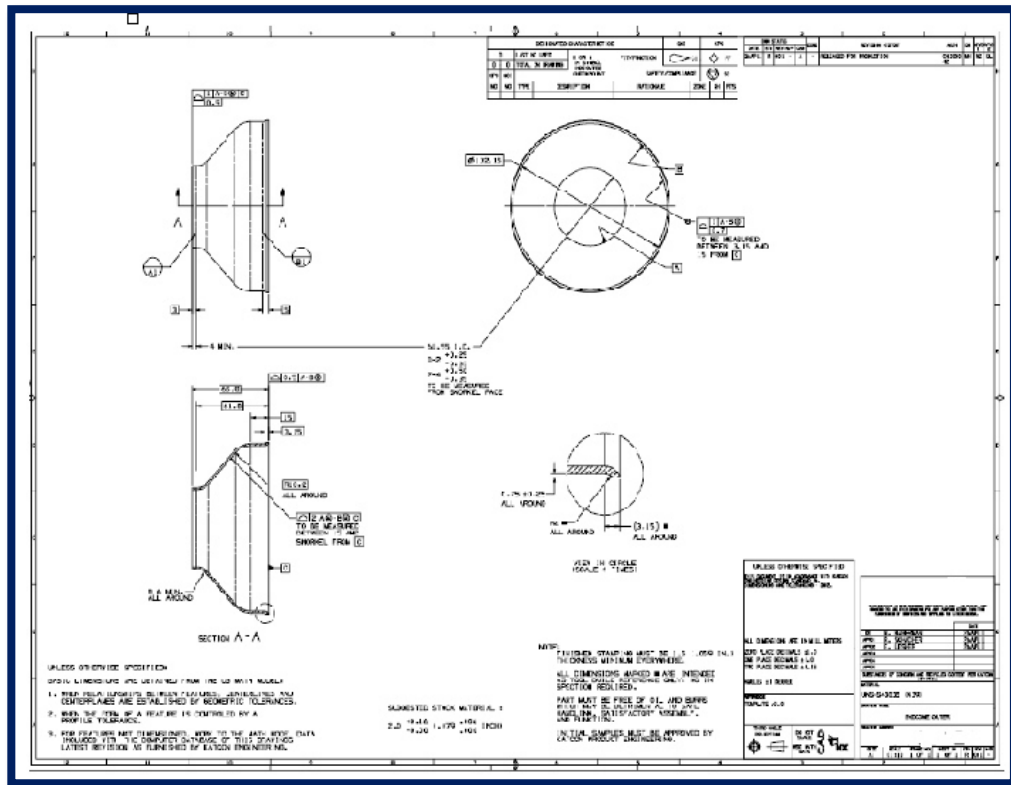


FIGURA 4. 7 CONO DE ENTRADA Y SALIDA DEL FILTRO DE PARTÍCULAS.

4.1.2 Volúmenes Internos - Mallado de Geometría

Después de diseñado el filtro de partículas, se pasó a la etapa a la etapa del análisis de fluidos CFD (Computational Fluent Dynamics por sus siglas en inglés.) Es una rama dentro de la mecánica de fluidos que utiliza los métodos numéricos y algoritmos para analizar problemas relacionados con el flujo de fluidos. CFD permite la realización de cálculos detallados de cualquier sistema en el cual intervengan fluidos, mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento para la geometría particular de cada sistema considerado.[24]

El objetivo principal de este análisis es verificar el comportamiento de los gases y/o fluidos dentro del filtro de partículas; en específico aplicado al diseño. Se busca observar y analizar su comportamiento ingresando las condiciones de frontera a las cuales se quiere llevar la validación física del prototipo. Observando su comportamiento interno y analizando la presencia de la caída de presión en su totalidad. De esta forma se puede observar si el filtro es un factor para que el sistema de escape se vea afectado en su funcionalidad.

Después de obtener los volúmenes internos del modelo del filtro; ver Figura 4. 8. Se procedió hacer todo el mallado del diseño. La malla utilizada para este modelo fue una malla híbrida; hexagonal y tetragonal. Ya que el modelo maneja diferentes tipos de cuerpos regulares e irregulares, se utiliza el tipo de malla de acuerdo a la complejidad de la geometría; la malla tipo hexagonal es utilizado para las geometrías regulares, ya que es donde mejor se adapta. La malla con tetraedros fue utilizada en los cuerpos irregulares con geometrías complejas.

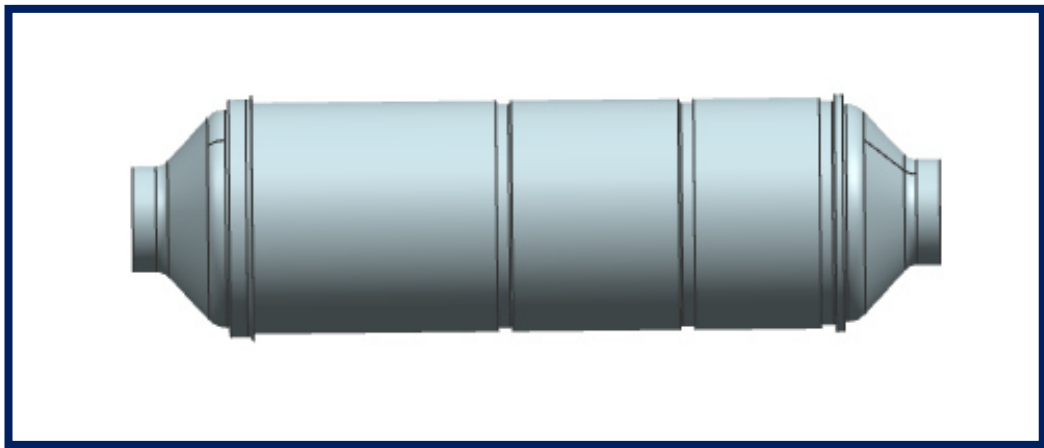


FIGURA 4. 8 VOLÚMENES INTERNOS DE FILTRO DE PARTÍCULAS.

Se puede observar en la Figura 4. 9; el mallado de los cuerpos en el filtro y el cómo fueron usadas los dos diferentes tipos de mallas; hexagonal y tetragonal. La hexagonal se observa aplicada en el catalizador y la tetragonal en el tubo interno del filtro.

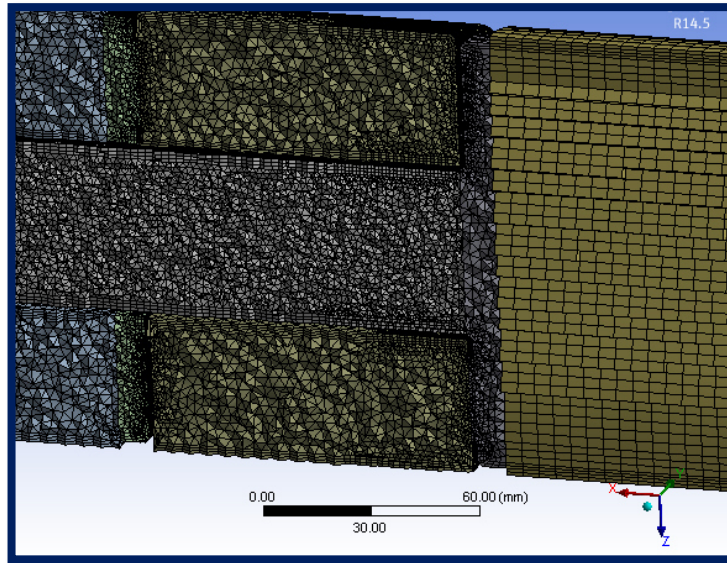


FIGURA 4. 9 MALLA HIBRIDA. HEXAGONAL Y TETRAGONAL.

Según las características de la geometría se escoge una u otra forma de dichos elementos para conseguir un mejor mallado. La complejidad de la geometría física involucrada junto al tamaño; define a grandes rasgos el tamaño del problema y la potencia de cálculo necesaria. La densidad de nodos o elementos puede cambiar de unas regiones a otras debiendo acumular un mayor número de ellos en las zonas donde se esperan fuertes variaciones.

Es importante saber en qué zonas se esperan fenómenos locales importantes y determinar ahí una malla más fina.

En la Figura 4. 10 se observa el mallado total del filtro. Para después poder correr la simulación de fluidos. El tamaño de la malla fue de 2, 954,342 celdas.

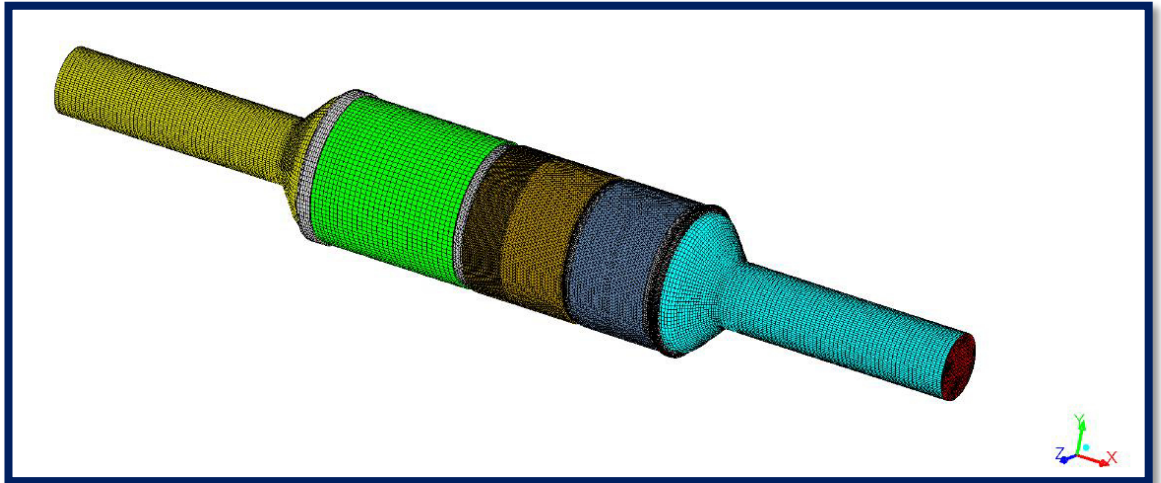


FIGURA 4. 10 MALLADO TOTAL DE FILTRO DE PARTÍCULAS.

El rango para la calidad ortogonal es de 0-1, donde un valor de 0 es el peor y un valor de 1 es el mejor. [24]

La calidad ortogonal para las celdas se calcula utilizando el vector de la cara, el vector desde el centroide de la celda al centroide de cada una de las celdas adyacentes, y el vector del centroide de las celdas a cada una de las caras. La Figura 4. 11 muestra los vectores utilizados para calcular y determinar la calidad ortogonal de una celda. [24]

La calidad de la malla del filtro fue medida por el rango de calidad del método ortogonal; donde los valores que corresponden cerca de 0 cero corresponden a un valor bajo en la calidad del mallado. Se debe obtener arriba de .05 en el valor mínimo para que sea considerada aceptable. [24]

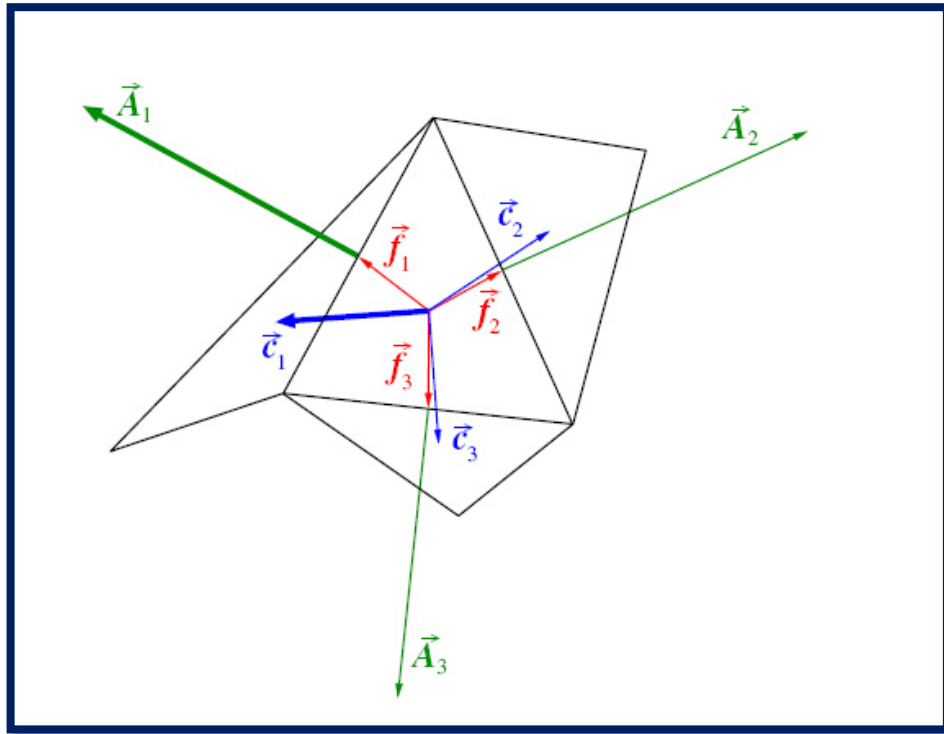


FIGURA 4. 11 VECTORES USADOS PARA CALCULAR LA CALIDAD ORTOGONAL DE UNA CELDA. [24]

El valor mínimo de calidad de la malla utilizada en el filtro es de .0976 y el valor promedio es de .85 que refiere a una calidad de malla aceptable, utilizada en el modelo. En la Figura 4. 12 podemos observar la gráfica de la calidad Ortogonal de los elementos tetraédricos y hexaédricos. Podemos observar que la mayoría de los elementos tetraédricos están por arriba del .85 y los hexaédricos arriba de .92 por lo que hace que la malla se determine de buena calidad y aceptable.

