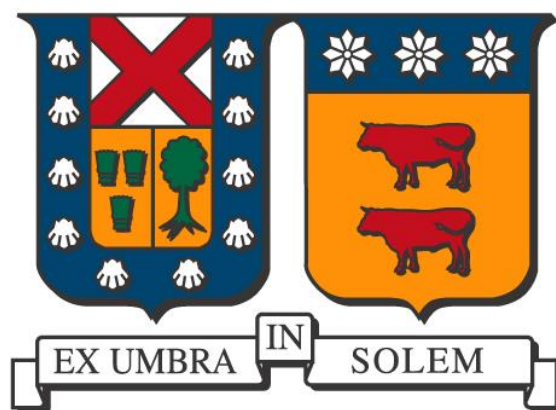


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA
DE UN SISTEMA DE MUESTREO TERMOFORÉTICO
PARA PARTÍCULAS EN EL ESCAPE DE MOTOR
DIESEL”**

JORGE ENRIQUE KURTEN JIMÉNEZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO.**

PROFESOR GUÍA:	DR. MAURICIO OSSES
PROFESOR CORREFERENTE:	DR. GERMÁN AMADOR

2019

*Mientras la promesa de
poder ser feliz exista,
la condena de morir solos
valdrá la pena...*
-Prisma.

AGRADECIMIENTOS

Comienzo agradeciendo a mi Madre y a mi Padre, sin ellos nada de mi universo existiría y gracias a sus sacrificios, esfuerzos y su incondicional amor que me han brindado he podido enfrentar los desafíos que se me han presentado en la vida y los que he salido a buscar. Agradezco toda la música que mi Padre y mi Madre me presentaron desde pequeño y que se ha convertido en la amiga más fiel en momentos de estudio, de celebración, de frustración y por qué no decir, también de dolor. También agradecer a mi Madre por estar siempre conmigo cuando la he necesitado y por apoyarme ante cualquier motivo, gracias por forjar el hombre que soy. Gracias Papá por haber existido en mi vida, pienso en ti todos los días.

Quiero agradecer también a mi Par, a la mujer que ha estado a mi lado desde el primer año de ingeniería en la UTFSM y que me ha deslumbrado y alegrado desde la primera vez que la vi. Gracias Nikky por todos estos años maravillosos, por la compañía, el amor y complicidad que tenemos. También agradezco el apoyo y el cariño de la familia de Nikky: la tía, la Kiki y el tío.

Agradezco a mi familia materna por la compañía desde siempre, el humor que me heredaron y me identifica y los buenos y malos momentos que nos han unido como nunca. Quiero agradecer a mi familia paterna por dejarme ser parte de ellos, por recibirme sin prejuicios y quererme como soy.

Doy las gracias a mis amigos y amigas, los del pasaje donde jugaba cuando pequeño, los del Instituto Nacional, los de la UTFSM y a los que se han agregado porque la vida los ha puesto a mi lado, gracias a todos ustedes por el amor y el apoyo. Una mención honrosa a Felipe y a Natalia, que juntos con Jeanne Marie hemos conversado y compartido mientras viajamos sin movernos de nuestro sitio.

Quiero también agradecer al equipo docente del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín: Profesor Ignacio, Profesor José y el Profesor Leonardo, por el apoyo en el desarrollo de mi diseño y soportarme en el laboratorio.

Finalmente quiero agradecer a Cristián Ávila que me brindó ayuda en mi diseño desde Colombia mientras él trabajaba en algo similar para su tesis de magíster.

DEDICATORIAS

Dedico este Trabajo de Título a todas las personas que me apoyaron en el camino, que de alguna forma u otra han influenciado en que tome este camino, pero sobre todo a mi Padre que ya no está en este mundo y que siempre quiso que llegara este momento. Te amo y te extraño demasiado Papá.

RESUMEN

El estudio de las propiedades morfológicas y características fisicoquímicas de las partículas de Material Particulado contribuye a conocer mejor los mecanismos de formación de este aerosol, en un motor Diésel por ejemplo, y su viaje por el tubo de escape antes de mezclarse con el aire que los seres humanos respiran. El presente Trabajo de Título tiene como objetivo diseñar, construir y poner en marcha un sistema de muestreo de partículas de Material Particulado para un motor Diésel, donde la captura de estas partículas se hace mediante la deposición termoforética en una malla gravimétrica de cobre. Así, estas partículas pueden ser estudiadas posteriormente en un Microscopio Electrónico de Transmisión y ser caracterizadas.

Este Trabajo se desarrolla en una colaboración entre la Universidad de Castilla-La Mancha en España, la Universidad de Antioquia en Colombia y la Universidad Técnica Federico Santa María en Chile, en la cual se rediseña un sistema de muestreo termoforético de partículas construido en la Universidad de Castilla-La Mancha. El objetivo en la Universidad de Antioquia es comparar diferentes métodos de muestreo de partículas de Material Particulado mientras que en Chile se busca capturar las partículas mediante el método empleado en España para luego ser caracterizadas en un microscopio de alta resolución.

El sistema de muestreo termoforético se presenta como una unidad constituida por la sonda termoforética y el sistema de entrada al tubo de escape. La sonda está compuesta por un cilindro neumático con una extensión en su vástago que porta un filtro gravimétrico para la deposición termoforética de las partículas y una electroválvula contralada por un Arduino/PLC, mientras que el sistema de entrada al tubo de escape está compuesto por una válvula de bola y conexión americana. Se presentan resultados de partículas capturadas en la Universidad de Antioquia con una sonda construida por ellos como referencia de las muestras que se pueden tomar con este sistema de muestreo termoforético de partículas Diésel.

Al final de este Trabajo de Título se presentan conclusiones sobre el estudio, caracterización y muestreo de partículas; el diseño y la selección de proveedores para la compra de los componentes del sistema de muestreo y también sugerencias para posibles futuros rediseños.

Palabras clave: Material Particulado, Termofóresis, partículas, gases de escape, sistema de muestreo de partículas.

ABSTRACT

The study of the morphological properties and physicochemical characteristics of particulate matter contributes to better understand the mechanisms of formation of this aerosol, in a Diesel engine for example, and its journey through the exhaust pipe before mixing with the air that human beings breathe. The purpose of this Thesis is to design, build and implement a particle sampling system of Particulate Matter for a Diesel engine, where the capture of these particles is done by thermophoretic deposition in a copper gravimetric mesh. Thus, these particles can be studied later in an Electronic Transmission Microscope and be characterized.

This work is developed in a collaboration between the University of Castilla-La Mancha in Spain, the University of Antioquia in Colombia and the Federico Santa María Technical University in Chile, in which a thermophoretic particle sampling system constructed at the University of Castilla-La Mancha is redesigned. The objective at the University of Antioquia is to compare different methods of particle sampling of particulate matter while in Chile it is sought to capture the particles by the method used in Spain and then be characterized in a high resolution microscope.

The thermophoretic sampling system is presented as a unit consisting of the thermophoretic probe and the exhaust system. The probe consists of a pneumatic cylinder with an extension on its stem that carries a gravimetric filter for thermophoretic deposition of the particles and a solenoid valve controlled by an Arduino / PLC, while the intake system to the exhaust pipe is composed of a ball valve and American connection. Results of particles captured at the University of Antioquia are presented with a probe constructed by them as a reference for the samples that can be taken with this thermophoretic sampling system of Diesel particles.

At the end of this Work, conclusions about the study, characterization and sampling of particles are presented; the design and selection of suppliers for the purchase of the components of the sampling system and also suggestions for possible future redesigns.

Keywords: Particulate matter, thermophoresis, particles, exhaust gases, particle sampling system.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

BC	Black Carbon
CO	Monóxido de Carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
HC	Hidrocarburos
MCI	Motor de Combustión Interna
MP	Material Particulado
MST	Termofóresis a microescala
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
PAH	Hidrocarburos Polinucleares Aromáticos
PEMS	Sistema Portable de Medición de Emisiones
PC	Computador Personal
PLC	Controlador Lógico Programable
PM ₁	Material Particulado con diámetro aerodinámico menor a 1 [µm]
PM _{2.5}	Material Particulado con diámetro aerodinámico menor a 2.5 [µm]
PM ₅	Material Particulado con diámetro aerodinámico menor a 5 [µm]
PM ₁₀	Material Particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 [µm]
PTS	Partículas Totales Suspendidas
SOF	Fracción Orgánico Soluble
VOF	Fracción Orgánica Volátil
TEM	Microscopio Electrónico de Transmisión

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIAS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
GLOSARIO DE TÉRMINOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
1. Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
1.1.1 Objetivo Principal	1
1.1.2 Objetivos Específicos	1
2. Estado del Arte	3
2.1 Material Particulado	3
2.1.1 Antecedentes Teóricos	5
2.1.2 Características Físicoquímicas del Material Particulado	9
2.2 Medición de MP en Motores Diésel.....	21
2.2.1 Medición en Laboratorio	21
2.2.2 Medición en Ruta.....	24
2.3 Termofóresis.....	26
2.3.1 Antecedentes Teóricos	26
2.3.2 Aplicaciones de la Termofóresis.....	28
3. Metodología.....	31
3.1 Antecedentes	31
3.2 Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM San Joaquín.....	32
3.2.1 Motor Diésel	32
3.2.2 Compresor.....	34
3.3 Softwares a Utilizar.....	35
3.3.1 Festo Fluid Simulation.....	35
3.3.2 Inventor Autodesk 2019.....	36
3.3.3 Arduino IDE	37

4.	Diseño del Sistema de Muestreo Termoforético	38
4.1	Introducción	38
4.1.1	Motor Diésel	39
4.1.2	Compresor.....	40
4.2	Sonda Termoforética	41
4.2.1	Introducción	41
4.2.1	Filtros Gravimétricos	41
4.2.2	Cilindro Neumático.....	42
4.2.3	Porta Filtro	44
4.2.4	Electroválvula	45
4.2.1	Pulsador	46
4.2.1	Sensor magnético de carrera	47
4.2.2	Control lógico de la sonda	47
4.2.3	Resistencia Pull-Down.....	49
4.3	Entrada al Tubo de Escape	50
4.3.1	Introducción	50
4.3.2	Válvula de Bola	51
4.3.3	Unión Americana.....	52
4.3.4	Conectores Roscados	52
4.4	Caja contenedora del sistema de muestreo.....	53
5.	Construcción y Puesta en Marcha del sistema de muestreo	55
5.1	Construcción entrada al tubo de escape	55
5.2	Construcción Sonda Termoforética.....	56
5.2.1	Porta filtro	56
5.2.2	Conexiones neumáticas y sensor magnético.....	57
5.2.3	Alimentación eléctrica	58
5.3	Construcción de la caja contenedora del sistema de muestreo.....	59
5.4	Puesta en marcha del sistema de muestreo.....	61
6.	Resultados.....	63
7.	Conclusiones.....	65
8.	Anexos	68
9.	Bibliografía.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación modal de las distribuciones de tamaños de las partículas. [8].	13
Figura 2: Distribución de los diferentes modos de formación y tamaños con sus mecanismos de formación. [7].	14
Figura 3: Penetración especificada de partículas a través de una entrada para cinco criterios diferentes de muestreo selectivo de tamaño. [7].	15
Figura 4: Posibles vías fisiopatológicas generales que relacionan la exposición a MP con la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar. [1].	16
Figura 5: Modelo conceptual de la composición de partículas, que termina en cinco grupos o fracciones distintos: sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos, carbonosos y cenizas. [7].	17
Figura 6: Dinamómetro de chasis (izq.). Autobús del Transantiago siendo testeado en el dinamómetro (der.).	22
Figura 7: Dinamómetro de motor (izq.) con su respectiva sala de control (der.). [14]	23
Figura 8: Impactador gravimétrico (izq.). Filtros gravimétricos (der.), el filtro 1 corresponde a antes de la exposición y el filtro 2 a después de la exposición.	24
Figura 9: Muestreo de partículas en vehículos llevado a cabo con PEMS.[15]	25
Figura 10: Desbalance de fuerzas en la partícula, el lado más caliente TH posee mayor energía cinética molecular que el lado frío TC. [1].	26
Figura 11: El Monolith NT.115 de la marca Biocompare permite medir cada tipo de interacción, desde la formación de grandes complejos proteicos hasta la unión de iones metálicos individuales.	29
Figura 12: Dispositivo para capturar partículas de hollín con deposición electroestática desarrollado por la Universidad de Linköping en Suecia. [20].	29
Figura 13: Vista isométrica del sistema de muestreo desarrollado en la Universidad de Toronto. [21].	30
Figura 14: Vista en planta del disco de muestreo Termoforético. [21].	31
Figura 15: Dinamómetro de motor Diésel dentro de la sala acondicionada para el funcionamiento del MCI.	33