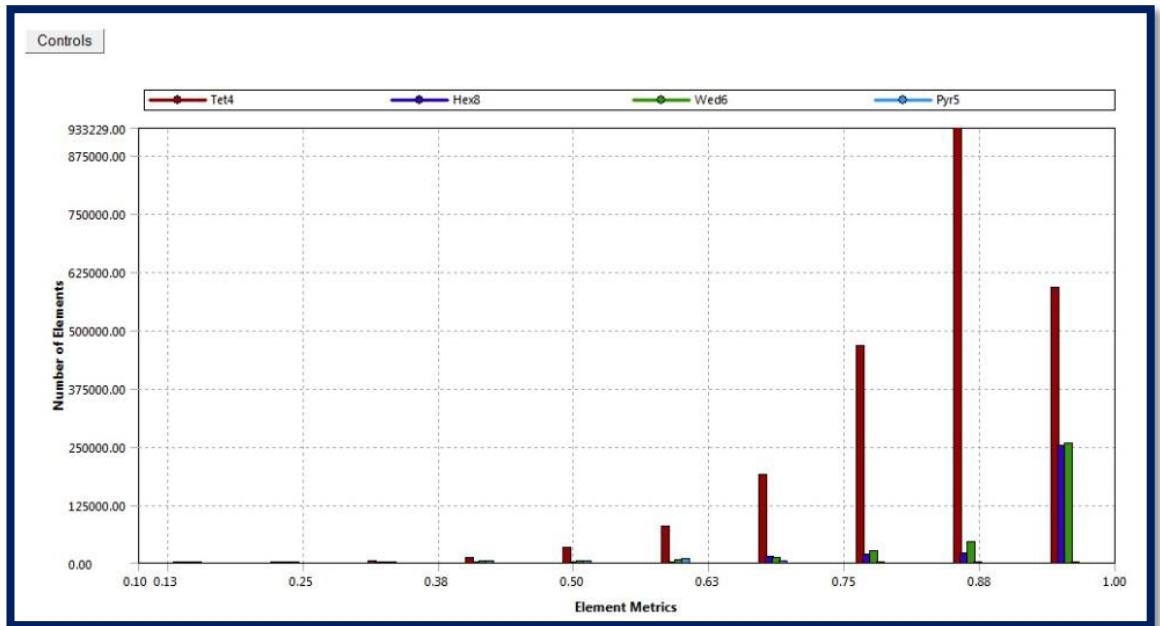


FIGURA 4. 12 GRÁFICA DE CALIDAD ORTOGONAL

Parámetros Malla	
Tipo	Hibrida (Hexagonal - Tetragonal)
Tamaño	2,954,342 celdas
Parametros de Calidad	Ortogonal
Valor Minimo de Calidad	0.0976
Valor promedio de Calidad	0.85

TABLA 5 PARÁMETROS CALIDAD DE MALLA

4.1.3 Análisis de Fluidos

Al obtener un resultado aceptable de buena calidad en el mallado del modelo, bajo la evaluación de los parámetros ortogonales, se procedió a correr el análisis de fluidos del filtro, utilizando el programa Fluent bajo el modelo de turbulencia K-Épsilon Realizable.

Se busca obtener la caída de presión total del filtro; con el objetivo de analizar y verificar que el filtro no es causante de formar restricción del flujo o una caída de presión significativa en el sistema de escape, afectando su funcionalidad del mismo u otros componentes el sistema.

El modelo k-épsilon es muy popular para aplicaciones industriales debido a su buena velocidad de convergencia. Es uno de los modelos más comunes de turbulencia, se trata de un modelo que incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades del flujo turbulento, esto permite que el modelo tome en cuenta tanto los efectos de la convección como la de la difusión de energía turbulenta. La primera variable que maneja es la energía cinética turbulenta K, la segunda es la disipación turbulenta E, esta última determina la escala de turbulencia.

El modelo K-épsilon realizable en Fluent se ha convertido en el caballo de batalla de la práctica de los cálculos de ingeniería de flujo, debido a su razonable precisión para una amplia gama de flujos turbulentos, a su resolución superior para los flujos que incluyen rotación, separación, recirculación y su bajo costo computacional.

Se consideró que el modelo que mejor se adapta para este caso; es el modelo K-épsilon realizable; debido a que es el modelo más utilizado para análisis de flujos turbulentos y transferencia de calor.

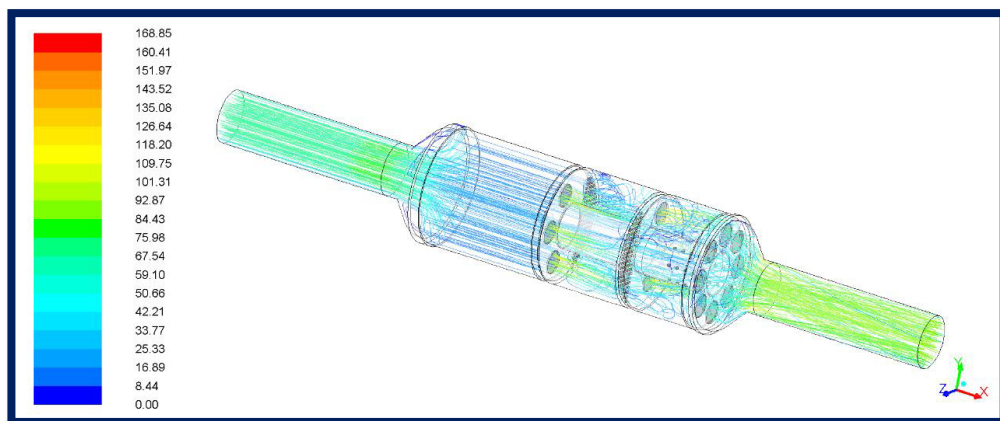


FIGURA 4. 13 PATRONES DE FLUJO DE FILTRO; BAJO EL MODELO DE TURBULENCIA K-ÉPSILON.

En la Figura 4. 13 y Figura 4. 14 se pueden observar los patrones de flujo dentro del filtro. En la entrada del filtro se observa una distribución uniforme del flujo pasando a la primera y segunda cámara donde se busca hacer una mezcla del flujo, haciendo que cambie de dirección y pase a través de las fibras internas para la retención de las partículas sin presentar restricción en el flujo. Así mismo se puede observar el tubo perforado que ayuda a la continuidad del flujo interno del filtro permitiendo que corra por los diferentes canales para su filtración.

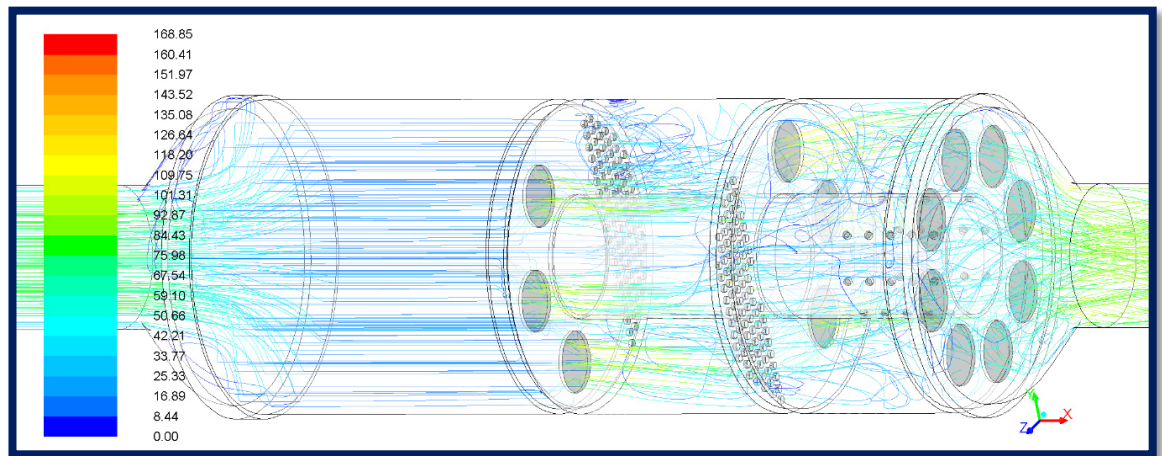


FIGURA 4. 14 PATRONES DE FLUJO DE FILTRO; BAJO EL MODELO DE TURBULENCIA K-ÉPSILON-REALIZABLE.

En la Figura 4. 15 se muestra el patrón de los vectores de velocidad a través del filtro. Puede verse como el fluido se desplaza a través de las cámaras; dentro de estas mismas se genera turbulencia para la mezcla de los gases, buscando que el flujo corra de manera uniforme por las cavidades de los separadores que están cubiertas en su totalidad por la fibra; atrapando partículas para su oxidación.

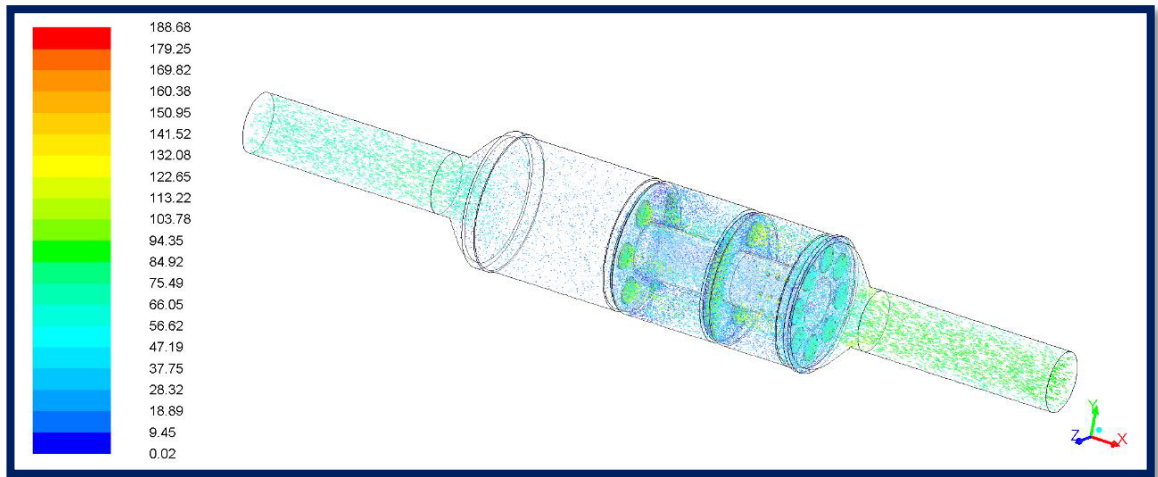


FIGURA 4. 15 PATRÓN VECTORES DE VELOCIDAD (M/s) K-ÉPSILON-REALIZABLE.

Los resultados obtenidos de la caída de presión total después de correr la simulación de fluidos del filtro se muestran a continuación. Se usaron los siguientes parámetros y condiciones de frontera para correr la simulación. Tabla 6 ,Tabla 7 ,Tabla 8.

Parametros CFD	
Flujo Másico	160 SCFM / (90g/s)
Temperatura Gas	700 C
Calor Especifico	1135 J/Kgk
Conductividad	.06581 w/mK
Densidad	.3627 Kg/m ³

TABLA 6 PROPIEDADES DEL AIRE- CFD CENGEL, Y.A. 2003 TRANSFERENCIA DE CALOR, TABLA A15. [23]

Parametros Substrato	
Diametro	118.4 mm
Largo	136 mm
Volumén	1.5 L
Densidad	62 Celdas/cm ²
Espesor	.114 mm

TABLA 7 SUBSTRATO CERÁMICO

Fibra Metálica	
Espesor	.30 mm
Peso	450 g/mm ²
Porosidad	80%
Permeabilidad	3.73E-10

TABLA 8 TABLA 3 FIBRA METÁLICA.

En la Figura 4. 16 podemos observar; que el resultado de la simulación respecto a la presión de entrada es de 20.305 Kpa; y la presión de salida 3.42 Kpa obteniendo como resultado 16.88 Kpa (2.43 psi). Ver Tabla 9

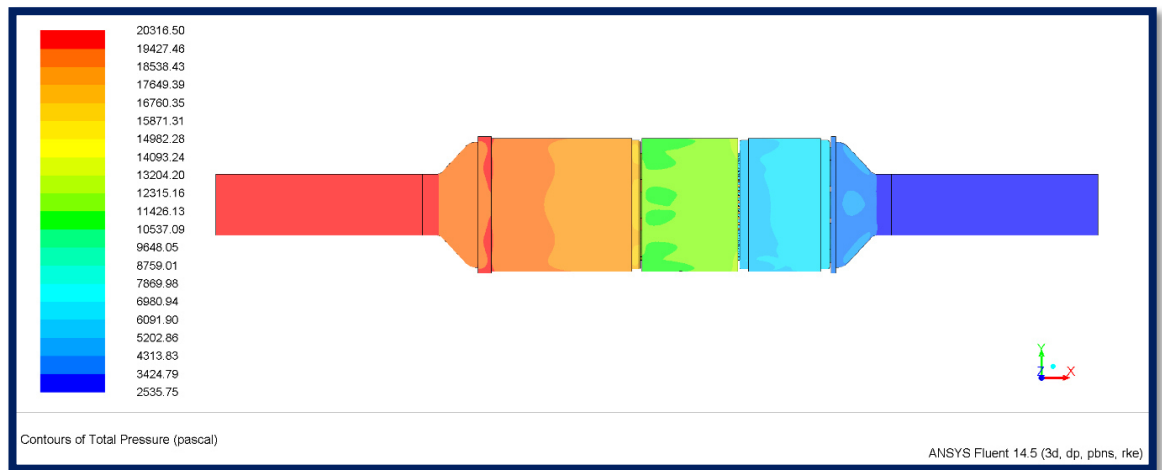


FIGURA 4. 16 RESULTADO CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL PASCALES K-ÉPSILON REALIZABLE

Resultados Caída de Presión	
Presión de Entrada	20.305 Kpa
Presión de Salida	3.42 Kpa
Caída de Presión	16.88 Kpa (2.43 psi)

TABLA 9 RESULTADOS CFD CAÍDA DE PRESIÓN FILTRO GPF- K-ÉPSILON REALIZABLE.