Figura 16: Tubo de escape del dinamómetro, la flecha indica el lugar tentativo para hacer el muestreo termoforético.....	33
Figura 17: Compresor modelo Schulz CSA 6,5/30 presente en el laboratorio.	35
Figura 18: Festo FluidSim simulando un cilindro neumático de doble efecto con una válvula 5/2 y un compresor.	36
Figura 19: Un ejemplo del software de diseño Inventor Autodesk 2019 para el diseño de engranajes y ejes.....	37
Figura 20: Arduino IDE para programar el código del control de la sonda termoforética.....	38
Figura 21: Esquema básico del diseño de la sonda Termoforética.	39
Figura 22: Compresor modelo Schulz CSA 6,5/30 presente en el laboratorio.	40
Figura 23: Filtro de cobre de 3 [mm] de diámetro, al lado la punta de un fósforo como referencia.	42
Figura 24: Circuito neumático de la sonda Termoforética simulado en FESTO FluidSim. ..	43
Figura 25: Ejemplo de los datos de salida de la simulación en FESTO FluidSim para un diámetro de émbolo de 16 [mm], 6 [mm] de vástago y 200 [mm] de carrera.....	44
Figura 26: Cilindro neumático marca SMC modelo C85.....	44
Figura 27: Porta filtro que se acopla al final del vástago del cilindro.	45
Figura 28: Electroválvula Festo 5/2 utilizada para mover actuador neumático.	46
Figura 29: Pulsador eléctrico que da inicio a la entrada de la sonda al tubo de escape.	46
Figura 30: Sensor magnético de final de carrera.	47
Figura 31: Microcontrolador CONTROLLINO MINI que permite controlar señales análogas y digitales.	48
Figura 32: Representación de las entradas y salidas digitales del Controllino.....	48
Figura 33: Resistencia Pull-Down, encargada de mantener el circuito de la unidad Termoforética a voltaje cero para no alterar las señales.	49
Figura 34: Vista explosionada del sistema de entrada al tubo de escape compuesta por una válvula de bola (1), una unión americana (2) y conectores roscados para unir los componentes.	50
Figura 35: Vista del sistema de entrada ensamblado con el vástago extendido y el portfiltro ya dentro del tubo (omitido para efectos de visualizar la exposición del filtro).	51
Figura 36: Válvula de bola encargada de permitir el acceso de la sonda al tubo de escape. .	52

Figura 37: Unión americana que permite conectar la sonda con la válvula de bola.	52
Figura 38: Conector hidráulico.....	53
Figura 39: Diseño a mano de la caja que contendrá todos los elementos del sistema de muestreo de forma seccionada sin contacto entre ellos.....	54
Figura 40: Diseño en software Inventor de la parte inferior de la caja contenedora de los elementos de acero (izq.) y de la parte superior (der.) que contendrá los elementos del control de la sonda.....	54
Figura 41: Unión americana conectada a la válvula de bola unida al conector soldado al tubo de escape, todos estos componen el sistema de entrada de la sonda Termoforética.	55
Figura 42: De izquierda a derecha, cilindro-conector roscado-unión-válvula de bola.....	56
Figura 43: Porta filtro construido con acero inoxidable.	57
Figura 44: Rosca hembra M6 x 1.0 del porta filtro para conectarse al vástago del cilindro neumático.	57
Figura 45: Sección del tubo de escape (flecha) donde entra la sonda Termoforética, notar que el punto de muestreo está en altura respecto al suelo del laboratorio.	58
Figura 46: Fuente de poder variable que permite determinar la corriente que utiliza el circuito del sistema de muestreo. Notar los valores de la corriente y el voltaje, respectivamente.	58
Figura 47: Vista frontal de la parte inferior de la caja contenedora durante su construcción con cada elemento en su cavidad respectivamente.	59
Figura 48: Vista general de la caja contenedora previo a conectar sus elementos electrónicos.	60
Figura 49: Vista superior de la caja contenedora, se observa el pulsador verde, las dos conexiones neumáticas para la sonda, la conexión de la fuente eléctrica y el panel de luces del Controllino.	60
Figura 50: Vista frontal de la caja contenedora una vez conectado todo el sistema electrónico, y los elementos de acero guardados dentro.	61
Figura 51: Prueba de tiempo de exposición del filtro, notar que en el perímetro que representa el tubo de escape tiene marcado el centro geométrico donde debe posicionarse el filtro.....	62

Figura 52: Micrografía de un aglomerado de MP a 29K de aumento.	64
Figura 53: Eliminación del background de la micrografía del aglomerado para el análisis de estructuras y la diferenciación de tamaños.	64
Figura 54: Vistas del portafiltro.....	68
Figura 55: Sección transversal del portafiltro.....	69
Figura 56: Dimensiones del portafiltro diseñado y construido para el sistema de muestreo.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Contaminantes criterio, causas y efectos.[2]	4
Tabla 2: Normativas Europeas para emisiones de vehículos de pasajeros tipo Diésel a través los años, con los límites para cada contaminante. [3].	6
Tabla 3: Porcentaje de las fracciones para un motor Diésel. [8].	20
Tabla 4: Características del motor Diésel del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.	34
Tabla 5: Características del compresor del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.	34
Tabla 4: Características del motor Diésel del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.	39
Tabla 5: Características del compresor del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.	40
Tabla 6: Parámetros entregados para simular circuito neumático (izq.), y los datos obtenidos a partir de esta simulación para la misma carrera de 200 [mm].	43
Tabla 7: Parámetros elegidos para el actuador a partir de las simulaciones.....	44
Tabla 8: Relación entre tiempo escrito en el código y el tiempo real de exposición del filtro a una presión de 6 [bar].	62
Tabla 9: Detalle de los costos de los elementos constituyentes del sistema de muestreo.	68

1. Introducción

1.1 Motivación

Este Trabajo de Título se realiza en el marco de una colaboración entre la Universidad de Castilla-La Mancha en España, la Universidad de Antioquia de Colombia y la Universidad Técnica Federico Santa María, bajo la dirección del Dr. Mauricio Osses y la ayuda de los docentes del Laboratorio Termo-Hidráulico de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín para la construcción y la puesta en marcha de un sistema de muestreo que sirva para estudiar, analizar y caracterizar las partículas de los gases de escape de un motor Diésel.

La idea surge como la continuación de una línea investigativa de la Universidad de Castilla-La Mancha en el estudio de los mecanismos de formación de las partículas Diésel en la combustión del motor de un automóvil y cómo mejorar el proceso de combustión para reducir el nivel de contaminantes atmosféricos que afectan al medio ambiente y la salud de la humanidad.

También resulta atractiva la idea de realizar un proyecto que permanezca en la universidad y contribuya al desarrollo académico de los futuros estudiantes de ingeniería de la UTFSM y a la mejora de la calidad del aire de nuestro ambiente.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal

El objetivo principal de este Trabajo de Título es el diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema de muestreo termoforético de partículas de los gases de escape del motor Diésel perteneciente al Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM del Campus Santiago San Joaquín.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo principal se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar la composición de los contaminantes producidos por fuentes móviles, específicamente las emisiones vehiculares, poniendo énfasis en las propiedades

fisicoquímicas del material particulado (MP), la formación, muestreo y posterior medición en motores de combustión interna (MCI) de este aerosol y su relación con la mortalidad y la morbilidad en las poblaciones.

2. Estudiar el fenómeno de Termofóresis y la presencia de la fuerza Termoforética en las partículas de los aerosoles al estar bajo un gradiente de temperatura y cómo este fenómeno es utilizado en la actualidad para la medición de las concentraciones de gases y estudios morfológicos de partículas.
3. Diseñar método de funcionamiento del sistema de muestreo para la colección de muestras de partículas en el tubo de escape según las condiciones de operación del motor Diésel.
4. Comprar los componentes neumáticos y electrónicos que son necesario para el correcto funcionamiento del sistema de muestreo.
5. Diseñar y construir componentes de acero y acrílico de acuerdo al método de funcionamiento del sistema de muestreo.
6. Tomar muestras de partículas a diferentes condiciones del motor Diésel.

2. Estado del Arte

2.1 Material Particulado

El aumento de zonas urbanas y sectores industrializados acompañado de un incremento del número de vehículos y, por ende, también de consumo de combustibles fósiles, son algunas de las principales razones de los altos niveles de partículas contaminantes en la atmósfera. De tal forma que se ha vuelto una problemática moderna debido a la estrecha relación de estos contaminantes con el aumento en las tasas de enfermedades cardiorrespiratorias y muertes prematuras, tanto en niños como en adultos [1].

Una distinción importante es entre partículas atmosféricas primarias y secundarias. Las partículas primarias son aquellas emitidas directamente de una fuente y por lo tanto incluyen partículas que surgen directamente de fuentes de combustión, como en motores de vehículos y centrales térmicas, así como las generadas por procesos mecánicos, por ejemplo, extracción de minerales y procesos agrícolas. Las partículas secundarias no se emiten directamente de las fuentes, ya sean naturales o antropogénicas (por la acción del hombre). Por el contrario, se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas que conducen a la formación de sustancias de baja volatilidad, que en consecuencia se condensan en la fase sólida o líquida, convirtiéndose en lo que se conoce como material particulado (MP). Dichas partículas generalmente resultan de procesos de oxidación atmosférica y las sustancias oxidadas pueden ser de origen natural o antropogénico, por ejemplo, el ozono troposférico que pertenece a una familia de productos altamente reactivos llamados oxidantes fotoquímicos que se forman a partir de compuestos orgánicos volátiles (COV) tales como benceno, aguarrás, tolueno, acetona, etc. y óxidos de nitrógeno (NO_x), en una reacción que requiere radiación solar.

En la **Error! Reference source not found.** se muestran los contaminantes urbanos más comunes denominados Contaminantes Criterios por ser perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos, producto de esto se han establecido niveles permisibles para proteger la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población:

Tabla 1: Contaminantes criterio, causas y efectos.[2]

Contaminante	Fuentes	Daños en salud y otros	Características
Óxidos de azufre (SOx)	Combustión de azufre contenido en combustibles fósiles; refinamiento de petróleo, fundición de metal, fabricación de papel.	Agudiza problemas de enfermos bronquiales al ser inhalado con material particulado	Gas incoloro, pesado, soluble en agua con olor fuerte e irritante
PM10, PM2.5 (primarios)	Muchas fuentes: polvo de calles levantado por tráfico, procesos de combustión, motores Diesel, procesos industriales, incendios forestales, quema de biomasa construcción.	Irritación membranas mucosas, Aumento dificultades respiratorias, propiedades carcinógenas	Partículas sólidas o pequeñas gotas incluyendo humo, polvo y aerosoles
PM10, PM2.5 (secundario)	Reacción química de precursores como SO2, NO2 y NH3, condensación de productos de combustión	Similares al anterior; más agudos debido a mayor poder de penetración y acidez.	Partículas sólidas muy finas
Óxidos de nitrógeno (NOx)	Combinación de nitrógeno y oxígeno atmosférico a altas temperaturas de combustión (motores y fuentes industriales); subproducto de la fabricación de fertilizantes, degradación de materia orgánica.	Irritación Pulmonar, Aumento susceptibilidad a virus	Gas café rojizo, relativamente soluble en agua
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Vehículos motorizados - evaporación de tanques de combustibles, carburadores; lavasecos, fugas de gas, procesos industriales, domésticos y de construcción que involucran solventes.	Irritación ocular y nasal, intoxicación, daño hepático y propiedades carcinógenas	Muchos y variados compuestos de hidrógeno y carbón
Monóxido de Carbono (CO)	Combustión incompleta del carbono en combustibles (carbón, leña, petróleo, gas, gasolina) en fuentes industriales, residenciales y móviles.	Bloquea la hemoglobina, especialmente dañino para personas anémicas o con problemas pulmonares o cardiovasculares	Gas tóxico incoloro e inodoro, ligeramente soluble en agua

Contaminante	Fuentes	Daños en salud y otros	Características
Ozono (O ₃)	Producido por complejas reacciones fotoquímicas en la atmósfera, involucrando hidrocarburos, dióxido nitroso y luz solar	Irritación ocular y nasal y agravamiento de problemas respiratorios	Gas azul pálido, apenas soluble en agua, inestable, de olor dulzón
Plomo (Pb)	Combustión de gasolina con plomo, soldadura, pintura con plomo, operaciones de fundición de plomo	Tóxico para niños y personas mayores, afecta sistemas circulatorio, reproductivo y nervioso	Metal existente en una variedad de compuestos

Se denomina material particulado (MP) al conjunto de aerosoles urbanos de origen humano y natural, de hecho, es uno de los más estudiados debido a sus dañinos efectos a la salud, llegando a ser el contaminante que más significativamente ha sido asociado a muertes en adultos y niños como también enfermedades en la población [1], esto porque no se encuentra en forma individual sino, por el contrario, como una mezcla de diferentes elementos que provocan, por ende, diferentes reacciones.

Las partículas de aerosol en la atmósfera tienen formas ampliamente variables. El tamaño de partícula es uno de los parámetros más importantes para describir el comportamiento de los aerosoles, afectando sus propiedades biológicas, físicas y de por vida. La distribución de partículas de aerosol generalmente se define por su número, superficie o volumen.

2.1.1 Antecedentes Teóricos

Los procesos que implican combustión en industrias, calefacción de residencias, o automóviles principalmente, generan contaminantes como dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre entre otros, que actúan como principales mecanismos de contaminación atmosférica.

Debido a la evidenciada relación de las partículas ultra finas (diámetro menor a 0.1 [µm]) con varios problemas de salud y lo abundante que son cercanas a carreteras, específicamente en áreas urbanas, las partículas producidas por motores Diésel se han convertido en un área de preocupación a través de los años, publicándose varios estudios toxicológicos y

epidemiológicos que comprueban la relación entre estas partículas y efectos severos a la salud, entre los que se destacan la penetración a membranas celulares, entrar al torrente sanguíneo y llegar al cerebro. [1] Ante esto, se ha llevado a cabo grandes esfuerzos para reducir las emisiones vehiculares, convirtiendo las regulaciones de tránsito cada año más estrictas. Un ejemplo de estos esfuerzos son las Normas Europeas de Emisiones, las que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna de los vehículos nuevos vendidos en los estados miembros de la Unión Europea. Estas normas son aplicadas para vehículos livianos (automóviles), pesados (camiones), maquinaria no vial (tractores), locomotoras de ferrocarril (trenes), motores marinos Diésel. Los límites de monóxido de carbono (CO) son más estrictos para los motores Diésel que para los motores de ciclo Otto (gasolina), sin embargo, se les permite más emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx). No sólo existen estas Normas Europeas de Emisiones, también existen las Normas Federales de Estados Unidos establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.¹, normas asiáticas provenientes de: China, Corea del Sur, Japón, entre varias. La **Error! Reference source not found.** muestra los límites permitidos de cada norma europea para las emisiones contaminantes de un motor liviano tipo Diésel.

Tabla 2: Normativas Europeas para emisiones de vehículos de pasajeros tipo Diésel a través los años, con los límites para cada contaminante. [3].

Norma	Año de Implementación	CO [g/Km]	HC + NOx [g/Km]	MP [g/Km]	NOx [g/Km]	N° Partículas [# /Km]
EURO 1	01-06-1992	2,72	0.97	0.14	-	-
EURO 2	01-01-1996	1,00	0.70	0.08	-	-
EURO 3	01-01-2000	0,66	0.56	0.05	0.50	-
EURO 4	01-01-2005	0,50	0.30	0.03	0.25	-
EURO 5a	01-09-2009	0.50	0.23	0.01	0.18	-
EURO 5b	01-09-2011	0.50	0.23	0.01	0.18	6,0 x 10 ¹¹
EURO 6	01-09-2014	0.50	0.17	0.00	0.08	6,0 x 10 ¹¹

Para obtener las diferentes características de las partículas presentes en las emisiones de un motor (número de partículas, tamaño, componentes, entre otros) existen diferentes métodos de muestreo y análisis, tanto en ruta, como en laboratorio. En la actualidad existen instrumentos que permiten medir en tiempo real durante la conducción del vehículo la cantidad de masas emitida de MP y el número de partículas, denominados PEMS². El método

¹ EPA, Environmental Protection Agency.

² Portable Emissions Measurement System, Sistema Portable de Medición de Emisiones.

de obtención y posterior medición de propiedades de los gases de escape en un laboratorio debe emular las condiciones en las que opera un MCI en la realidad, para esto se utiliza un banco de motor para pruebas, en algunos casos un túnel de dilución para homogenizar la muestra y dependiendo de la propiedad que se busca medir (masa, número de partículas, distribución de tamaños, entre otros), se pueden necesitar otros dispositivos diferentes.

En todos los métodos las partículas pueden perderse durante su viaje por el sistema de extracción y/o muestreo, esto puede deberse a diferentes procesos involucrados de partícula a partícula que conducen a estas pérdidas: Termofóresis, Difusión, Coagulación, Impacto Inercial, Deposición Electroestática o Reacciones Químicas, las que se describen a continuación:

- **Termofóresis:** Movimiento de partículas producido por un gradiente de temperatura, si bien las fuerzas asimétricas resultantes del gradiente son débiles, la movilidad de las partículas Diésel es lo suficientemente alta para que este proceso sea relevante. La importancia de la Termofóresis aumenta para los sistemas con líneas de extracción y muestreo con paredes frías que promueven la deposición Termoforética. La deposición de partículas de hollín en el cilindro y las paredes del tubo de escape y las líneas de muestreo se ha atribuido a un proceso Termoforético. Las fuerzas Termoforéticas hacen que el hollín forme una capa en las paredes frías del cilindro, por ejemplo. Las altas velocidades durante la salida de los gases causan altos esfuerzos de corte que quitan el hollín de las paredes. Este hollín depositado en las paredes de tubo de escape es impredecible y puede representar hasta un 20-45% de la masa de hollín medida. [4].
- **Difusión:** La difusión de partículas puede ocurrir tanto por el movimiento aleatorio que se observa en las partículas que se hallan en un fluido como resultado de choques contra las moléculas de dicho fluido denominado ‘movimiento browniano’, como por el movimiento de partículas hacia un gradiente de concentración de partículas. Las capas límites de las paredes del sistema de muestreo juegan un papel importante, pues las partículas pueden perderse por difusión a través de estas, siendo más rápida en flujos altamente turbulentos que tienen capas límite delgadas y, en consecuencia, altos coeficientes de transferencia de masa. El coeficiente de difusión de una partícula varía

inversamente con el tamaño de partícula, y las partículas más pequeñas se difunden más rápidamente que las partículas más grandes. [5].

- **Coagulación:** La coagulación es el proceso de aglomeración de partículas a colisiones de partículas. Las partículas pequeñas pueden crecer por colisionar con partículas más grandes o entre sí. La coagulación cambia el tamaño de las partículas, pero no cambia la concentración total de masa de partículas. Por lo tanto, no influirá directamente en los resultados de las pruebas de certificación que miden la producción de partículas en masa de los motores Diésel, como por ejemplo la norma EURO 6. Sin embargo, es importante para comprender los mecanismos de formación de partículas tener en cuenta el proceso de coagulación, puesto que, al cambiar el tamaño de partícula la coagulación influye indirectamente en los mecanismos de pérdida que dependen del tamaño.
- **Impacto Inercial:** Este proceso surge de la incapacidad de las partículas para seguir las líneas de corriente del flujo del fluido como resultado de su inercia. Las partículas de un flujo pueden perderse en las paredes del sistema de muestreo o por impacto inercial. Las partículas que se depositan a través de las paredes del sistema de muestreo debido a impacto inercial también se pueden volver a introducir en la corriente de escape de una manera impredecible, conduciendo a una importante variabilidad de la medición de la masa, la importancia de estos efectos depende del diámetro de la partícula y generalmente es pequeña para las partículas en el rango de diámetro submicrométrico característico de las partículas de Diésel. Sin embargo, para las partículas más grandes, incluso una pequeña pérdida por impacto inercial puede representar una pérdida relativamente grande en la masa de partículas.
- **Deposición Electroestática:** Las partículas Diésel se cargan naturalmente como resultado del proceso de combustión, por ende la deposición electrostática puede ocurrir en sistemas de muestreo donde las líneas de transferencia de muestra están hechas de un material que puede cargarse eléctricamente, conduciendo una porción de

las partículas de Diésel cargadas a las paredes donde son eliminadas de la corriente de gas.[6].

La movilidad eléctrica de las partículas cargadas crece al aumentar el diámetro de las partículas, por lo tanto, es más probable que las partículas más grandes experimenten pérdidas electrostáticas en una línea de transporte. Por otro lado, las partículas pequeñas en el escape tienen las velocidades más altas y es menos probable que lleven carga, por lo tanto, es menos probable que experimenten pérdida electrostática en una línea de transporte de aerosol.

- **Reacción Química:** Las partículas Diésel pueden sufrir una compleja variedad de reacciones fotoquímicas atmosféricas que escapan del fin de este Trabajo de Título. En este proceso pueden generarse contaminantes secundarios con diferentes propiedades fisicoquímicas que las partículas iniciales, alterando los resultados de muestreo.

La importancia de estudiar las partículas de MP y restringir su emisión a la atmósfera radica en la relación de este aerosol con enfermedades cardiorrespiratorias en humanos y la actual creciente contaminación atmosférica en ciudades con altas emisiones vehiculares.

Durante su viaje por el tubo de escape, las partículas de los gases de la combustión de un motor Diésel cambian sus propiedades morfológicas producto de la interacción con su medio (termofóresis, deposición electrostática), con las demás partículas (impacto inercial, reacción química) o ambas (difusión, coagulación), todos estos ejemplos son conocidos como ‘procesos de partícula a partícula’ y deben ser considerados al momento de diseñar un sistema de muestreo de estas partículas.

2.1.2 Características Fisicoquímicas del Material Particulado

Las partículas en la atmósfera provienen de diferentes fuentes y poseen un rango de propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas. Están compuestas por iones orgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y compuestos cristalinos. Los procesos de formación incluyen nucleación de partículas de gases a bajas presiones de vapor emitidos por alguna fuente o formados por reacciones químicas,

condensación de gases a bajas presión en partículas existentes y coagulación de partículas. Una partícula proveniente de alguna fuente emisora es una mezcla de compuestos químicos y a la vez, partículas de diferentes fuentes pueden coagular y formar partículas nuevas, de esta manera, se puede tratar a las partículas atmosféricas como una mezcla de mezclas. El término real para definir partículas líquidas y/o sólidas suspendidas en el aire es *aerosol*, esta definición incluye tanto las partículas como todos los componentes del aire en fase de vapor o gas. [7].

Dentro de los diversos contaminantes urbanos, uno de los más dañinos para la salud, y, por ende, uno de los más estudiados es el Material Particulado (MP). El MP está compuesto por una mezcla de diferentes compuestos en forma de partículas en suspensión y de acuerdo con su composición y/o tamaño tienen diferentes efectos en la salud de las personas. Se utiliza como parámetros de referencia el tamaño de partícula, como se menciona en la Tabla 1.

Una descripción completa para el Material Particulado debe incluir un recuento de su composición química, la morfología y el tamaño de cada partícula, así como la abundancia relativa de cada tipo de partícula en función del tamaño de partícula, sin embargo, las características físicas y químicas de las partículas generalmente se miden por separado.

El diámetro de una partícula esférica puede determinarse mediante microscopía óptica o electrónica, por su índice de refracción y absorción de la luz (teoría de Gustav Mie), por su movilidad eléctrica o por su comportamiento aerodinámico. Sin embargo, las partículas atmosféricas no son perfectamente esféricas. Los diámetros de las partículas se describen utilizando un diámetro *equivalente*, es decir, el diámetro de una esfera que tendría el mismo comportamiento físico que la partícula. La difusión y la sedimentación gravitacional son comportamientos físicos importantes para el transporte de partículas, la recolección y los procesos de eliminación (incluyendo la deposición en el tracto respiratorio humano). Se usan diferentes diámetros equivalentes según el proceso que sea más importante. Por ejemplo, para partículas más pequeñas, la difusión es más importante y el diámetro de Stokes D_p se usa a menudo. Para partículas más grandes, el ajuste gravitacional es más importante y el diámetro aerodinámico D_a se usa más [8].