Los resultados obtenidos en la Tabla 9 son satisfactorios. Ya que la caída de presión buscada es menor a 20.68 Kpa (3 psi) tomando como referencia los datos de los protocolos de una de las principales automotrices a nivel mundial; estos protocolos de pruebas son utilizados para la validación de sus productos; en este caso, convertidores catalíticos. A continuación se mostrara como referencia los datos obtenidos de un convertidor catalítico (Ver Figura 4. 17) que se encuentra validado y en su actualidad usado en la industria. Por cuestiones de confidencialidad no se puede mostrar datos completos ni mencionar números de partes evaluados. Esta prueba se corrió dentro de las

instalaciones de la empresa Katcon, en sus laboratorios de validación del producto.



FIGURA 4. 17 CONVERTIDOR CATALÍTICO EVALUADO BAJO PROTOCOLO DE VALIDACIÓN CAÍDA DE PRESIÓN Y RESTRICCIÓN DE FLUJO.

En la Figura 4. 18 se puede observar que corriendo la prueba de validación a las mismas condiciones que la simulación del filtro (Que no son el mismo producto) se obtuvo un resultado de caída de presión 15.65 Kpa (2.27 psi). A diferencia de la simulación del filtro que fue de 16.88 Kpa (2.43 psi). Obteniendo una discrepancia del 6.5 %.

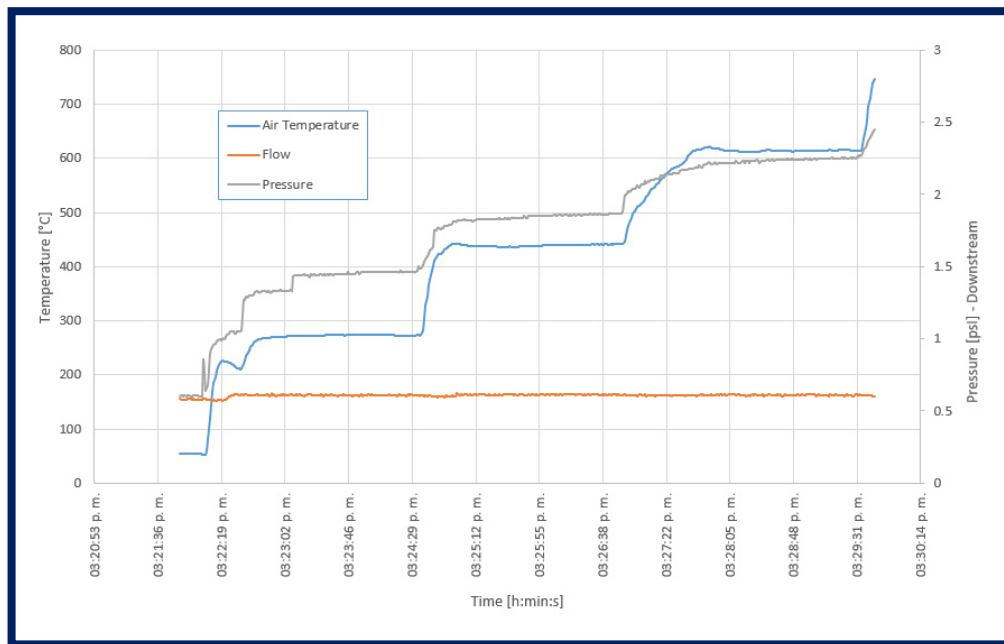


FIGURA 4. 18 GRAFICA CONVERTIDOR CATALÍTICO REFERENCIA, CAÍDA DE PRESIÓN.

En la Tabla 10 se puede observar los parámetros establecidos y resultados de la prueba de física corrida a la pieza de referencia, llevada a cabo en el laboratorio de validación.

Resultados Caída de Presión Convertidor Catalico Referencia	
Temperatura	695.8 C
Flujo	162.66 SCFM
Caída de Presión	15.65 Kpa (2.27 psi)

TABLA 10 RESULTADOS CAÍDA DE PRESIÓN, VALIDACIÓN DE PRODUCTO.

Como referencia; se llevó a cabo nuevamente el análisis de los fluidos del filtro con otro modelo de turbulencia; K- Omega estándar. El modelo k-omega utiliza funciones de pared y por lo tanto tiene requisitos de memoria comparables.

Es muy sensible a la suposición inicial en la solución. El modelo k-omega es útil en muchos casos como flujos internos, las corrientes que presentan curvatura fuerte, flujos separados, y chorros.

En la Figura 4. 19 se puede observar cómo se desplazan los patrones de flujo a través del filtro, formando turbulencia dentro de las cámaras y a su vez pasa por las fibras para su filtrado. El flujo circula por las perforaciones de los separadores para ser dirigido al tubo de salida de manera uniforme.

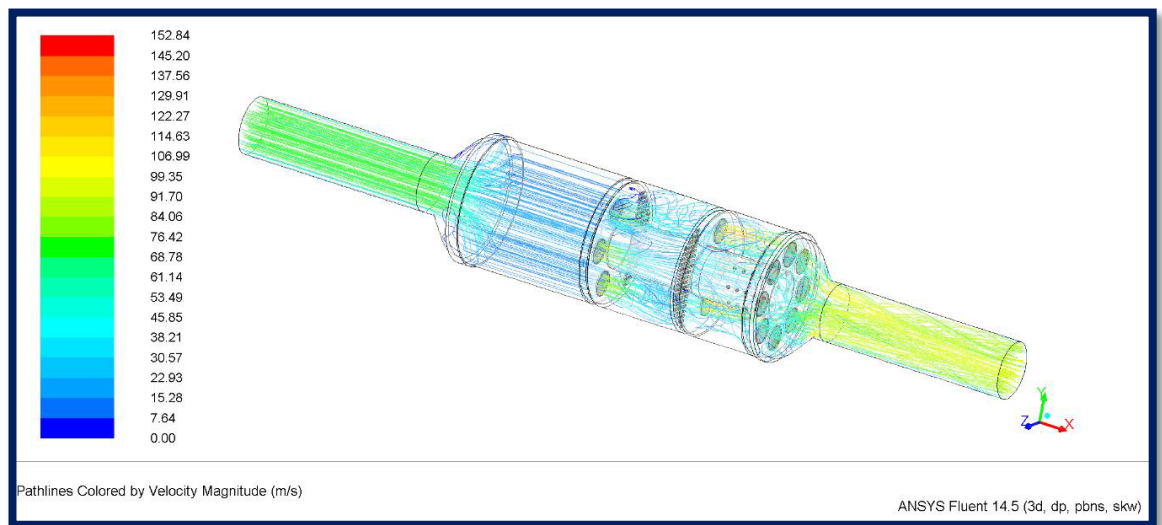


FIGURA 4. 19 PATRONES DE FLUJO DE FILTRO; BAJO EL MODELO DE TURBULENCIA K- OMEGA

En la Figura 4. 20 se observa el comportamiento de los vectores de velocidad dentro del filtro. Puede verse de manera muy definida como se dirige los vectores a través de la fibra y su comportamiento

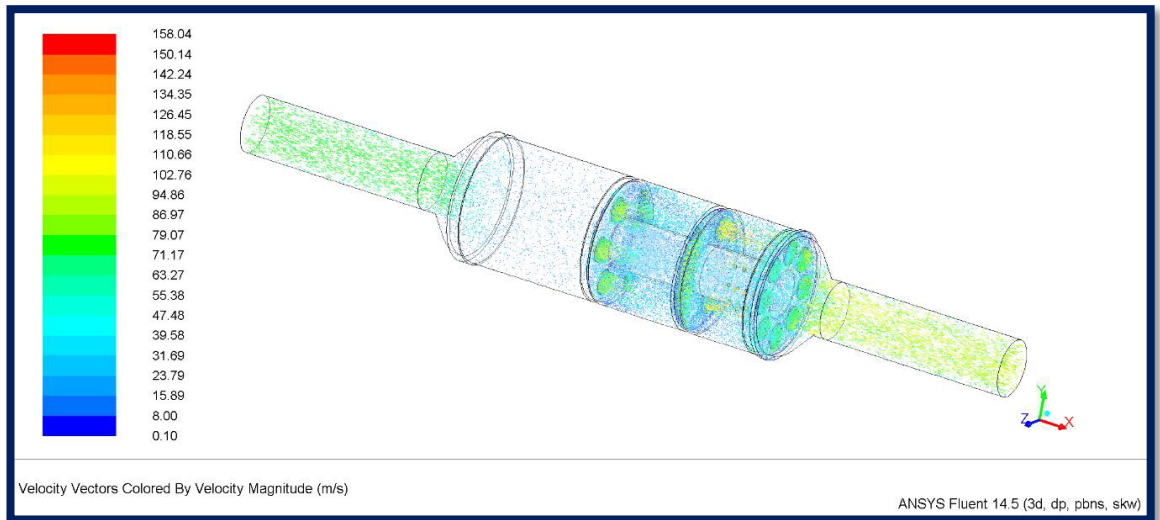


FIGURA 4. 20 VECTORES DE VELOCIDAD FILTRO GPF, K-OMEGA ESTÁNDAR

En la Figura 4. 21 se puede observar el comportamiento de la caída de presión total; la presión en el punto de entrada es de 21.572 Kpa y en la salida de 3.465 Kpa. Teniendo como resultado una caída de presión de 18.107 Kpa (2.62 psi). Se puede comparar que el resultado con el modelo de turbulencia K- épsilon realizable contra el K - Omega tienen una caída de presión similar teniendo una variación del cerca al 7%.

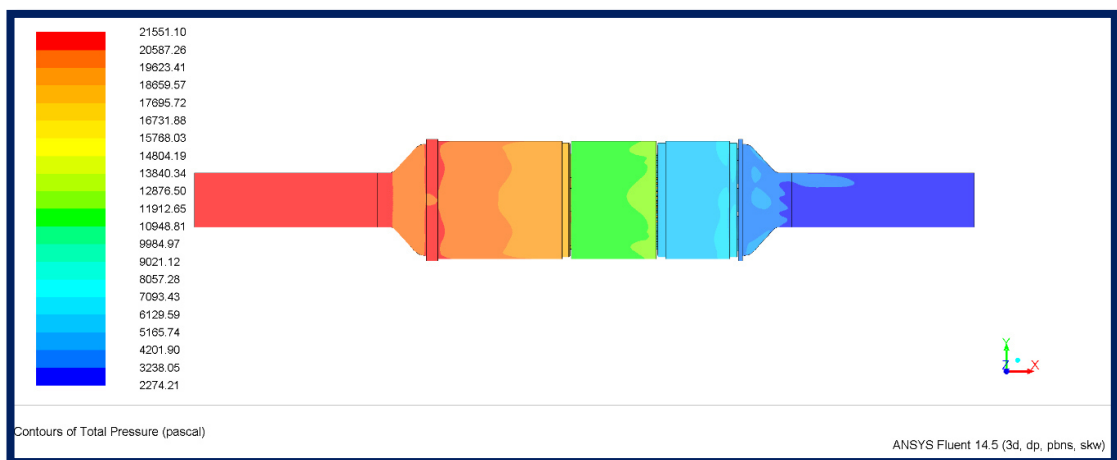


FIGURA 4. 21 CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL - K- OMEGA - PASCAL.

Resultados Caída de Presión	
Presión de Entrada	21.572 Kpa
Presión de Salida	3.465 Kpa
Caída de Presión	18.107 Kpa (2.62 psi)

TABLA 11 RESULTADOS CFD CAÍDA DE PRESIÓN FILTRO GPF- K-OMEGA.

4.1.4 Prototipo Alfa.

Después de llevar cabo los análisis de fluidos para la caída de presión y verificar que el comportamiento de esta variable era aceptable. Se procedió hacer la construcción del prototipo alfa. Se siguió el diseño de acuerdo al modelo matemático y a los planos dimensionales para su correcta construcción. A continuación se mostraran algunas imágenes de la construcción del prototipo. Figura 4. 22 Figura 4. 23 Figura 4. 24



FIGURA 4. 22 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO ALFA- GPF

En las siguientes figuras se observara el ensamblado de las partes del prototipo, como lo son sus partes internas, Tubo, Separadores, Fibras, Catalizador, Aislante. Sus partes externas como de entrada y de salida, carcazas metálicas.