El diámetro de Stokes, D_p , se usa en distribuciones de tamaño basadas en la dispersión de luz y el análisis de movilidad. Describe el diámetro de una esfera con la misma resistencia aerodinámica que la partícula sometida a flujo laminar en un fluido de la misma densidad y viscosidad). Para una partícula lisa con forma esférica, D_p es exactamente igual al diámetro físico de la partícula. Para partículas con forma irregular, D_p es el diámetro de una esfera equivalente que tendría la misma resistencia aerodinámica. El diámetro de Stokes es independiente de la densidad.

Por su parte, el diámetro aerodinámico, D_a sí depende de la densidad de la partícula. Se define como el diámetro de una partícula esférica con la misma velocidad de sedimentación gravitacional, pero con una densidad de material de $1 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Los impactadores en cascada separan partículas en función de su diámetro aerodinámico, y los medidores de partículas aerodinámicos miden el diámetro aerodinámico. El muestreo respirable, torácico e inhalable y el muestreo $PM_{2.5}$ y PM_{10} (ver **Error! Reference source not found.**) se basan en el diámetro aerodinámico de la partícula.

En la ciencia de los aerosoles se usan varios enfoques diferentes en la clasificación de partículas por tamaño [7]. Estos incluyen:

- i. Modos; basados en las distribuciones de tamaño observadas y los mecanismos de formación.
- ii. Tamaños de dosimetría o salud ocupacional, basados en la entrada a varios compartimentos del sistema respiratorio.

La primera clasificación modal con sus mecanismos de formación se muestra en la Figura 2. Esta clasificación se hizo por primera vez en 1978 por Kenneth T. Whitby [9] y presentaba sólo 3 modos (modo grueso, modo acumulación y modo Aitken o modo nucleí), sin embargo, el avance tecnológico conlleva a instrumentos de medición con una mayor resolución logrando caracterizar partículas con diámetros menores a $0,01 \text{ [}\mu\text{m]}$ (modo nucleación) como se muestra en la Figura 3.

A continuación, se presentan la clasificación de partículas por tamaño:

- **Modo de nucleación:** Partículas recién formadas con diámetros inferiores a $0,01 \text{ [}\mu\text{m]}$ aproximadamente y se les denomina comúnmente como nanopartículas. Las partículas

del modo de nucleación son oscuras, aunque esto no es con total seguridad. Históricamente estas partículas han sido menos estudiadas, de hecho, antes de mediados de la década de 1990, no se sabía nada sobre ellas, y esto es comprensible, ya que se encuentran al límite de la detección de muchos instrumentos. La mayoría, pero no todas las investigaciones sugieren que las partículas de modo de nucleación consisten en material volátil.

- **Modo Aitken:** Partículas un poco más grandes con diámetros aproximados entre 0,01 y 0,1 μm . En este modo las partículas pueden resultar del crecimiento de partículas más pequeñas o de la nucleación a partir de concentraciones más altas de precursores.
- **Modo de acumulación:** Partículas con diámetros entre 0,15 y 0,5 μm . La característica más obvia de las partículas de modo de acumulación es que consisten en una colección de partículas "primarias" mucho más pequeñas. Estas partículas primarias a veces se denominan esférulas, aunque no son exactamente esféricas, se aproximan bastante cerca a la esfericidad. El rango de tamaño para esférulas es aproximadamente entre 0,02 y 0,05 μm . Las partículas del modo de acumulación varían en tamaño porque varía el número de esférulas, no porque varían el tamaño de estas. Este ensamblaje de esférulas, que forma el esqueleto o columna vertebral de una partícula en modo acumulación, se denomina *aglomerado*. El número de esférulas que pueden combinarse parece no estar sujeto a ninguna ley natural: oscila entre decenas, entre cientos y miles. Tampoco hay una morfología claramente definida: se presentan en complejas cadenas entrelazadas.
- **Partículas finas:** Las partículas finas incluyen nucleación, Aitken y modos de acumulación, es decir, partículas del tamaño medible más bajo, actualmente de aproximadamente 3 nm , justo por encima del mínimo en la distribución de masa o volumen que de manera general ocurre entre 1 y 3 μm .
- **Modo grueso o partículas gruesas:** Partículas con diámetros entre a 5 – 30 μm . Las partículas de modo grueso son de naturaleza variable, de hecho, no se emiten directamente como tal, sino que se forman a partir de los otros dos modos. Estos predecesores se alojan en algunos lugares dentro del sistema de escape del vehículo, se

unen unos a otros y luego vuelven a entrar en la corriente de escape como partículas compuestas más grandes.

- **Partículas ultrafinas:** Las partículas ultra finas no son consideradas como un modo propiamente tal. Incluyen el modo de nucleación y gran parte del modo Aitken. También se pueden definir como partículas cuyas propiedades difieren de las del material a granel debido a su pequeño tamaño.

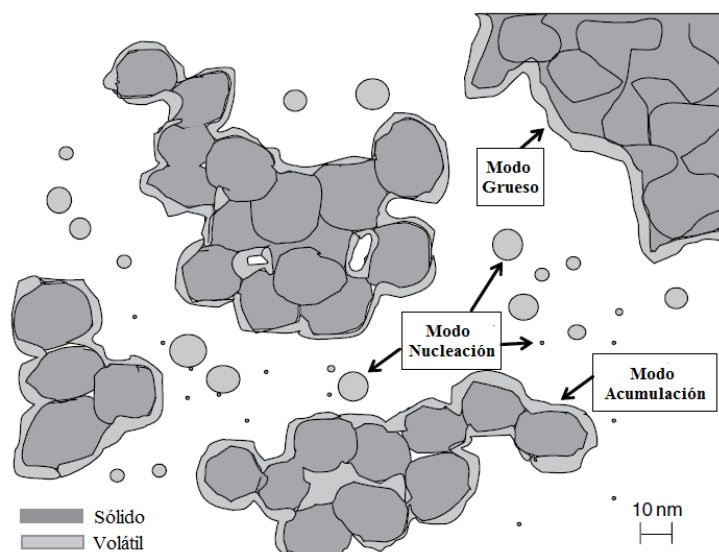


Figura 1: Clasificación modal de las distribuciones de tamaños de las partículas. [8].

Los modos se definen principalmente en términos de sus mecanismos de formación, pero también difieren en las fuentes, la composición, el transporte y el destino, así como en el tamaño. El modo de nucleación se aplica a las partículas recién formadas que han tenido pocas posibilidades de crecer por condensación o coagulación (dos partículas se combinan para formar una). Las partículas del modo Aitken también son partículas recientemente formadas que aún están activamente sometidas a coagulación. Sin embargo, debido a concentraciones más altas de precursores o más tiempo para la condensación y la coagulación, las partículas de Aitken han crecido a tamaños más grandes.

Las partículas finas crecen por coagulación o por condensación (moléculas de gas a presión de vapor de bajo equilibrio que se condensan en una partícula). La velocidad de crecimiento por coagulación y condensación disminuye a medida que aumenta el tamaño de partícula, y las partículas se acumulan en el rango de tamaño del modo de acumulación. Por lo tanto, las partículas del modo de acumulación normalmente no crecen en el rango de tamaño de

partícula grueso. Las partículas finas se forman principalmente por combustión o reacciones químicas de gases que producen productos con bajas presiones de vapor saturado. Las partículas finas están compuestas de metales (y óxidos metálicos), carbono negro o elemental, compuestos orgánicos primarios y secundarios, e iones de sulfato, nitrato, amonio e hidrógeno. El modo grueso se refiere a las partículas formadas por la descomposición mecánica de los minerales, el material de la corteza y los desechos orgánicos. Además de minerales primarios y material orgánico, el modo grueso puede incluir sal marina. El modo de acumulación y el modo grueso se superponen en la región entre 1 y 3 μm [10] (y ocasionalmente en un rango incluso mayor). En esta región, la composición química de las partículas individuales generalmente, pero no siempre, permite la identificación de una fuente o mecanismo de formación, permitiendo la identificación de una partícula como perteneciente a la acumulación o al modo grueso.

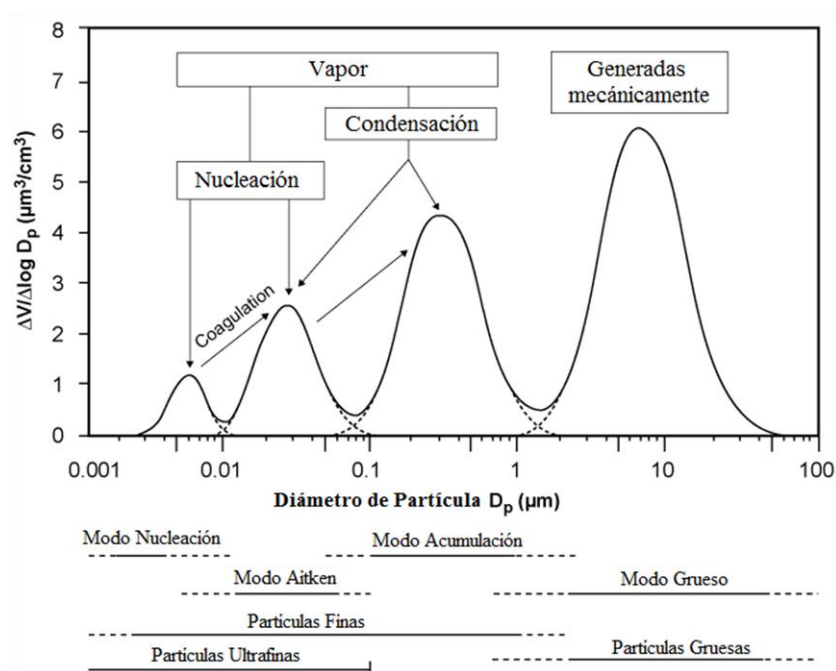


Figura 2: Distribución de los diferentes modos de formación y tamaños con sus mecanismos de formación. [7].

La comunidad de salud ocupacional ha definido las fracciones de tamaño en términos de su ingreso a varias cavidades del sistema respiratorio. Esta convención clasifica las partículas en partículas inhalables, torácicas y respirables según su tamaño. Las partículas inhalables ingresan al tracto respiratorio, comenzando por las vías respiratorias superiores (fosas nasales,

boca, faringe y laringe). Las partículas torácicas viajan más allá de la laringe y alcanzan las vías respiratorias del pulmón y las regiones de intercambio de gases del pulmón. Las partículas respirables son un subconjunto de partículas torácicas que tienen más probabilidades de alcanzar la región de intercambio de gases del pulmón. Las curvas que definen el material particulado inhalable (IPM³, en inglés), torácico (TPM⁴, en inglés) y respirable (RPM⁵, en inglés) se muestran en la Figura 3.

De acuerdo con esta categoría, el material particulado se clasifica en:

- i. PM₁₀ : Partículas con diámetro aerodinámico menor de 10 [μm].
- ii. PM_{2.5} : Partículas con diámetro aerodinámico menor de 2.5 [μm].
- iii. PM₁ : Partículas con diámetro aerodinámico menor de 1 [μm].

A continuación, en la Figura 3 se presenta una cuantificación de la penetración de las partículas de acuerdo con la clasificación anterior:

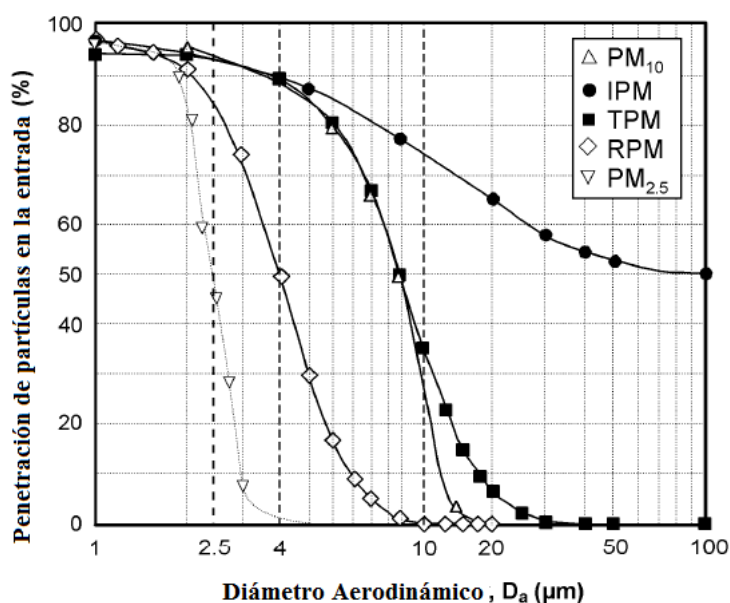


Figura 3: Penetración especificada de partículas a través de una entrada para cinco criterios diferentes de muestreo selectivo de tamaño. [7].