FIGURA 4. 23 EMBUTIDO DE CONFIGURACIÓN INTERNA -FILTRO GPF.



FIGURA 4. 24 VISTA INTERNA - FILTRO GPF.

Proceso de soldadura y ensamble final. El tipo de soldadura empleada es MIG (Metal Inert Gas por sus siglas en ingles). Material 409.



FIGURA 4. 25 PROCESO SOLDADURA DE COMPONENTES - FILTRO GPF.



FIGURA 4. 26 PROTOTIPO ALFA- FILTRO GPF.

4.1.5 Validación de Prototipo Alfa, Caída de Presión.

Al terminar la construcción del prototipo alfa del filtro de partículas, se procedió a realizar la validación del prototipo en los laboratorios. Bajo los protocolos de prueba establecidos por una compañía automotriz de nivel mundial. No se puede hacer mención de todos los parámetros de las prueba por cuestiones de confidencialidad. Ni hacer referencia al nombre de armadora. La prueba a la que fue sometido el prototipo alfa fue a la prueba de restricción de flujo o caída de presión.

En esta prueba se midió la presión en la entrada y salida del filtro para poder determinar la caída de presión en el mismo. La prueba se llevó a cabo con un quemador de marca propia de AT&E con el cual se puede hacer inyección de aire a un flujo establecido con cierta temperatura en un tiempo determinado. Prácticamente lo que hace es una simulación de un motor de combustión interna para validar un producto bajo los parámetros de un protocolo establecido. En la Tabla 12 se muestran los parámetros establecidos bajo los cuales fue corrida la prueba de validación del prototipo.

Parámetros Validación de Prototipo Alfa	
Temperatura	689 C
Flujo	160 SCFM (90 g/s)
Caída de Presión	17.9 Kpa (2.61 psi)

TABLA 12 PARÁMETROS DE VALIDACIÓN DE PROTOTIPO ALFA

En Figura 4. 27 y Figura 4. 28 se muestra el prototipo ya instalado y corriendo la prueba de validación en el laboratorio. En esta prueba como se mencionó con anterioridad se inyecta un flujo dentro del filtro con una determinada temperatura por un tiempo establecido. Ver Tabla 12.

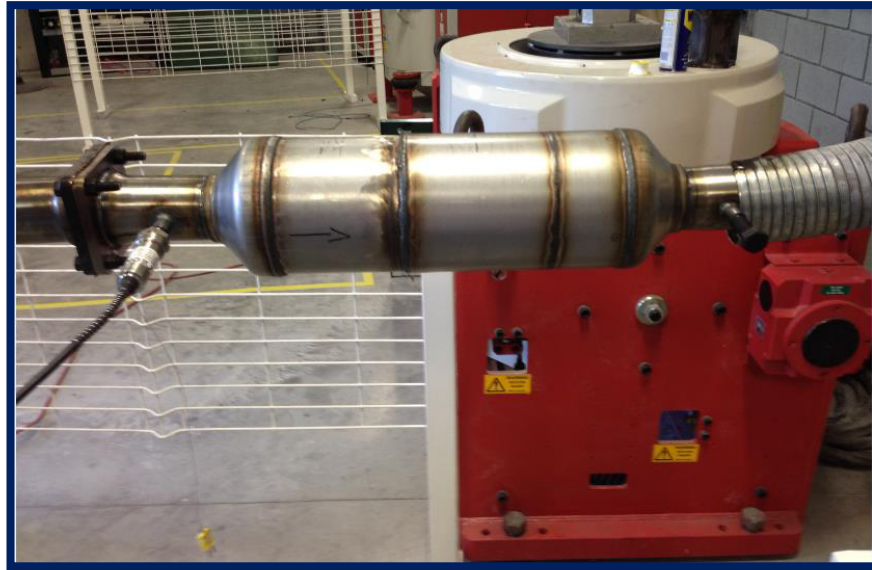


FIGURA 4. 27 VALIDACIÓN DE PROTOTIPO ALFA - PRUEBA CAÍDA DE PRESIÓN



FIGURA 4. 28 VALIDACIÓN DE PROTOTIPO ALFA CON FLUJO A 90 g/s @ 689 C.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes (ver Figura 4. 30) a 689 C grados Celsius con un flujo continuo de 90 g/s se obtuvo una caída de presión de 17.9 Kpa (2.61 psi) por lo que podemos observar que el resultado obtenido del análisis CFD con el modelo de turbulencia K- épsilon realizable fue de 16.88 Kpa (2.43 psi). Esto indica que la validación del prototipo alfa y el análisis CFD son muy similares en su comportamiento. Teniendo una diferencia de casi el 6%. Lo cual es aceptable. La validación en campo difiere con las simulaciones ya que se depende de ajustes, calibraciones y condiciones de operación del equipo utilizado.

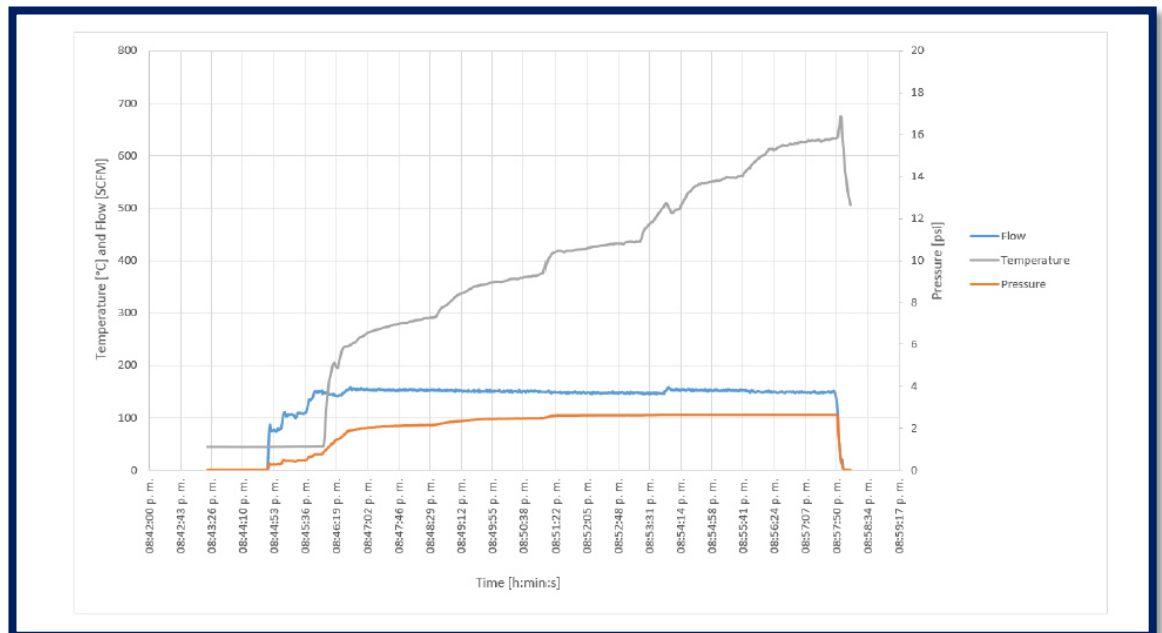


FIGURA 4. 29 GRAFICA DE PRUEBA DE VALIDACIÓN PROTOTIPO ALFA -CAÍDA DE PRESIÓN.

4.1.6 Prueba en motor de gasolina.

Una vez validado el prototipo en el laboratorio de validación. Se procedió a la prueba de motor de gasolina. El tipo de motor utilizado en la prueba fue un Vortec 5.3 L , 8 cilindros, 400 HP , de Inyección electronica, marca GM, en estado Ralentí (Ver Tabla 13). Utilizado en carros como Silverado ,Tahoe, Camaro, Corvette.

El objetivo de esta prueba es buscar generar e inyectar partículas dentro del filtro; para proceder analizar y observar el comportamiento del filtrado de partículas. Además de validar que en el funcionamiento de filtrado se está efectúa; llevando acabo la retención y la filtración de partículas de carbono.

Esta metodología de experimentación se llevó acabo como una metodología alterna y/o referencia. Ya que no se cuenta con el recurso de poder correr la prueba con un dinamómetro transitorio, bajo el ciclo de manejo NEDC. Los equipos utilizados para la experimentación de inyección de partículas; son equipos que se tenían ya en existencia y que se adecuaron para poder correr las pruebas.

Parámetros Prueba de Motor	
Marca	GM
Tipo	Vortec
Cilindros	8
Litros	5.3
HP	400
Combustible	Gasolina
Regimen	Ralentí
Tiempo de Prueba	5 minutos
Ciclos	3

TABLA 13 PARÁMETROS DE PRUEBA DE MOTOR.

La prueba se llevó a cabo en lapsos de 5 min en modo Ralentí. Para cada prueba el motor se encontraba apagado para después encenderlo bajo el régimen de Ralentí. Entre cada prueba se dejó enfriar 45 minutos el motor.

La primer prueba que se llevó acabo fue con la fibra metálica; que se adecuo de manera directa al sistema de escape. Sin filtro de partículas (ver Figura 4. 30). Con el objetivo de obtener la inyección directa de las partículas del motor y obtener un referencia de partículas emitidas por el motor. (ver Figura 4. 31) Se colocó la fibra; se encendió el motor durante 5 min y se tomó la muestra.



FIGURA 4. 30 PRUEBA DE MOTOR – FIBRA DIRECTA AL SISTEMA DE ESCAPE.



FIGURA 4. 31 CONFIGURACIÓN DE INSTALACIÓN - FIBRA DIRECTA AL SISTEMA DE ESCAPE.

La segunda prueba que se llevó a cabo después de 45 minutos de reposo del motor, fue la del filtro de partículas; instalando una fibra limpia a 40 centímetros de distancia (Figura 4. 32), con el objetivo de analizar y observar las partículas en esa fibra. De tal manera que se llevara a cabo una comparación y un análisis para verificar que el filtro atrapa y elimina las partículas. Tomando como referencia la fibra instalada de manera directa en el filtro (ver Figura 4. 31). Ya que esta fibra se expuso a la inyección directa de los gases y partículas emitidas por el motor. Para a su vez comparar la fibra instalada después del filtro; donde los gases y las partículas emitidas por el motor pasaron por el proceso de oxidación y filtración del GPF. De esa manera poder validar que el filtro de partículas está eliminando y reduciendo las partículas de los gases emitidos por el motor.

Se tomaran muestras de las fibras para poder ser analizadas y comparadas para poder dictaminar y validar que el filtro lleva a cabo la función del filtrado de partículas.

La metodología a empleadas para el análisis de las fibras fueron DTA-TGA-DSC Análisis Térmico Simultaneo y MEB Microscopia Electrónica de Barrido. Se desarrollaran a continuación.

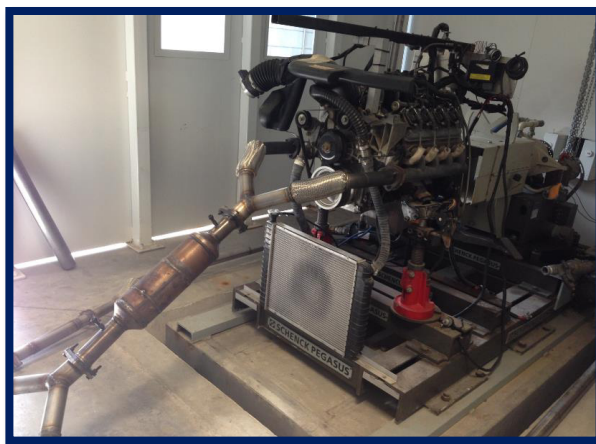


FIGURA 4. 32 PRUEBA DE MOTOR, FILTRO DE PARTÍCULAS Y FIBRA LIMPIA.

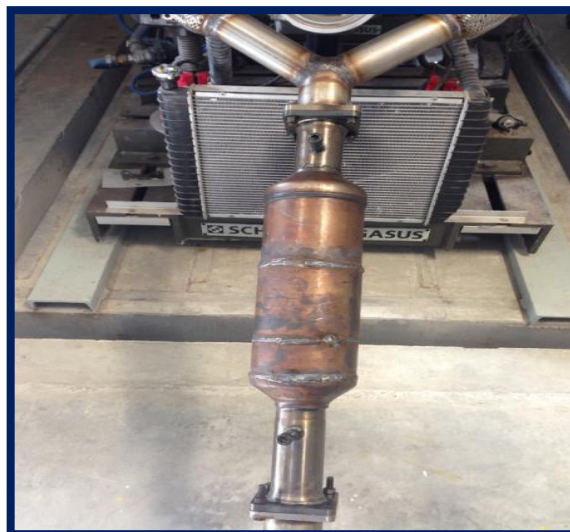


FIGURA 4. 33 PRUEBA DE MOTOR, FILTRO DE PARTÍCULAS Y FIBRA LIMPIA.

4.1.7 Análisis de Fibras

4.1.7.1 Análisis Microscopía Electrónica de Barrido.

El siguiente análisis utilizado para el análisis de las fibras fue MEB Microscopía Electrónica de Barrido. Aquí observaremos e identificaremos las partículas filtradas lo cual pueden llegar a tener un tamaño de hasta 2.5 micras. El Microscopio electrónico (Figura 4. 34) de barrido utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. [25] El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución, un detector de electrones retro dispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie, y un detector de energía dispersiva que permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semi cuantitativo y de distribución de elementos en superficies.



FIGURA 4. 34 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

A continuación se presentaran los resultados de las diferentes fibras; después de haber ser sido analizadas bajo la microscopia electrónica de barrido a 10 micras utilizando hasta 20 KeV para la identificación, su porcentaje en peso y el porcentaje de número de átomos de los elementos encontrados en las fibras, en específico el carbono. Las fibras fueron utilizadas en el experimento con el motor en estado ralenti, buscado la inyección de los contaminantes, en específico; las partículas de carbono.

La primera fibra que fue analizada fue la fibra limpia (FL) sin uso. Esto con el objetivo de tener una referencia de los elementos que componen la fibra sin ser usada. En la Figura 4. 35 se puede observar la imagen del a fibra a 10 micras, la fibra es limpia y los elementos encontrados son Carbono, Oxigeno, Aluminio, Silicio, Cromo, Hierro como se puede observar en la figura 4.78.

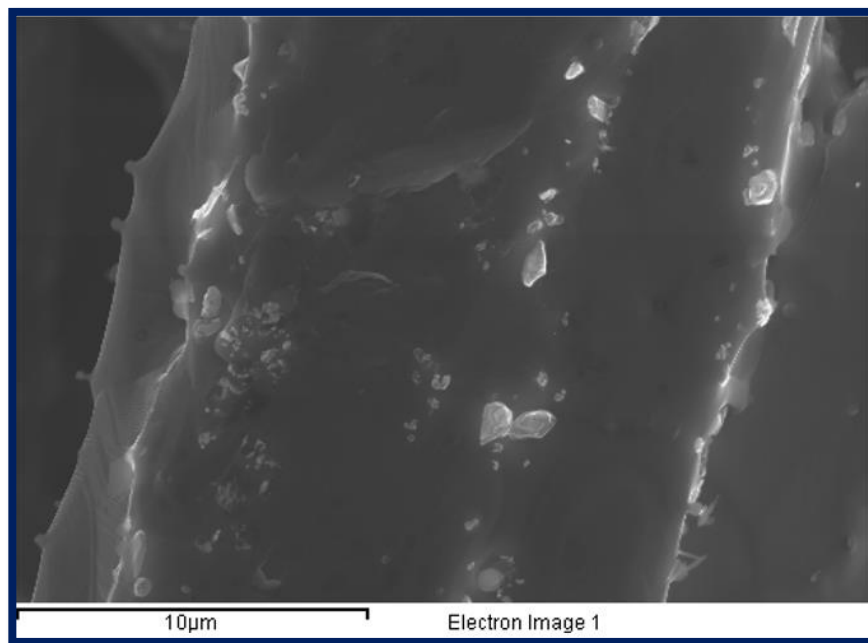


FIGURA 4. 35 FIBRA LIMPIA A 10 MICRAS BAJO EL ANÁLISIS MEB.

En la Figura 4. 36 se muestran los elementos encontrados a 20 KeV.

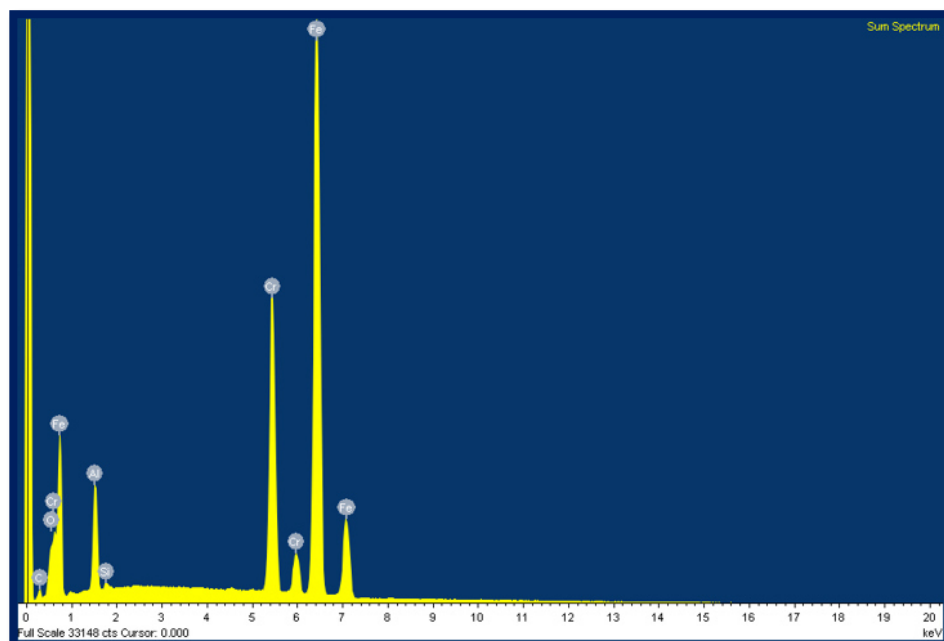


FIGURA 4. 36 GRAFICA DE ELEMENTOS ENCONTRADOS EN FIBRA A 20 KeV.

En la Tabla 14 se muestra los resultados obtenidos del porcentaje de peso de los elementos encontrados en la fibra limpia (FL). El elemento principal a analizar es el carbono. Con estos resultados podemos evidenciar el porcentaje de carbono y números de átomos de los elementos encontrados en la fibra limpia.

Element	Peso %	Atomos %
C	2.09	13.91
O	1.21	6.07
Al	3.14	9.32
Si	0.15	0.41
Cr	11.64	17.93
Fe	36.52	52.36

TABLA 14 ELEMENTOS ENCONTRADOS FIBRA LIMPIA, % DE PESO, % DE NÚMERO DE ÁTOMOS.

El siguiente análisis fue el de la fibra directa, sin filtro Figura 4. 31. El motor se operó en modo ralentí durante 5 minutos. Esperando que durante este lapso de tiempo se inyectaran los contaminantes a la fibra buscando la filtración de las partículas de carbono. Los resultados encontrados después de llevar acabo el análisis MEB fueron los siguientes.

En la Figura 4. 37 Figura 4. 38 se puede observar la contaminación de la fibra después de ser sometida a los gases del motor de manera directa. La imagen nos muestra la retención y filtración de las partículas en la fibra. Esto ayudaría a la oxidación de las partículas y a la regeneración pasiva de las fibra; utilizando la temperatura natural de los gases del sistema de escape que rondan entre los 500 C y los 750 C.

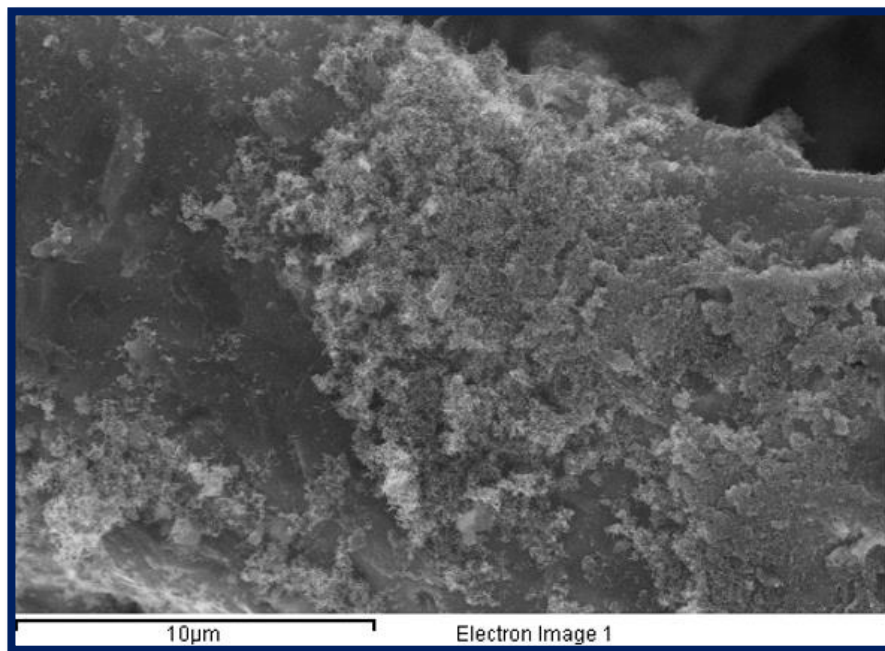


FIGURA 4. 37 IMAGEN FIBRA SUCIA DIRECTA A 10 MICRAS. PARTÍCULAS DE CARBONO

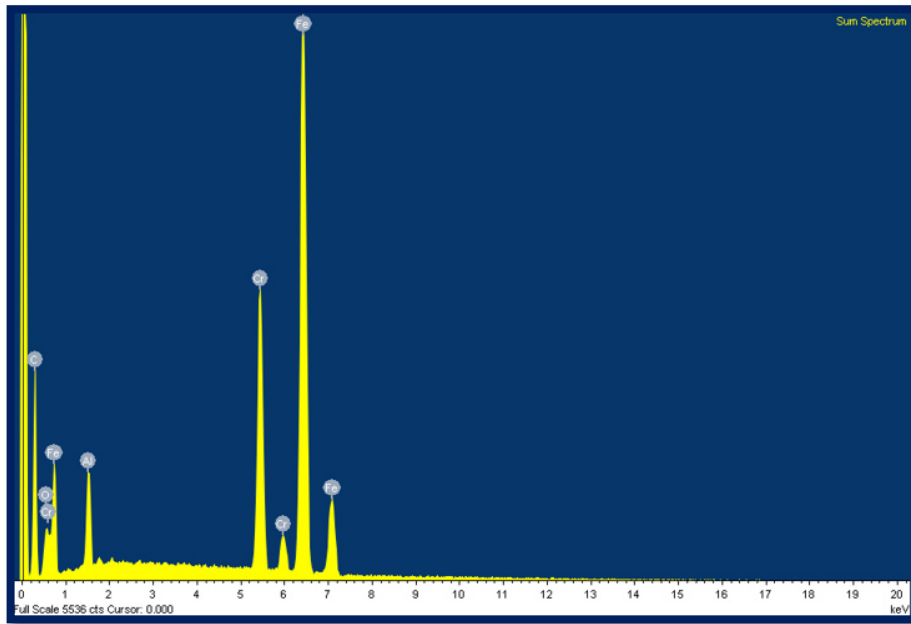


FIGURA 4. 38 GRAFICA DE ELEMENTOS ENCONTRADOS EN FIBRA A 20 KEV.

Los resultados obtenidos después de exponer la fibra de manera directa a los gases, reflejan la concentración alta del carbono ver Tabla 15. También se puede observar la variación en otros elementos. Es evidente que la fibra fue expuesta a altas concentraciones de partículas de carbono.

Element	Peso %	Atomos %
C	27.72	69.31
O	2.9	5.44
Al	2.04	2.27
Si	0.13	0.32
Cr	10.02	5.79
Fe	31.97	17.19

TABLA 15 ELEMENTOS ENCONTRADOS FIBRA SUCIA DIRECTA, % DE PESO, % DE NÚMERO DE ÁTOMOS.

Después de analizar las fibras y obtener datos para poder hacer una comparación en porcentaje de peso y en número de átomos de las partículas de carbono encontrados en las fibras. Se llevara a cabo el análisis de la fibra con filtro, de esta manera se podrá determinar si la cantidad de partículas de carbono son filtradas con éxito usando el filtro de partículas creado para la investigación.

En la Figura 4. 39 se puede observar como la fibra tiene partículas de contaminantes pero a un grado mucho menor que la fibra directa. Concluyendo que el filtro de partículas está llevando la acción de filtrar y reducir las partículas de carbono.

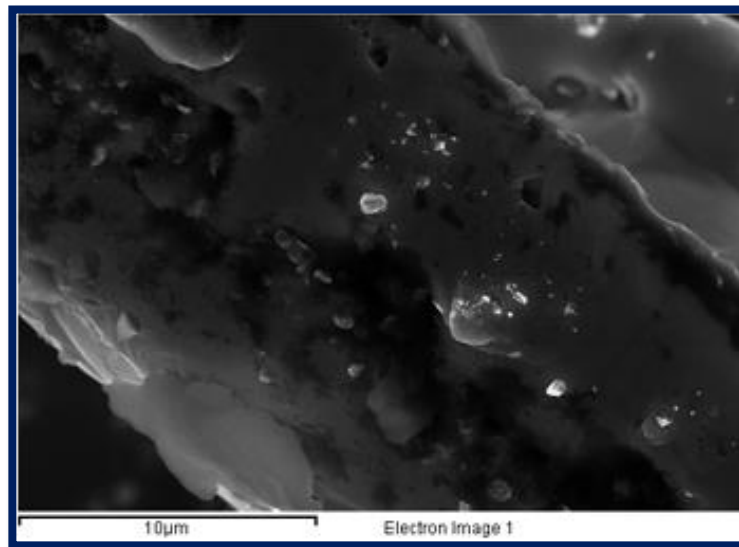


FIGURA 4. 39 IMAGEN FIBRA SUCIA CON FILTRO.