La política de salud pública, en términos de establecer directrices o estándares para niveles aceptables de contaminación ambiental por PM, se ha centrado principalmente en los

³ Inhalable Particulate Matter.

⁴ Thoracic Particulate Matter.

⁵ Respirable Particulate Matter.

indicadores de partículas finas ($PM_{2.5}$), partículas inhalables o torácicas (PM_{10}) y partículas gruesas torácicas ($PM_{10-2.5}$). Con respecto a $PM_{2.5}$, varias consideraciones toxicológicas y fisiológicas sugieren que las partículas finas pueden jugar el papel más importante en la salud humana. Por ejemplo, pueden ser más tóxicos porque incluyen sulfatos, nitratos, ácidos, metales y partículas con diversos productos químicos adsorbidos en sus superficies. Además, en relación con las partículas más grandes, las partículas indicadas por $PM_{2.5}$ pueden respirarse más profundamente en los pulmones, permanecer suspendidas por períodos de tiempo más largos, penetrar más fácilmente en ambientes interiores, y se transportan a distancias mucho más largas. Las partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a un punto de corte de 10 [μm] incluyen a las denominadas partículas finas y un subconjunto de partículas gruesas, y son denominadas como PM_{10} , también es un indicador de partículas inhalables que pueden penetrar en la región torácica del pulmón. La fracción gruesa definida como la diferencia entre las concentraciones en masa de PM_{10} y $PM_{2.5}$ es denominada como $PM_{10-2.5}$ y sirve como un indicador para partículas gruesas torácicas.

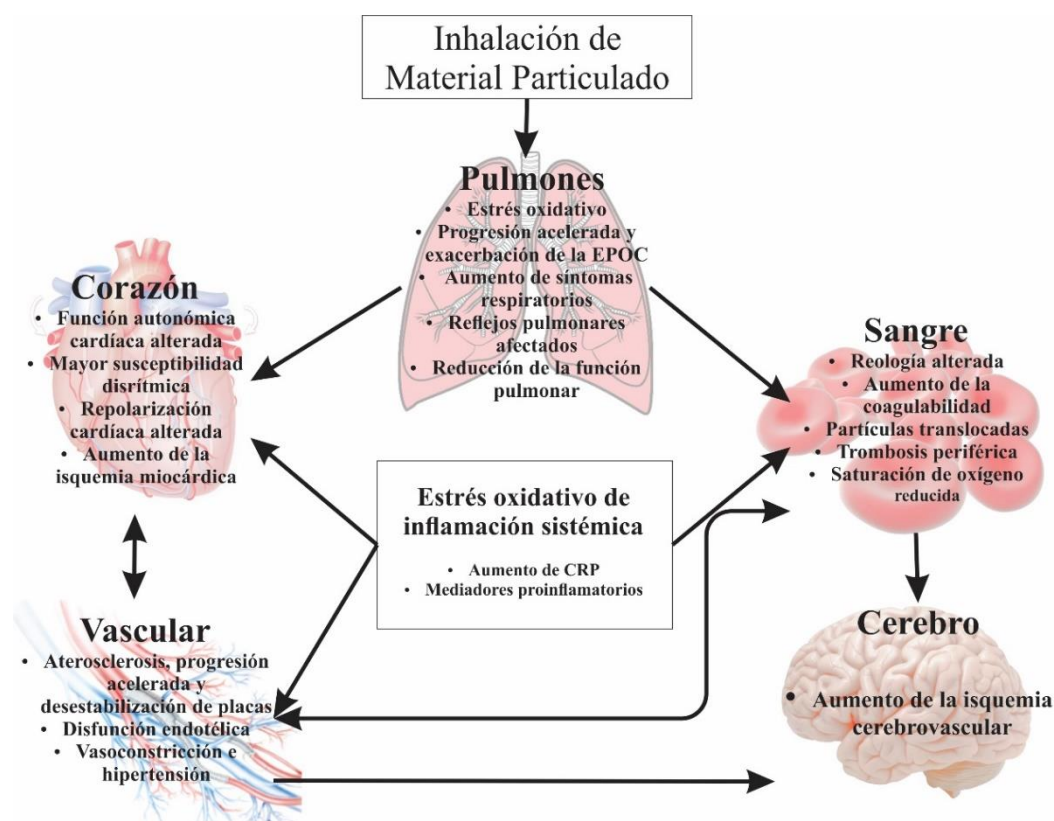


Figura 4: Posibles vías fisiopatológicas generales que relacionan la exposición a MP con la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar. [1].

La composición química del MP se puede definir de acuerdo con el modelo conceptual de cuatro niveles representado en la Figura 5. En el primer nivel, se incluye todo lo que puede capturarse cuando el gas de escape pasa a través de un filtro, con la única excepción de agua condensada; esta es la definición legislativa de 'partículas'.

Si el material es sometido a un aumento de temperatura, pueden ocurrir dos situaciones, parte del material se evapora y otra no, o bien que el material o una fracción de él se disuelva en solventes. Esto divide las partículas en lo que es volátil o soluble, y lo que es no volátil o insoluble. A partir de lo anterior, hay cinco subgrupos claros, o fracciones: sulfatos, nitratos, carbonosos, orgánicos y ceniza. La composición química de las partículas mostrada en la Figura 5 tiene una representación física como la planteada en la Figura 1. Sin embargo, las cinco fracciones que se observan en la Figura 5 se definen principalmente de acuerdo con los métodos analíticos, procedimientos de laboratorio y protocolos de prueba utilizados en su separación y cuantificación, en lugar de a través de cualquier correspondencia directa con las características presentadas en la Figura 1.

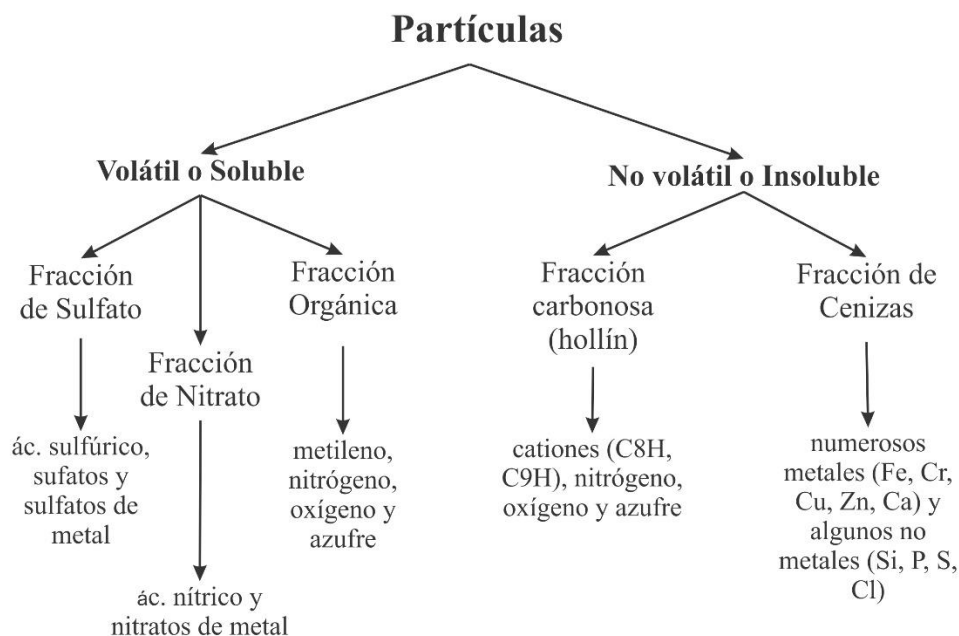


Figura 5: Modelo conceptual de la composición de partículas, que termina en cinco grupos o fracciones distintos: sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos, carbonosos y cenizas. [7].

Partículas Volátiles o Solubles

Fracción orgánica

Si se analiza por extracción o disolución en un solvente orgánico, esta es la fracción orgánica soluble (SOF⁶, en inglés); y si se analiza mediante calentamiento o volatilización, esta es la fracción orgánica volátil (VOF⁷, en inglés). La masa de SOF suele ser bastante cercana a la masa de VOF. El contingente orgánico es sin duda la más compleja de las cinco fracciones, ya que puede llegar a contener hasta miles de compuestos, muchos de los cuales se encuentran en el umbral de detección. La mayoría de las principales familias químicas están representadas, aunque sus proporciones varían ampliamente: alquenos, alcanos, alcoholes, ésteres, cetonas, ácidos, ésteres y aromáticos.

La fracción de SOF se encuentra contenida en muchos de los hidrocarburos polinucleares aromáticos (PAH⁸, en inglés), que son emitidos principalmente en los gases de escape del

⁶ Soluble Organic Fraction.

⁷ Volatile Organic Fraction.

⁸ Polycyclic aromatic hydrocarbons.

motor Diésel. PAH's son hidrocarburos aromáticos con dos o más anillos de benceno unidos, y tienden a formar clústeres. Los PAH's tienen efectos mutagénicos y, en algunos casos, características cancerígenas.

La proporción de SOF en el total de MP puede ser significativo entre motores. Las partículas con bajo contenido de SOF, son llamadas partículas secas. Cuando el MP tiene alto contenidos de SOF, estos se llaman partículas húmedas. Los SOF se encuentran típicamente compuestos de aceites lubricantes derivados de hidrocarburos, con una pequeña contribución de alta temperatura final del Diésel e hidrocarburos del combustible. [11].

Fracción de sulfato

Esta fracción se refiere a los sulfatos solubles en agua, o al ion SO_4^{2-} , pero el componente principal es el ácido sulfúrico, H_2SO_4 . Una propiedad distintiva del ácido sulfúrico, sin embargo, es su asociación entusiasta con el agua. El contenido de agua de las partículas a menudo varía sólo con el contenido de sulfato. Debido a que las partículas se unen con el agua, éstas se encuentran entonces predominantemente con el ácido sulfúrico. Así, lo que realmente significa 'sulfatos' es el ácido y el agua. Esta extensión tiene ramificaciones importantes, porque la masa de agua es, en primer lugar, no despreciable; y en segundo, es variable dependiendo de la humedad en el entorno inmediato del filtro. Por lo tanto, antes de la evaluación gravimétrica, los filtros deben acondicionarse (equilibrarse) durante un cierto período de tiempo en un entorno estrechamente definido; de lo contrario, el resultado no tiene sentido.

Fracción de nitrato

Este término denota nitratos solubles en agua, o el ion NO_3^- , pero el componente principal es el ácido nítrico HNO_3 . La fracción es pequeña y a pesar de que muchos laboratorios de emisiones informan de ello, su completa eliminación sería inútil para cumplir con la legislación sobre emisiones; esto puede explicar la falta de atención que recibe en la literatura. En términos generales, HNO_3 se forma por reacción entre agua y NO_2 entonces intuitivamente, la química del nitrato está conectada a la química de NO_x . Sin embargo, el estado del arte no plantea mecanismos detallados que pertenecen a los gases de escape, y las pocas observaciones o ideas disponibles no se unen para formar una visión coherente.

Partículas No Volátiles o Insolubles

Fracción carbonosa

La palabra "carbonosa" enfatiza que esta fracción es predominantemente, pero no exclusivamente carbono. Del mismo modo, la denominación ambigua "hollín" debe ser cuidadosamente calificada; es cierto que el término también se usa en la comunidad técnica, donde en ocasiones significa partículas, otras veces significa partículas no volátiles o insolubles, y algunas veces significa sólo la fracción carbonosa. Para fines del presente trabajo de título, hollín y fracción carbonosa se trabajan como sinónimos. Como era de esperar, el color negro del humo surge de esta fracción, inevitablemente las regulaciones de emisiones enmarcadas en términos de humo pasan por alto las otras fracciones, aunque las medidas que reducen el humo también pueden, por ejemplo, reducir fortuitamente la fracción orgánica.

Fracción de ceniza

Esta fracción contiene diversos compuestos o elementos inorgánicos, la mayoría metales y algunos no metales; una mezcla con una composición altamente variable, para la cual los compuestos químicos claramente definidos son difíciles de precisar. Un método de caracterización bien utilizado es quemar todas las partículas y luego examinar lo que queda, que se denomina "ceniza incombustible".

En base a lo anterior, estas cinco fracciones corresponden en gran medida a las características delineadas en la Figura 1: el sulfato, el nitrato y las fracciones orgánicas forman los recubrimientos volátiles, y la fracción carbonosa está ampliamente representada por las esférulas. Las partículas de modo de acumulación a veces se denominan carbono tipo "aciniforme", que significa "agrupadas como uvas" [12]. La ubicación de la fracción de ceniza es menos cierta: puede estar dispersa atómicamente dentro de las esférulas, presente como nano-dominios diminutos dentro o unidos a las esférulas; o como se menciona anteriormente, presente como núcleo, dentro de las partículas de modo de nucleación. En circunstancias ciertamente menos habituales, cuando las cenizas dominan la emisión de partículas y abruman a las otras fracciones, las partículas del modo de nucleación están compuestas por cenizas.

El esquema de fraccionamiento quíntuple permite hacer una declaración extremadamente general sobre la distribución del material. Algunas cifras para un motor Diésel típico son las presentadas en la **Error! Reference source not found.:**

Tabla 3: Porcentaje de las fracciones para un motor Diésel. [8].

Fracción	%
Fracción de ceniza	<1-2%
Fracción orgánica	10-90%
Fracción carbonosa	10-90%
Fracción de sulfato	<5%
Fracción de nitrato	<1%

Como se menciona anteriormente, el Material particulado se puede considerar como una ‘mezcla de mezclas’ debido a las diferentes partículas atmosféricas primarias (directamente de la fuente) que reaccionan formando estas partículas secundarias de baja volatilidad que condensan a fase líquida o incluso sólida quedando suspendidas en el aire. Sin embargo, es posible caracterizar una muestra de MP de forma química, separándola en las diferentes fracciones descritas o también según las características físicas que presenten las partículas, encontrándose los ‘modos’ (grueso, acumulación, nucleación) y según la dosimetría basada en el diámetro aerodinámico (MP_{10} , $MP_{2.5}$ MP_1).

Para un motor Diésel sus gases de escape están compuestos mayormente por la fracción orgánica, compuesta mayormente de hidrocarburos aromáticos policíclicos provenientes de aceites lubricantes derivados de hidrocarburos y la fracción carbonosa compuesta mayormente de carbón y que también se denomina hollín.

2.2 Medición de MP en Motores Diésel

El objetivo de la mayoría de las técnicas de medición de partículas es determinar cuánta cantidad de ellas está siendo emitida a la atmósfera. Las técnicas para la medición y caracterización de partículas varían desde simples lecturas de opacidad del medidor de humo hasta análisis con túneles de dilución. La mayoría de las técnicas requieren largos y complejos periodos de recolección de muestras debido a que las tasas de emisión individuales suelen ser baja. La medición de partículas se hace bajo condiciones críticas por la inestabilidad de las especies emitidas y pueden alterarse por la pérdida de superficies, cambios en la distribución

de tamaños (a través de colisiones) e interacciones químicas entre otras especies en el escape en cualquier momento durante el proceso de medición (incluido el muestreo, el almacenamiento o el examen). [13].

Como se menciona anteriormente, los aerosoles atmosféricos (de origen natural o antropogénico), también denominado Material Particulado (MP), tienen una estructura compleja multifásica, y las partículas generadas en la combustión de un motor Diésel no escapan de este hecho. Debido a esta complejidad, la instrumentación utilizada para analizar estas partículas en motores de combustión debe tener la capacidad de separar en función del tamaño y en tiempo real proporcionar información sobre su composición química.

Existen varios instrumentos que permiten medir las diferentes características de las partículas bajo diferentes métodos. Estos métodos pueden ser llevados a cabo con el motor funcionando en un laboratorio, a través de un dinamómetro (de motor o de chasis), en donde se simulan las condiciones en las que opera el MCI en la realidad o en Ruta con dispositivos que permiten medir en tiempo real el comportamiento del MP proveniente de los gases de escape.

2.2.1 Medición en Laboratorio

La medición en laboratorio de Material Particulado en los gases de escape de un motor Diésel se puede realizar en dos tipos de bancos de prueba:

Dinamómetro de chasis

Consiste en un banco de prueba donde las ruedas del automóvil quedan posicionadas sobre unos rodillos que giran junto a los neumáticos simulando así el movimiento. También se simulan las condiciones del aire que impacta al automóvil pues es un factor importante en la temperatura de operación del motor, todos estos parámetros son procesados por un PC, obteniéndose una fácil lectura de ellos. Los dinamómetros de chasis varían de tamaño de acuerdo con la potencia del motor, así pueden ser probados también en motocicletas o camiones. El dinamómetro de chasis puede ser utilizado para medir la potencia del vehículo directamente de los rodillos o también puede ser utilizado para simular condiciones para otro suceso, por ejemplo, la relación entre la carga y velocidad con contaminantes presentes en los gases de escape. La Figura 6 muestra un dinamómetro de chasis utilizado para tomar pruebas a un autobús del Transantiago.



Figura 6: Dinamómetro de chasis (izq.). Autobús del Transantiago siendo testeado en el dinamómetro (der.).

Dinamómetro de motor

A diferencia del dinamómetro de chasis, en el dinamómetro de motor no se dispone del automóvil en sí, sino de un motor fijo a un banco de pruebas donde un rotor conectado al cigüeñal del motor simula la carga y las revoluciones. El dinamómetro varía de acuerdo con el tamaño del motor, y debe estar en una sala acondicionada para la operación de este, es decir, acondicionada para el ruido, vibración, temperatura y gases de escape del motor. El suministro de combustible se encuentra fuera de la sala del banco de pruebas al igual que el panel que permite controlar el motor (arranque, encendido y aceleración) por razones de seguridad. En la **Error! Reference source not found.** se presenta el banco de pruebas donde se puede observar el lugar donde controlan la partida, velocidad y carga.

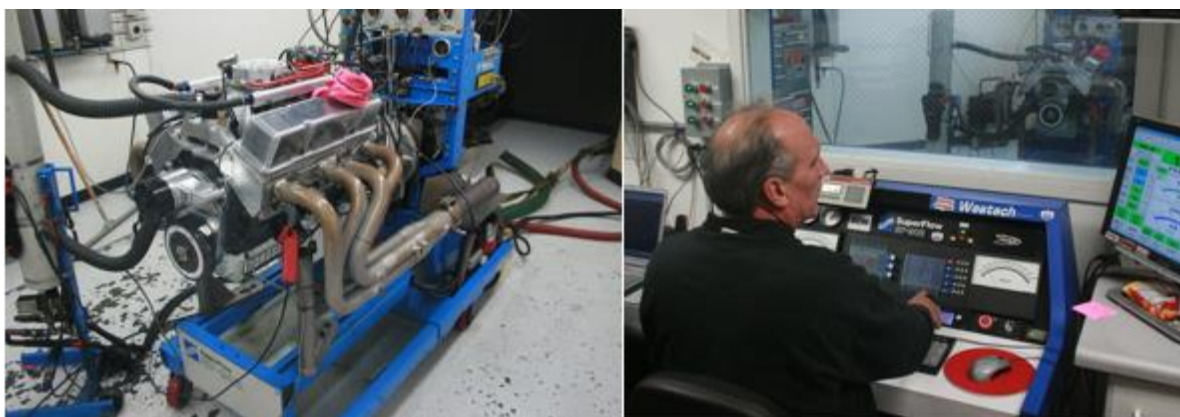


Figura 7: Dinamómetro de motor (izq.) con su respectiva sala de control (der.). [14]

Los diferentes métodos de muestreo de MP pueden ser llevados a cabo en ambos dinamómetros en un laboratorio, sin embargo, algunos análisis buscan medir la concentración

de partículas, como por ejemplo el análisis óptico y el análisis gravimétrico. Este último es uno de los más llevados a cabo para medir concentración de partículas por la simpleza en la que consiste: determinar la cantidad proporcionada de un elemento o compuesto presente en una muestra eliminando cualquier sustancia extra que interfiera en la medición del peso de la muestra. Bajo este método funcionan instrumentos como los impactadores gravimétricos o los filtros gravimétricos (Figura 8).

Otros métodos de muestreo de MP tienen como fin identificar las distribuciones de tamaños de las partículas de MP, por ejemplo, el método microscópico, este consiste en hacer pasar luz visible de una fuente (difractada, reflejada o refractada en las partículas) a través de lentes ópticos simples o múltiples, para lograr una vista ampliada de la muestra, uno de los instrumentos que trabaja con este método es el microscopio electrónico de transmisión o también llamado TEM por sus siglas en inglés.⁹ Este microscopio es característico porque permite estudiar muestras ultrafinas, puesto que la imagen se obtiene de los electrones que atraviesan la muestra.

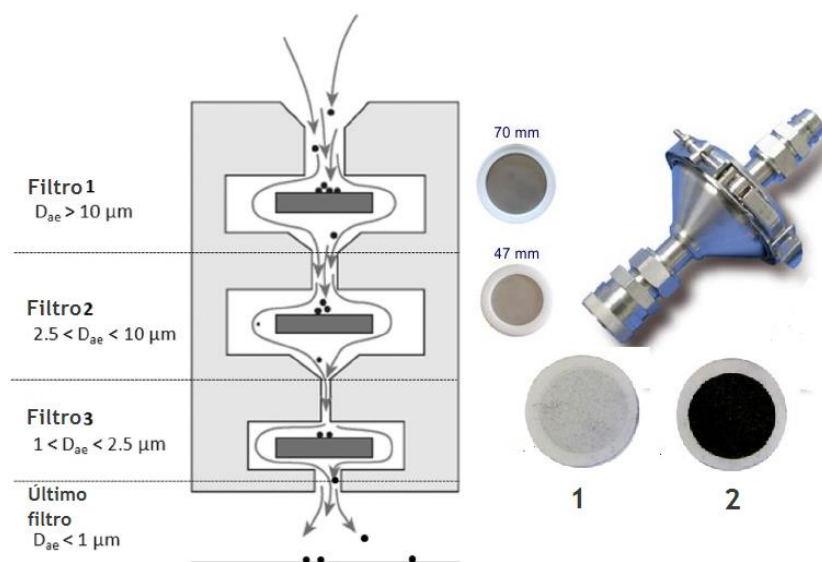


Figura 8: Impactador gravimétrico (izq.). Filtros gravimétricos (der.), el filtro 1 corresponde a antes de la exposición y el filtro 2 a después de la exposición.

2.2.2 Medición en Ruta

⁹ Transmission Electron Microscopy.

En la actualidad existen instrumentos que permiten medir diferentes características del MP en ruta, denominados sistemas de medición portable de emisiones o PEMS por sus siglas en inglés¹⁰. Las pruebas de emisiones de vehículos en carretera (o en ruta) son muy diferentes de las pruebas de laboratorio, y presentan beneficios y desafíos considerables: como las pruebas en ruta pueden realizarse durante la operación regular de los vehículos probados, se puede probar una gran cantidad de vehículos dentro de un período relativamente corto de tiempo y a un costo relativamente bajo. Se pueden obtener datos fidedignos de emisiones del mundo real. Los instrumentos deben ser pequeños, livianos, y deben soportar entornos difíciles y no representar un peligro para la seguridad. Los datos de emisiones están sujetos a variaciones considerables, debido a que las condiciones del mundo real a menudo no están bien definidas ni son repetibles, y pueden existir variaciones significativas en las emisiones incluso entre motores idénticos. Por lo tanto, las pruebas de emisiones en Ruta requieren una mentalidad diferente a la del enfoque tradicional de las pruebas en el laboratorio y el uso de modelos para predecir el desempeño en el mundo real. En ausencia de métodos establecidos, el uso de PEMS requiere un enfoque cuidadoso, reflexivo y amplio. Esto debe tenerse en cuenta al diseñar, evaluar y seleccionar PEMS para la aplicación deseada.

Debido a que un instrumento PEMS puede transportarse fácilmente por una persona, los proyectos requeridos de prueba de emisiones en Ruta son económicamente viables. En pocas palabras, se pueden hacer más pruebas de forma más rápida, con menos trabajadores, lo que aumenta drásticamente la cantidad de pruebas realizadas en un período de tiempo determinado. Esto, a su vez, reduce significativamente el "costo por prueba" y, al mismo tiempo, aumenta la precisión global requerida en un entorno del "mundo real".

¹⁰ Portable Emissions Measurement System.



Figura 9: Muestreo de partículas en vehículos llevado a cabo con PEMS.[15]

Las diferentes características que se pueden estudiar de las partículas ha conllevado a complejos métodos y diferentes instrumentos que ayudan al estudio y caracterización del MP tanto en laboratorio mediante dinamómetros de motor o de chasis, como en ruta con los mencionados PEMS. Si bien las pruebas de medición en ruta aportan diferentes beneficios (más cercano al régimen de un motor, más económico, entre otros), las pruebas en laboratorio entregan resultados con menos variación debido a que se pueden contralar más fácil las variables físicas (revoluciones, torque, temperatura, entre otras) y desde un aspecto teórico más cercana a lo que describen diferentes autores.