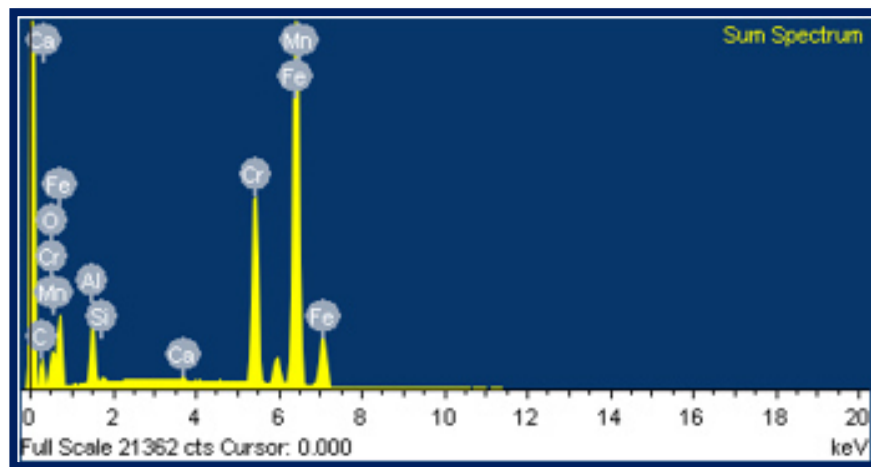


FIGURA 4. 40 GRAFICA DE ELEMENTOS ENCONTRADOS EN FIBRA CON FILTRO A 20 KEV.

En la Tabla 16, se puede observar que hubo una reducción en el porcentaje de peso de las partículas de carbono. La reducción fue de hasta 70% menor en comparación con la medición del porcentaje de peso en la fibra que fue expuesta de manera directa. Se puede concluir que si hay una mejora en reducción de partículas de carbono evitando que se emitan directamente al medio ambiente.

Element	Peso %	Atomos %
C	8.33	40.25
O	2.2	7.99
Al	2.51	5.39
Si	0.16	0.33
Cr	10.41	11.61
Fe	32.74	34.01

TABLA 16 ELEMENTOS ENCONTRADOS FIBRA SUCIA DIRECTA, % DE PESO, % DE NÚMERO DE ÁTOMOS.

En la Figura 4. 41 se puede observar la comparación entre las diferentes fibras usadas en la experimentación del filtro de partículas. La fibra sucia expuesta de manera directa a las partículas de carbón; es evidente que está totalmente contaminada la fibra sucia. Se observa que la fibra que fue usada con el filtro tiene una reducción muy notable en las partículas de carbono encontradas. Esto ratifica que el filtro de partículas GPF desarrollado para la filtración de partículas presenta una eficiencia de filtración. Haciendo que las partículas emitidas por el motor queden atrapadas y no sean emitidas al medio ambiente.

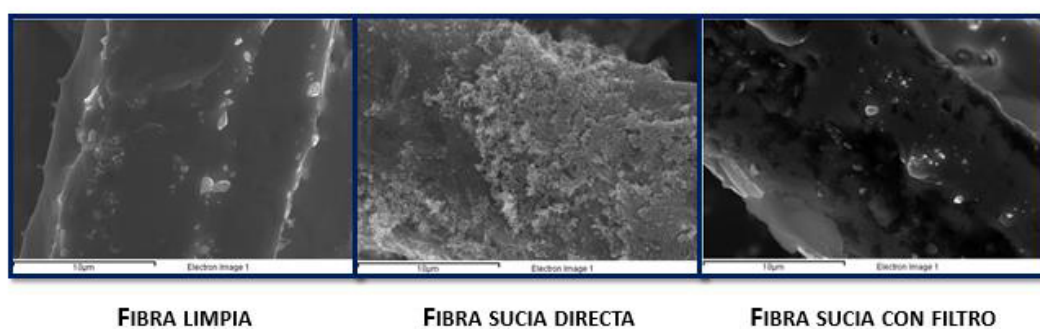


FIGURA 4. 41 COMPARACIÓN DE FIBRAS USADAS EN EL EXPERIMENTO

En la Figura 4. 42 se muestra la gráfica comparativa de los elementos encontrados en las fibras. Muestra el cambio en la concentración de las partículas de carbono. Existe una mejora considerable cuando se usa el filtro de partículas; esto indica que la funcionalidad del filtro es correcta para la filtración y disminución de partículas de carbono hacia el medio ambiente.

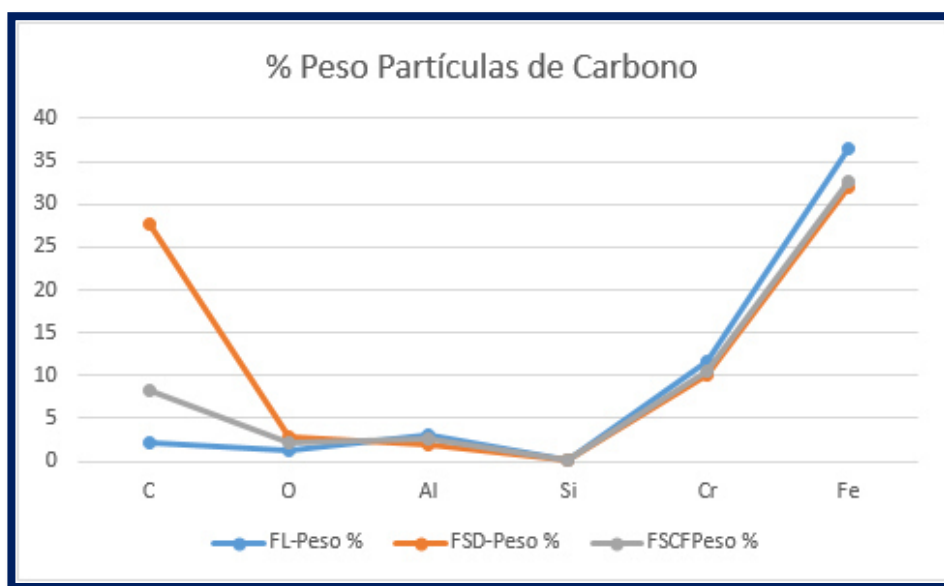


FIGURA 4. 42 COMPARACIÓN DE FIBRAS USADAS EN EL EXPERIMENTO

4.1.7.2 Análisis Térmico Simultáneo (TGA)

A continuación se desarrollara y explicara las metodologías aplicadas para el análisis de las fibras; en el cual se podrá validar la filtración de las partículas en el filtro. Los análisis que se llevaran a cabo en las fibras serán el DTA-TGA-DSC Análisis Térmico Simultáneo y MEB Microcopia Electrónica de Barrido.

El análisis térmico TGA es un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Cuando un material se calienta o se enfría, su estructura y su composición química pueden sufrir cambios tales como fusión, sublimación, solidificación, cristalización, descomposición, oxidación térmica o sinterización. En general estos cambios se pueden estudiar midiendo la variación de distintas propiedades de la materia en función de la temperatura, el tiempo y una atmósfera determinada. [25]

En la Figura 4. 43 se observa el equipo Termo gravimétrico que está diseñado para el análisis e identificación de composición de materiales por cambios en masa de una muestra en función de la temperatura o el tiempo, en un intervalo de temperatura ambiente hasta 1500 °C, pudiendo llevar a cabo estudios simultáneos de DTA y DSC.

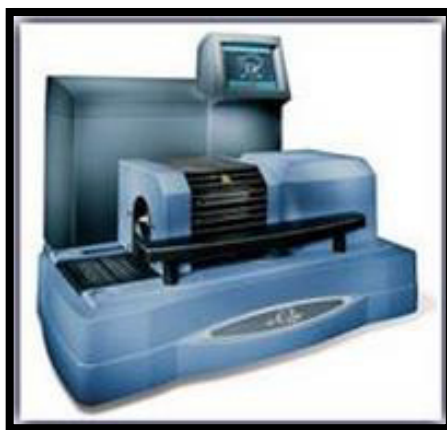


FIGURA 4. 43 EQUIPO DE ANÁLISIS TERMO GRAVIMÉTRICO

Se obtuvieron y se prepararon las muestras después de llevar a cabo el experimento con el motor; para ser analizadas bajo la metodología de un TGA análisis termo gravimétrico. Este tipo de análisis nos va a permitir colocar una muestra en una atmosfera controlada en función de temperatura y tiempo. En la cual tendrán una relación lineal durante el análisis.

Se harán tres análisis con tres diferentes fibras; en una atmosfera controlada con una temperatura que va de los 22 C a los 900 C. La primer muestra es una fibra limpia (FL); sin ser contaminada. Será tomado como un dato de referencia. La segunda muestra es una fibra que estuvo expuesta a las partículas del carbono con el filtro de partículas (FSCF). Esta grafica nos arrojará si las partículas de carbono se encuentran en concentraciones importantes en la fibra.

Y por último tendremos la fibra directa al motor en estado ralentí. Con todos estos muestreos obtendremos datos comparativos que nos ayudaran a soportar que el filtro de partículas está funcionando. Las tres fibras usadas en diferentes condiciones; ayudara a como una metodología de referencia y de datos comparativos.

En la Figura 4. 44 se puede observar en la gráfica que hubo una pérdida de peso, esto es debido u ocasionado por evaporación, reacciones de los componentes o a la reducción de óxidos metálicos; aquí los átomos de oxígeno disminuyen y empiezan a ganar electrones perdiendo masa.

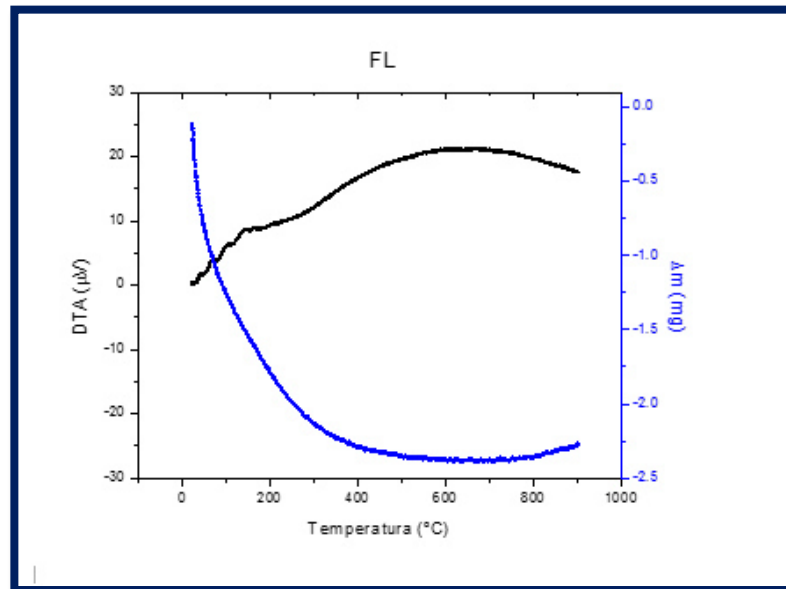


FIGURA 4. 44 ANÁLISIS TERMO GRAVIMÉTRICO DE FIBRA LIMPIA.

En la Figura 4. 45 se observa la gráfica de la fibra sucia usando un filtro (FSCF). El comportamiento de la gráfica es muy similar a la de la fibra limpia; esto es debido a la correcta filtración del filtro de partículas durante la experimentación. Aquí el peso que pierde es menor debido a la cantidad mínima de partículas de carbono presentes en la fibra.

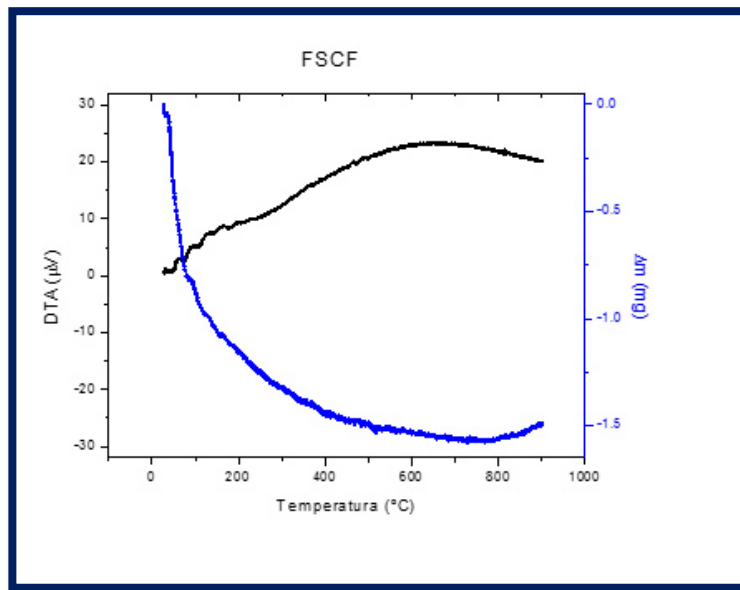


FIGURA 4. 45 ANÁLISIS TERMO GRAVIMÉTRICO DE FIBRA SUCIA CON FILTRO.

En la Figura 4. 46 podemos observar la gráfica termo gravimétrica de la fibra sucia que fue utilizada de manera directa. Esta grafica muestra la ganancia de peso debido a la oxidación de las partículas de carbono encontradas en la fibra. Con esta grafica se puede demostrar que la filtración del GPF se lleva a cabo en el proceso de la combustión; evitando la liberación al medio ambiente.

En la Figura 4. 47 Se compara las diferentes reacciones de las muestras analizadas. Podemos observar que la fibra limpia como la fibra con el filtro GPF tiene el mismo comportamiento de pérdida de peso por las diferentes reacciones químicas de sus componentes como lo es la reducción de óxidos metálicos. La Fibra sucia directa gana peso por la oxidación de las partículas de carbono, agregando partículas de oxígeno en el carbono; que puede reaccionar de dos maneras, como monóxido de carbono o dióxido de carbono. El hidrogeno del carbono se oxida produciendo agua que a su vez oxida al carbono del carbón siendo el monóxido de carbono y el hidrogeno los productos de esta oxidación y en una etapa final produce dióxido de carbono; que más adelante será convertido en gases nobles por el reacciones químicas dentro del catalizador.