2.3 Termofóresis

2.3.1 Antecedentes Teóricos

La Termofóresis es un fenómeno que ocurre cuando partículas suspendidas en un gas (aerosol) están expuestas a un gradiente de temperatura, las partículas pequeñas son impulsadas por colisiones moleculares en la dirección opuesta a la del gradiente de temperatura. A una mayor temperatura, se obtiene una mayor energía cinética molecular, imponiéndose así una fuerza desequilibrada en cualquier lado la partícula presente en el gradiente de temperatura, conduciendo a las otras partículas a la zona más fría producto de las colisiones. La Termofóresis puede ser una fuerza significativa en partículas sub-micrométricas, tales como partículas de hollín, aerosoles, entre otras, cuando el gradiente de temperatura supera los 10

[K/cm] [7][16]. Es notable que las presiones desiguales en ambos lados de la partícula conducen a una fuerza de arrastre que es importante en el enfoque lagrangiano. En el enfoque euleriano actual, se obtiene una velocidad Termoforética basada en el equilibrio entre las fuerzas Termoforéticas y de arrastre que se encargan de ambos efectos simultáneamente.

En la Figura 10 se muestra el desequilibrio de fuerzas en una partícula cuyo diámetro aerodinámico (d_p o simplemente d) es menor al camino libre medio λ , es decir, el diámetro es más pequeño que la distancia entre partículas o colisiones:

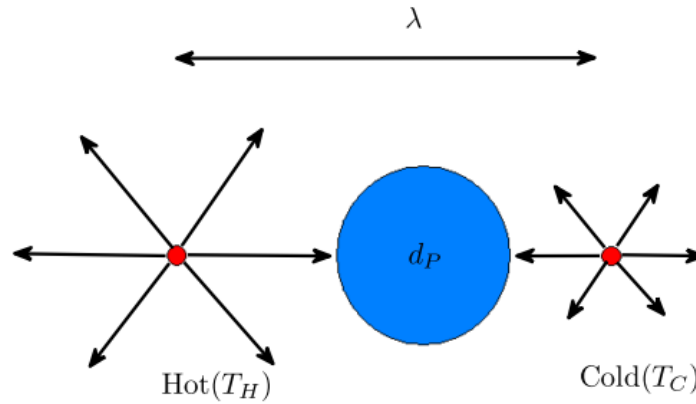


Figura 10: Desbalance de fuerzas en la partícula, el lado más caliente T_H posee mayor energía cinética molecular que el lado frío T_C . [1].

Para un diámetro aerodinámico menor al camino libre medio entre partículas ($d < \lambda$) [17]:

$$F_t = - \frac{p\lambda d^2 \nabla T}{T} \quad \text{Ec. 1.}$$

$$v_t = - \frac{0.55\mu \nabla T}{\rho_g T} \quad \text{Ec. 2.}$$

Donde p es la presión del gas, ∇T el gradiente de temperatura, ρ_g la densidad del gas, μ la viscosidad dinámica del gas y T la temperatura absoluta de la partícula. El signo menos es porque la fuerza y la velocidad van en el sentido de decrecimiento de la temperatura. La fuerza y la velocidad Termoforética en partículas pequeñas no dependen del tamaño de la partícula, pero sí son directamente proporcionales al gradiente de temperatura.

Para un diámetro aerodinámico mayor al camino libre medio entre partículas ($d > \lambda$) [18]:

$$F_t = -\frac{9\pi d\mu^2 H \nabla T}{2\rho_g T} \quad \text{Ec. 3.}$$

Donde H es un coeficiente que da cuenta de las diferencias entre la conductividad térmica del gas (k_g) y la conductividad de la partícula (k_p), y el efecto del tamaño de la partícula (λ/d_p) [18]:

$$H = \left(\frac{1}{1 + 6\lambda/d} \right) \left(\frac{k_g/k_p + 4.4\lambda/d}{1 + 2k_g/k_p + 8.8\lambda/d} \right) \quad \text{Ec. 4.}$$

Para partículas cuyo diámetro es mucho mayor que el camino libre medio, $d \gg \lambda$, se tiene que el coeficiente H en la fuerza Termoforética queda reducido al ratio de las conductividades térmicas:

$$F_t = -\frac{9\pi d\mu^2 k_g \nabla T}{2\rho_g k_p T} \quad \text{Ec. 5.}$$

Así, la fuerza Termoforética depende directamente de las conductividades del gas y de la partícula.

Finalmente, cuando la fuerza Termoforética es igual a la fuerza de arrastre, la velocidad Termoforética se define como [18]:

$$v_t = -\frac{3\mu C_c H \nabla T}{2\rho_g T} \quad \text{Ec. 6.}$$

Donde C_c es un factor de corrección de deslizamiento del gas, puesto que para partículas con diámetros menores a 1 $[\mu\text{m}]$, el gas no se comporta como un medio continuo para las partículas, es decir, las moléculas del gas ya no son pequeñas en comparación a las partículas en suspensión. Las moléculas del gas que se mueven alrededor de la partícula pueden no colisionar con ella, lo que es llamado como "deslizamiento". Entonces, la velocidad del gas en la superficie de la partícula ya no es nula debido a la colisión faltante. Dado que la colisión es la fuente de arrastre, la velocidad de sedimentación (en el gas) de la partícula se vuelve más rápida que la teorizada anteriormente debido a una resistencia menor de la esperada.

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.34 + 1.05e^{-0.39\frac{d_p}{\lambda}} \right] \quad \text{Ec. 7.}$$

2.3.2 Aplicaciones de la Termofóresis

Actualmente el fenómeno de Termofóresis está siendo estudiado por diferentes áreas de la ciencia para tener diferentes aplicaciones; desde aplicaciones en biotecnología con la técnica denominada ‘Termofóresis a microescala’ o MST¹¹. La tecnología de Termofóresis a microescala es una forma de analizar biomoléculas moviéndolas a lo largo de un gradiente de temperatura. Útil en biología celular y laboratorios de investigación del cáncer, así como en la industria farmacéutica, la Termofóresis a microescala puede analizar interacciones moleculares en solución, dando a los investigadores información cinética y vinculante, lo que permite el estudio de biomoléculas y de interacciones entre sustratos e inhibidores de enzimas durante el descubrimiento de fármacos. [19].



Figura 11: El Monolith NT.115 de la marca Biocompare permite medir cada tipo de interacción, desde la formación de grandes complejos proteicos hasta la unión de iones metálicos individuales.

¹¹ Micro Scale Thermophoresis.

También, la Termofóresis ha sido estudiada en el campo de los MCI, de hecho en la Universidad de Linköping ubicada en Suecia, el Departamento de Ciencias ha desarrollado un dispositivo para estudiar las partículas de hollín (fracción carbonosa) que junto a un sistema de generación de hollín utilizan dos procesos partícula-partícula para la deposición en los filtros, principalmente la deposición electroestática (puesto que las partículas de hollín adquieren carga eléctrica producto de la combustión) y para facilitar esta deposición también aprovechan la fuerza Termoforética que se generan en las partículas de hollín. [20].

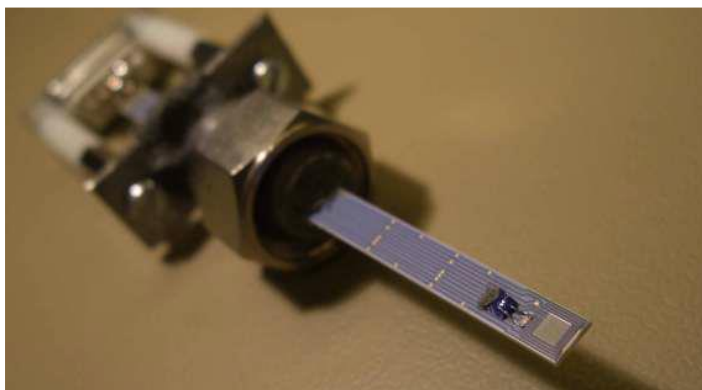


Figura 12: Dispositivo para capturar partículas de hollín con deposición electroestática desarrollado por la Universidad de Linköping en Suecia. [20].

Otro uso de la Termofóresis, esta vez en el diagnóstico óptico y sondeo de llamas de alta presión en el Departamento de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Toronto [21], realizado para el estudio del proceso de formación de contaminantes en combustiones de alta presión. Un proceso preferido para estudiar el tamaño y la morfología del hollín en las llamas atmosféricas es el muestreo Termoforético in situ y la microscopía electrónica de transmisión. En la Universidad de Toronto se diseña y construye un aparato de combustión a alta presión el cual consiste en una cámara de combustión de alta presión que mantiene una llama a presiones superiores a 110 [atm], este aparato permite el muestreo de partículas de hollín a través de Termofóresis mediante la introducción de un ‘disco de muestreo’ (Figura 14) que tiene múltiples sondas, permitiendo realizar varios muestreos a diferentes tiempos mediante la variación de la velocidad angular de este disco.

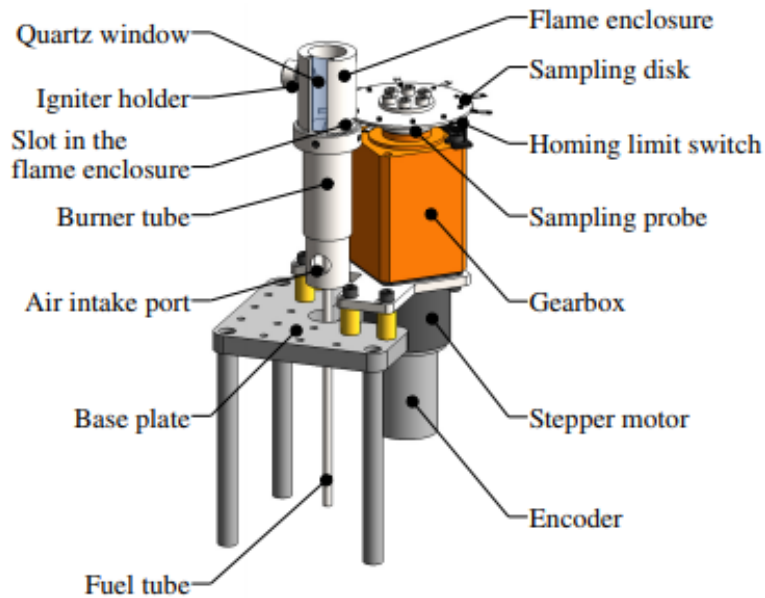


Figura 13: Vista isométrica del sistema de muestreo desarrollado en la Universidad de Toronto. [21].

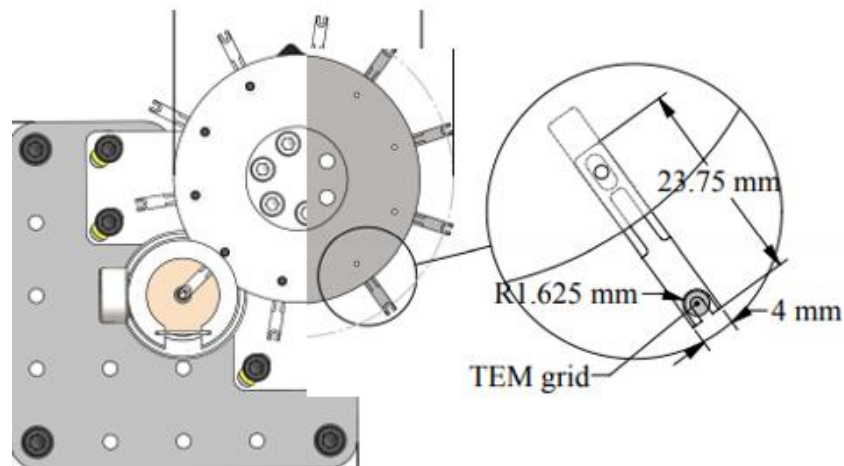


Figura 14: Vista en planta del disco de muestreo Termoforético. [21].

Actualmente existen diferentes usos y estudios que involucran termofóresis y el estudio de partículas en combustión, como es el caso de la Universidad de Toronto, sin embargo para este Trabajo de Título la producción de las partículas de estudio no está a cargo de un instrumento diseñado exclusivamente para eso como es el caso de la Universidad de Linköping que crea su propio hollín con un instrumento para captarlo mediante deposición electrostática en una sonda. La producción de MP será a cargo de un dinamómetro de motor Diésel bajo diferentes regímenes de carga y revoluciones.