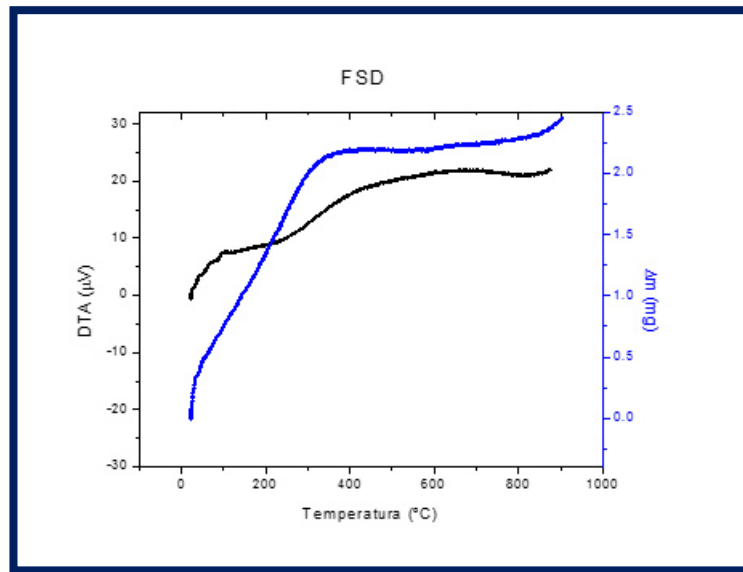


FIGURA 4. 46 ANÁLISIS TERMO GRAVIMÉTRICO DE FIBRA SUCIA CON DIRECTA.

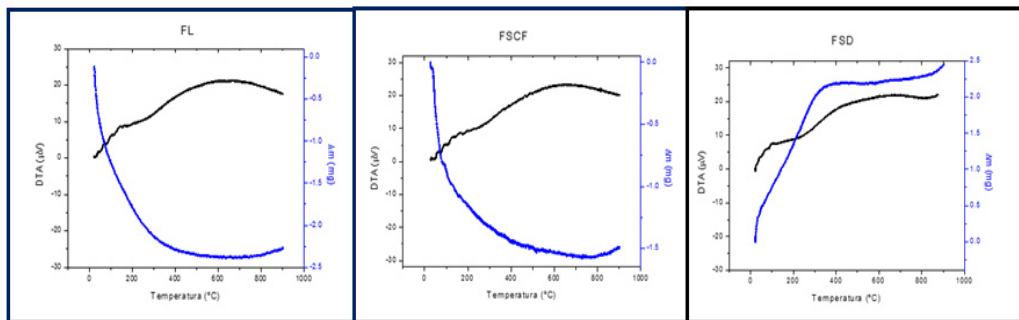


FIGURA 4. 47 GRAFICAS COMPARATIVAS DE LAS DIFERENTES MUESTRAS TGA.

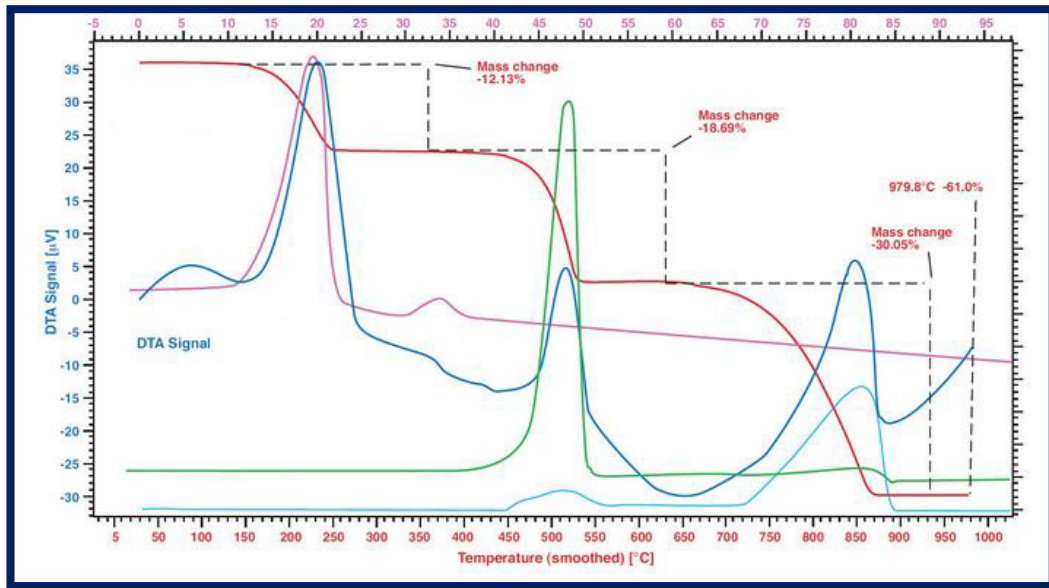


FIGURA 4. 48 GRAFICA DE REFERENCIA; CARBÓN DETERMINADO POR TERMOGRAVIMETRIA. REACCIÓN DE 150 C- 300 C. ROBERT PASARELL, FEBRERO 2013, DETERMINACIÓN DE CARBON TGA

4.2 Conclusiones.

4.2.1 Simulación CFD en relación con la validación.

Se obtuvieron resultados del comportamiento en el filtro de partículas (GPF) con respecto a la variable de caída de presión y su impacto en la reducción de partículas. Generando efectos positivos al medio ambiente; encaminado a lograr el cumplimiento de los nuevos límites aplicados a las normas de control ambiental (Euro VI).

Se desarrolló y se trabajó con una configuración de filtro; Close-Couple (Pegada al motor) para la reducción de partículas contaminantes, emitidas por motores de gasolina. Desarrollando una configuración interna del filtro GPF, donde el sistema no se vio afectado por caídas de presión; que pudieron haber afectado el funcionamiento del sistema de escape u otros componentes..

Con los resultados obtenidos de la simulación CFD con el modelo de turbulencia K- épsilon realizable; se pudo observar que el modelo no tenía un impacto significativo en la caída de presión dentro del sistema. Al usar nuevos materiales para la filtración de partículas, como lo son las fibras metálicas; la variable de la presión fue analizada para observar su comportamiento con el filtro de partículas.

A su vez se usó como referencia o punto de comparación un modelo de turbulencia K- Omega Estándar con el fin de observar los resultados obtenidos en la caída de presión.

El resultado de la simulación con el modelo K- épsilon realizable con respecto a la presión de entrada es de 20.305 Kpa; y la presión de salida 3.42 Kpa obteniendo como resultado una caída de presión de 16.88 Kpa (2.43 psi).

Con el modelo de turbulencia de K- Omega estándar se puede observar que la presión en el punto de entrada es de 21.572 Kpa y en la salida de 3.465 Kpa. Teniendo como resultado una caída de presión de 18.107 Kpa (2.62 psi). Se puede comparar que el resultado con el modelo de turbulencia K- épsilon realizable contra el K - Omega tienen una caída de presión similar teniendo una variación del cerca al 7%.

Después de obtener los resultados de las simulaciones; se procedió a construir el prototipo Alfa para poder hacer las pruebas de validación en el laboratorio; los resultados fueron los siguientes. Se corrió a 689 C grados Celsius con un flujo continuo de 90 g/s el resultado que se obtuvo fue de una caída de presión de 17.9 Kpa (2.61 psi) por lo que podemos observar que el resultado obtenido del análisis CFD con el modelo de turbulencia K- épsilon realizable fue de 16.88 Kpa (2.43 psi). Esto indica que la validación del prototipo Alfa y el análisis CFD son muy similares en su comportamiento. Teniendo una diferencia de casi el 6%. Lo cual se puede concluir que es aceptable. La validación en campo difiere de las simulaciones ya que depende de ajustes, calibraciones y condiciones de operación del equipo utilizado.

4.2.2 Efecto del filtrado de las partículas bajo los análisis de Microscopia de Barrido y Termo gravimétrico de las fibras usadas en las pruebas de motor.

Después de llevar a cabo las pruebas con el motor en estado ralentí; en la cual se usaron 2 diferentes configuraciones. La fibra directa sin filtro y la fibra usando el filtro de partículas. Aunado a esto como referencia se analizó la fibra en su estado virgen.

Los análisis arrojados por la microscopia de barrido nos muestran que usando el filtro de partículas GPF la reducción fue de hasta un 70% en comparación con el porcentaje de peso del carbono en la fibra que fue expuesta de manera directa. Se puede concluir que si hay una mejora en reducción de partículas de carbono evitando que se emitan directamente al medio ambiente.

Una segunda metodología usada como referencia fue el análisis termo gravimétrico de las fibras; en sus tres diferentes configuraciones. Fibra limpia, fibra sucia directa y fibra usada con filtro.

En los resultados se puede observar un comportamiento similar en la fibra limpia como en la fibra donde se usó el filtro; hubo una pérdida de peso en ambas fibras, esto es debido u ocasionado reacciones de los componentes o a la reducción de óxidos metálicos; donde los átomos de oxígeno disminuyen y empiezan a ganar electrones perdiendo masa.

Por otro lado la fibra sucia directa gana peso por la oxidación de las partículas de carbono, agregando partículas de oxígeno en el carbono; que puede reaccionar como dióxido de carbono. El hidrogeno del carbono se oxida produciendo agua que a su vez oxida al carbono del carbón siendo el monóxido de carbono y el hidrogeno los productos de esta oxidación y en una etapa final produce dióxido de carbono; por reacciones químicas dentro del catalizador; convirtiéndose en gases no dañinos para el ser humano.

Después de llevar a cabo estos dos análisis se puede concluir que el prototipo del filtro está llevando a cabo la función de filtrando las partículas de carbono.

4.2.3 Trabajo futuro y recomendaciones.

En la actualidad la industria automotriz está trabajando fuertemente para aligerar el peso de los carros; tener una mejor eficiencia en el combustible y tener el mínimo impacto en el medio ambiente; es por eso que la creación de nuevas tecnologías en filtros ha surgido y ha tomado fuerza para ser implementados en los sistemas automotrices.

La investigación realizada se llevó a cabo con las herramientas facilitadas en la UANL y en Katcon, obteniendo como resultado los análisis que ayudan a soportar la eficiencia y el funcionamiento del filtro de partículas desarrollado.

El trabajo futuro o una segunda etapa; junto con las recomendaciones para poder obtener resultados con un mayor rango; es necesario poder desarrollar los experimentos en una cámara de ambiente controlado, en un analizador de gases con túneles de viento marca Horiba ; utilizar un motor GDI para poder ser operado en un dinamómetro que permita hacer pruebas transitorias con diferentes ciclos de manejo. La inversión de estos equipos es de varios millones de pesos; buscando un fondo de inversión se puede hacer un laboratorio con estos equipos.

La proyección y el alcance de este filtro de partículas pueden llegar a ser tan alta como se consiga el fondo de inversión. Ya que el impacto es directo al beneficio del medio ambiente y usado en la industria automotriz

BIBLIOGRAFÍA

1. **Departamento de Comunicación de la Comisión Europea.** http://europa.eu/index_es.htm. [En línea] Departamento de Comunicación de la Comisión Europea. [Citado el: 24 de Julio de 2014.]
2. **Europea, Legislación.** Diario Oficial de la Union Europea . [En línea] 28 de Julio de 2008.
3. **NGK Europe GmbH Company .** *Ceramic Wall FLOW Filter for Particulate Emission Reduction for Petrol Engines.* London : s.n., 2013.
4. *Advanced Gasoline Particulate Filter for Effective Emission Control for EU6 and Beyond.* **K. Kato, P. Kattouah, E. Ohara, C. D. Vogt, Y. Ito, T. Aoki, T. Shimoda, Y. Shibagaki.** Dussendorf : NGK, 2014. EmissionControl Concepts Fo Gasoline Engines 2014.
5. *REGLAMENTO (CE) No 715/2007 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea.* 2007, REGLAMENTO (CE) No 715/2007 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO.
6. *Diesel Particulate Filter.* **Majewski, W. Addy.** 2001.07b, s.l. : DieselNet, 2001. 2001.07b.
7. *The Filtration and Particulate Matter Oxidation Characteristics of a Catalyzed Wall Flow Diesel Particulate Filter: Experimental and 1-D 2-Layer Model Results .* **Anand S. Shende, John H. Johnson , Abishek M. Thalagavara.** 2005, SAE100 Leading Our World in Motion , págs. 1-23.
8. *Contaminación Atmosferica y Control de Emisiones al aire.* **Rubén, Jerves.** 2006.
9. **Said, Zidat.** *Exhaust Hot End Flow and Thermal Management .* Luxembourg : Tech Center Luxembourg , 2009.

10. *Benefits and Important Features of Coated GPF Systems for Euro 6c.* **Howard, Dr Michael Johnnoson Matthey** . Alemania : s.n., 2014. Benefits and Important Features of Coated GPF Systems for Euro 6c.
11. *National Research Council. Committee on the Assessment of Technologies for Improving Light-Duty. Economy, Committee on the Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel y Council, National Research.* 2010. Assessment of Technologies for Improving Light Duty Vehicle Fuel Economy. págs. ISBN: 0-309-15608-4.
12. *Strategies Towards Meeting Future Particulate Matter Emission Requirements in Homogeneous Gasoline Direct Injection Engines.* **Piock W., Hoffmann G., Berndorfer A., Salemi P. and Fusshoeller B.** 2010, SAE THECNICAL PAPER.
13. *Combustion advancements in gasoline engines.* **Alkidas, Alex C.** 2007, Science Direct.
14. *Assessment of particle number limits for petrol vehicles.* **Mamakos A., Dardiotis C.** 2011, Circa Europea EU.
15. *Measures to Comply with Future Particulate Number Standards with GDI Engines.* **Dobes T., Fraidl G., Hollerer P., Kapus P., Ogris M. and Reiner M.** Viena : s.n., 2011. 32nd International Vienne Motor Symposium.
16. *Effect of EGR on Particle Emissions from GDI Engine.* **Hedge M., Weber P., Gingrich J., Alger T. and Khalek I.** 2011, SAE PAPER, págs. 1-17.
17. *Passenger Car Serial Application of a Particulate Filter System on a Common-Rail, Direct-Injection Diesel Engine.* **Salvat O, Marez P, Belot G.** 2000, SAE Technical Paper 2000-01-0473., págs. 1-15.
18. *A One-Dimensional Computational Model for Studying the Filtration and Regeneration Characteristics of a Catalyzed Wall-Flow Diesel Particulate Filter.* **Coung T. Huynh, John H. Johnson , Song L. Yang.** 2003, SAE World Congress , págs. 1-29.

19. *Particulate Matter Trapping and Oxidation on a Catalyst Membrane.* **K, Karin P. and Hanamura.** 2010, SAE , págs. 1-12.
20. *New Particulate Filter Concept to Reduce Particle Number Emissions.* **Saito C., Nakatani T., Miyairi Y., Yuuki K., Makino M., Kurachi H., Heuss W., Kuki T., Furuta Y., Kattouah.** 2011, SAE , págs. 1-12.
21. *Simultaneous Reduction of PM, HC, CO and NOx Emissions from a GDI Engine.* **Zhan R., Eakle S.T. and Weber P.** 2010, SAE, págs. 1-13.
22. *A Study about Particle Filter Application on a State-of-the-Art Homogeneous Turbocharged 2L DI Gasoline Engine.* **Dr. Ingo Mikulic, Hein Koelman, Steve Majkowski, Paul Vosejka.** 2010, Aachener Kolloquium, págs. 1-20.
23. **Cengel, Yunus A.** *Transferencia de Calor.* México : Mc Graw Hill , 2003.
24. **ANSYS.** User Guide ANSYS. [aut. libro] ANSYS 14.5. s.l. : ANSYS.
25. **CIMAV Monterrey 2014.** Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. *Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.* [En línea] 14 de Noviembre de 2014. www.cimav.edu.mx.
26. *Metal-Oxide Particles in Combustion Engine Exhaust.* **Mayer A., Ulrich A., Czerwinski J. and Mooney J.** 2010, SAE, págs. 1-22.
27. *Evaluation of PN-PEMS equipment for the type approval of light-duty vehicles in Europe.* **Francesco Riccobono, Barouch Giechaskiel, Martin Weiss, Theodoros Vlachos,.** Dusseldorf : European Commission, 2014. 3rd International Conference Advanced Emission Control Concepts for Gasoline Engines.
28. *Diesel Particulate Trap Regeneration Techniques.* **W.R. Wade, J.E. White , J.J. Florek.** Detroit , Michingan : SAE Technical Papers, 1981. 810118.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Tendencia en la regulación de partículas [4]	17
Figura 1. 2 Comportamiento de la norma euro1-2-3-4-5-6 [2]	20
Figura 1. 3. Esquema del DPF con regeneración térmica.	27
Figura 1. 4 Paredes de Flujo y Patrones de flujo a través de los substratos....	29
Figura 1. 5 MUESTRA INTERNA DE LAS CELDAS DE UN FILTRO Y DE UN CATALIZADOR. IZQ. FILTRO DER. CATALIZADOR AMBOS SUBSTRATOS CERÁMICOS.....	29
Figura 1. 6 MUESTRA INTERNA DE UN FILTRO DE PARTÍCULAS PARA DIÉSEL.	30
Figura 1. 7 MECANISMOS DE FILTRACIÓN.....	31
Figura 1. 8 Deposición por difusión.	33
Figura 1. 9 Deposición por Inercial.....	34
Figura 1. 10 Intercepción en línea de flujo.....	34
Figura 1. 11 Efecto del filtro de partículas en la composición de pm.	38
Figura 1. 12 10 Muestreo de partículas con y sin filtro [8]	41
Figura 1. 13 Proporción del CO en función de la mezcla.	44
Figura 1. 14 Proporción de NOx en función de la mezcla.....	45
Figura 1. 15 Componentes de los hidrocarburos [8]	47
Figura 1. 16 Esquema de una partícula de hollín	48
FIGURA 1. 17 SISTEMAS DE ESCAPE AUTOMOTRIZ.....	50
Figura 1. 18 Colector de gases de escape.	51
Figura 1. 19 Catalizador de una vía.....	54
Figura 1. 20 Catalizador de dos vías.....	54
FIGURA 1. 21 CATALIZADOR DE TRES VÍAS.....	56
Figura 1. 22 Silenciador.	58
Figura 1. 23 Filtro de partículas seccionado.	59
Figura 1. 24 Filtro de partículas funcionamiento.....	60

Figura 2. 1 Tipos de inyección en motor GDI [13].....	65
Figura 2. 2 Masa y Partículas sólidas durante la operación con incremento egr [16]	70
Figura 2. 3 Partículas Diésel y Componentes [17]	71
Figura 2. 4 Filtro de Partículas DPF	72
Figura 2. 5 Filtro de Partículas DPF Instalado J.M.	73
Figura 2. 6 DPF Eficiencia en filtración, poros y superficies.[19]	74
Figura 2. 7 Microscopía de las paredes de filtro dpf [19]	75
Figura 2. 8 Regeneración de Partículas a diferentes temperatura [19]	77
Figura 2. 9 Componentes internos de un filtro de partículas.	78
Figura 2. 10 Configuración por debajo del vehículo de gpf. [22]	80
Figura 2. 11 Medición de temperaturas en arranque en frío de motores gdi. [22]	81
FIGURA 2. 12 CONFIGURACIÓN GPF PEGADA AL MOTOR.....	82
Figura 2. 13 Regulaciones en emisión de partículas.....	83
FIGURA 2. 14 COMPARACIÓN DE OEM VS GPF EN EMISIONES DE CO2. [22]	85
FIGURA 3. 1 QUEMADOR MARCA AT&E	89
FIGURA 3. 2 TERMOPARES Y SENSORES DE PRESIÓN.....	90
FIGURA 3. 3 VIBRADOR LDS.....	91
FIGURA 3. 4 RECOLECTOR DE DATOS Y LECTURAS.....	92
Figura 3. 5 Cámara de inspección interna	93
FIGURA 3. 6 MOTOR VORTEC GM ,V8 , GASOLINA.....	94
Figura 4. 1 Filtro de partículas para gasolina, vista exterior.....	96
FIGURA 4. 2 PARTES INTERNAS DE FILTRO DE PARTÍCULAS.	96
FIGURA 4. 3 PARTES INTERNAS DE FILTRO DE PARTÍCULAS.	97
Figura 4. 4 Composición química del acero 409 inoxidable.....	98
Figura 4. 5 Dibujo de ensamble total de prototipo alfa, usando en exp.....	98
Figura 4. 6 Separador interno de filtro de partículas.	99

Figura 4. 7 Cono de entrada y salida del filtro de partículas.....	100
Figura 4. 8 Volúmenes internos de filtro de partículas.....	101
Figura 4. 9 Malla hibrida. Hexagonal y Tetragonal.....	102
Figura 4. 10 Mallado total de filtro de partículas.	103
Figura 4. 11 Vectores usados para calcular la calidad ortogonal de una celda. [24].....	104
Figura 4. 12 Gráfica de calidad ortogonal.....	105
Figura 4. 13 Patrones de flujo de Filtro; bajo el modelo de turbulencia K- épsilon.....	106
Figura 4. 14 Patrones de flujo de Filtro; bajo el modelo de turbulencia K- épsilon-realizable.	107
FIGURA 4. 15 PATRÓN VECTORES DE VELOCIDAD (M/S) K-ÉPSILON- REALIZABLE.	108
FIGURA 4. 16 RESULTADO CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL PASCALES K-ÉPSILON REALIZABLE.....	110
FIGURA 4. 17 CONVERTIDOR CATALÍTICO EVALUADO BAJO PROTOCOLO DE VALIDACIÓN CAÍDA DE PRESIÓN Y RESTRICCIÓN DE FLUJO.....	111
Figura 4. 18 Grafica convertidor catalítico referencia, caída de presión.	112
FIGURA 4. 19 PATRONES DE FLUJO DE FILTRO; BAJO EL MODELO DE TURBULENCIA K- OMEGA	113
Figura 4. 20 Vectores de velocidad filtro GPF, K-Omega estándar	114
Figura 4. 21 Caída de presión total – K- Omega – Pascal.....	114
FIGURA 4. 22 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO ALFA- GPF.....	115
FIGURA 4. 23 EMBUTIDO DE CONFIGURACIÓN INTERNA -FILTRO GPF... 	116
Figura 4. 24 Vista Interna - Filtro GPF.....	116
FIGURA 4. 25 PROCESO SOLDADURA DE COMPONENTES - FILTRO GPF... 	117
FIGURA 4. 26 PROTOTIPO ALFA- FILTRO GPF.....	117
Figura 4. 27 Validación de prototipo alfa – Prueba caída de presión.....	119
Figura 4. 28 Validación de prototipo alfa con flujo a 90 g/s @ 689 C.....	119
FIGURA 4. 29 GRAFICA DE PRUEBA DE VALIDACIÓN PROTOTIPO ALFA – CAÍDA DE PRESIÓN.	120

Figura 4. 30 prueba de motor – fibra directa al sistema de escape.	122
FIGURA 4. 31 CONFIGURACIÓN DE INSTALACIÓN - FIBRA DIRECTA AL SISTEMA DE ESCAPE.	123
FIGURA 4. 32 PRUEBA DE MOTOR, FILTRO DE PARTÍCULAS Y FIBRA LIMPIA.	124
FIGURA 4. 33 PRUEBA DE MOTOR, FILTRO DE PARTÍCULAS Y FIBRA LIMPIA.	124
Figura 4. 34 Microscopio Electrónico de Barrido.....	125
Figura 4. 35 Fibra Limpia a 10 micras bajo el análisis MEB.	126
FIGURA 4. 36 GRAFICA DE ELEMENTOS ENCONTRADOS EN FIBRA A 20 KeV.	127
FIGURA 4. 37 IMAGEN FIBRA SUCIA DIRECTA A 10 MICRAS. PARTÍCULAS DE CARBONO	128
Figura 4. 38 Grafica de elementos encontrados en fibra a 20 KeV.....	129
FIGURA 4. 39 IMAGEN FIBRA SUCIA CON FILTRO.	130
FIGURA 4. 40 GRAFICA DE ELEMENTOS ENCONTRADOS EN FIBRA CON FILTRO A 20 KeV.	131
FIGURA 4. 41 COMPARACIÓN DE FIBRAS USADAS EN EL EXPERIMENTO ...	132
Figura 4. 42 Comparación de fibras usadas en el experimento.....	133
Figura 4. 43 Equipo de análisis termo gravimétrico.....	134
Figura 4. 44 análisis termo gravimétrico de fibra limpia.....	135
Figura 4. 45 análisis termo gravimétrico de fibra sucia con filtro.....	136
Figura 4. 46 análisis termo gravimétrico de fibra sucia con directa.	137
Figura 4. 47 Graficas comparativas de las diferentes muestras tga.	137
Figura 4. 48 Grafica de referencia; carbón determinado por termogravimetria. Reacción de 150 C- 300 C. Robert Pasarell, Febrero 2013, Determinación de carbon TGA.....	138

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 PROPIEDADES DEL AIRE- CFD CENGEL, Y.A. 2003 TRANSFERENCIA DE CALOR, TABLA A15. [23]	86
Tabla 2 Substrato cerámico.	87
Tabla 3 Fibra Metálica.....	87
Tabla 4 Motor.....	87
Tabla 5 Parámetros calidad de malla	105
TABLA 6 PROPIEDADES DEL AIRE- CFD CENGEL, Y.A. 2003 TRANSFERENCIA DE CALOR, TABLA A15. [23]	108
Tabla 7 Substrato cerámico	109
TABLA 8 TABLA 3 FIBRA METÁLICA	109
TABLA 9 RESULTADOS CFD CAÍDA DE PRESIÓN FILTRO GPF- K-ÉPSILON REALIZABLE.	110
TABLA 10 RESULTADOS CAÍDA DE PRESIÓN, VALIDACIÓN DE PRODUCTO.	112
Tabla 11 Resultados CFD caída de presión Filtro GPF- K-Omega.....	115
Tabla 12 Parámetros de validación de prototipo alfa	118
TABLA 13 PARÁMETROS DE PRUEBA DE MOTOR	121
TABLA 14 ELEMENTOS ENCONTRADOS FIBRA LIMPIA, % DE PESO, % DE NÚMERO DE ÁTOMOS	127
Tabla 15 Elementos encontrados fibra sucia directa, % de peso, % de número de átomos.	129
TABLA 16 ELEMENTOS ENCONTRADOS FIBRA SUCIA DIRECTA, % DE PESO, % DE NÚMERO DE ÁTOMOS	131