3. Metodología

3.1 Antecedentes

El desarrollo de este Trabajo de Título se desarrolla dentro de una colaboración entre la Universidad de Castilla-La Mancha¹² en España, la Universidad de Antioquia¹³ en Colombia y la Universidad Técnica Federico Santa María¹⁴ en Chile. La UCLM comparte su línea investigativa sobre MP y su construcción de un sistema de muestreo termoforético de partículas para un motor Diésel con ambas universidades para diferentes fines académicos: en la UDA recibe esta línea investigativa y construye un sistema de muestreo termoforético de partículas para ser comparado con otros sistemas de muestreo de partículas en un motor Biodiesel por el estudiante de magíster de ingeniería Cristián Ávila. Por su parte, la UTFSM dispone de esta línea investigativa para construir un sistema de muestreo termoforético más independiente del diseño original con la posibilidad de ser utilizado en otro banco de motor (bajo ciertas condiciones previas requeridas) y capturar partículas para luego ser caracterizadas por el estudiante de magíster de ingeniería mecánica Alan Ordóñez.

3.2 Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM San Joaquín

Dentro del Campus San Joaquín de la UTFSM está el laboratorio de termo-hidráulica del Departamento de Mecánica donde se desarrollan la mayoría de los laboratorios correspondientes a la rama de energía de ingeniería mecánica (termodinámica, mecánica de fluidos, transferencia de calor, motores de combustión interna, entre otros.), dentro de él se encuentra una sala acondicionada para el funcionamiento de un dinamómetro de motor Diésel que recibe el par motor desde una turbina (que también está dentro de la sala acondicionada) mediante un cardán que conecta ambos ejes. Por razones de seguridad, fuera de esta sala acondicionada está el estanque de alimentación que contiene Diésel y la mesa de control del motor, mediante la cual pueden encender el dinamómetro, variar las revoluciones y el torque entregado por la turbina. La Figura 15 muestra el dinamómetro de motor dentro de la sala

¹² UCLM

¹³ UDA

¹⁴ UTFSM

acondicionada, el cardán conectado al eje de transmisión del motor y al fondo se observa la ventana para observar el motor desde la mesa de control.

Otro elemento

3.2.1 Motor Diésel

El muestreo de las partículas de MP en el tubo de escape se lleva a cabo en un dinamómetro de motor dentro de una sala acondicionada en el Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.



Figura 15: Dinamómetro de motor Diésel dentro de la sala acondicionada para el funcionamiento del MCI.

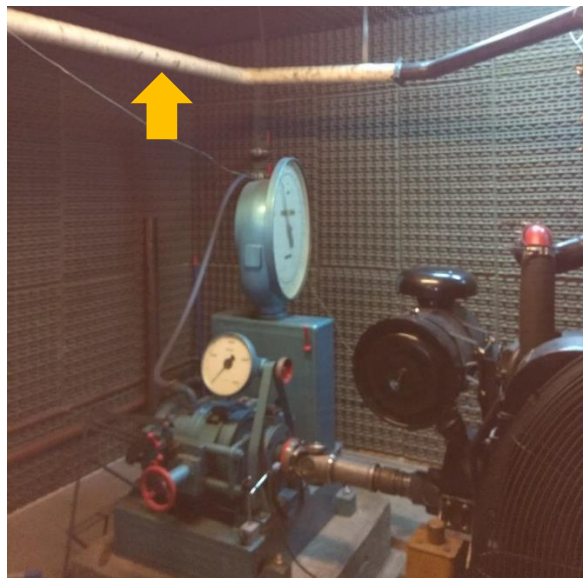


Figura 16: Tubo de escape del dinamómetro, la flecha indica el lugar tentativo para hacer el muestreo termoforético.

Las características del motor son las siguientes:

Tabla 4: Características del motor Diésel del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.

Marca	Mercedes-Benz
Modelo	OM 366 LA
Tipo	6 cilindros, verticales en línea, con turbocooler
Potencia máxima	155 kW @ 2.600 r.p.m.
Rotación máxima	2.600 r.p.m
Par motor máximo	660 Nm @ 1.400 r.p.m.
Cilindrada total	5958 [cm3]
Consumo específico	197 g / kWh @ 1.950 r.p.m

3.2.2 Compresor

El aire a presión que mueve al cilindro neumático para entrar al tubo de escape es suministrado por el compresor del laboratorio, este corresponde a un modelo de la marca SCHULZ y sus características son descritas en la **Error! Reference source not found..**

Tabla 5: Características del compresor del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.

Caudal Teórico	50Hz	[pies ³ /min]	5,2
		[l/m]	148
	60Hz	[pies ³ /min]	6,5
		[l/m]	185
Presión Máxima		[lbf/pulg ³]	120
		barg	8,3
Tanque de Aire	Volumen	[l]	29
	Tiempo de llenado	50Hz	4'40"
		60Hz	3'30"
rpm	50Hz		1440
	60Hz		1670
hp			1,5



Figura 17: Compresor modelo Schulz CSA 6,5/30 presente en el laboratorio.

Es importante tener en consideración la presión y flujo de trabajo del compresor puesto que estos valores determinan las características del cilindro (diámetro y carrera) y la velocidad de avance de éste. Para esto se deben realizar simulaciones en softwares para determinar las características de los elementos de la sonda.

3.3 Softwares a Utilizar

Para el desarrollo de este Trabajo de Título se utilizan diferentes softwares durante el proceso de diseño de la sonda termoforética, a continuación se describen:

3.3.1 Festo Fluid Simulation

Este software se ocupa para simular las condiciones neumáticas del compresor (tipo de compresor, flujo de aire, presión, entre otros), la electroválvula (vías, posiciones, accionamientos, entre otros) y variar las condiciones del cilindro neumático para medir los tiempos de salida y regreso del vástago y así definir las medidas del cilindro que satisface el tiempo de muestreo adecuado. La Figura 18 muestra un ejemplo de su uso.

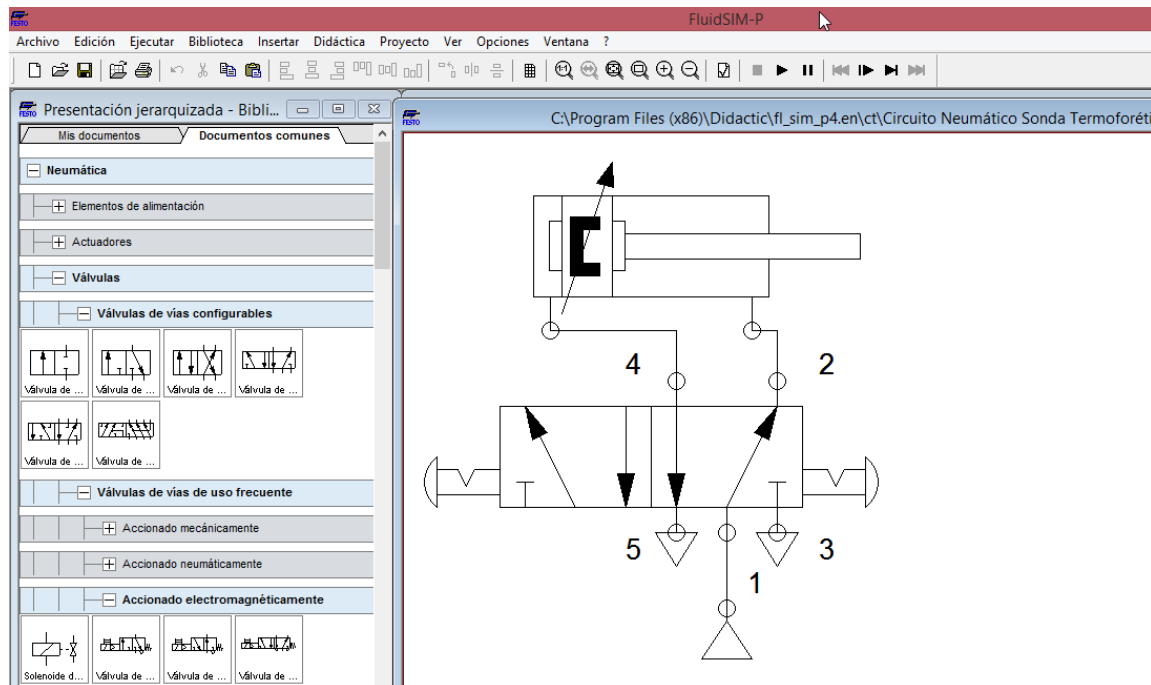


Figura 18: Festo FluidSim simulando un cilindro neumático de doble efecto con una válvula 5/2 y un compresor.

3.3.2 Inventor Autodesk 2019

Una vez que se definen las características del cilindro y la electroválvula, es necesario diseñar el sistema de entrada al tubo de escape y el portafiltro de la sonda termoforética, para esto se utiliza el software de diseño Inventor 2019, con él se diseña el cilindro y el portafiltro que se ensamblan al diseño del sistema de entrada a tubo de escape.

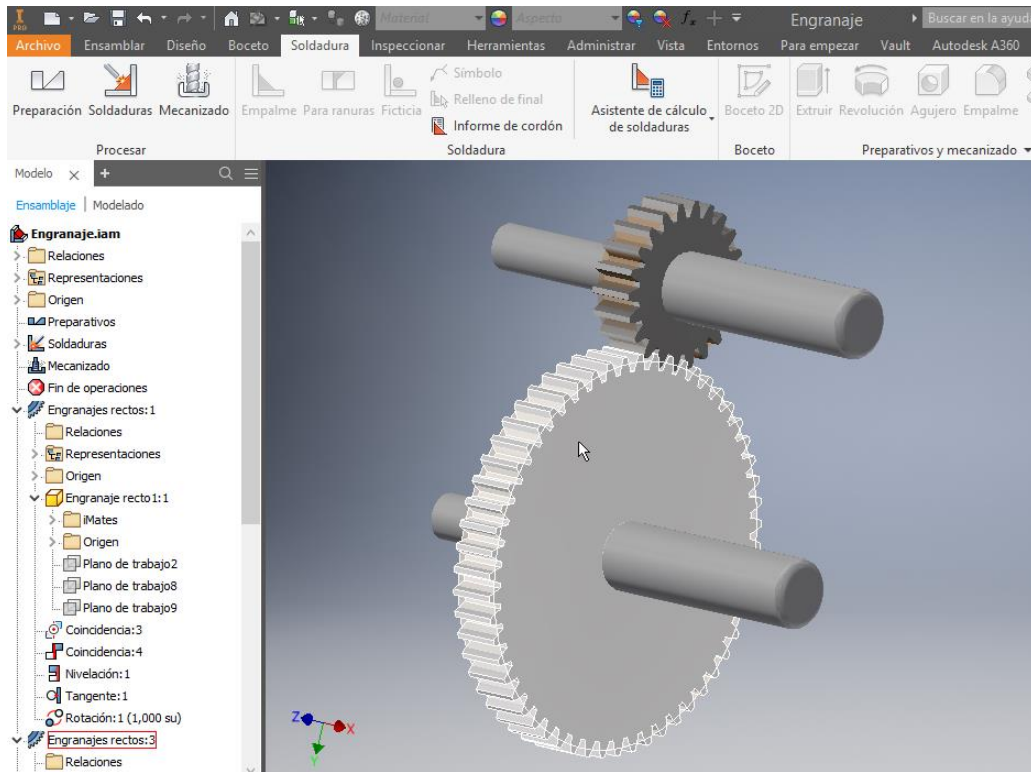


Figura 19: Un ejemplo del software de diseño Inventor Autodesk 2019 para el diseño de engranajes y ejes.

3.3.3 Arduino IDE

Para el control lógico de la sonda termoforética se utiliza un Arduino/PLC, con el cual se puede programar un código de trabajo e insertarlo en este dispositivo mediante USB y así trabajar en diferentes procesos industriales. Para el desarrollo del código del dispositivo y el traspaso al mismo se utiliza el software abierto Arduino IDE, con él se pueden utilizar las librerías que necesite el dispositivo Arduino/PLC que se seleccione y programar el algoritmo para la sonda termoforética.



Figura 20: Arduino IDE para programar el código del control de la sonda termoforética.

4. Diseño del Sistema de Muestreo Termoforético

4.1 Introducción

El objetivo de la sonda Termoforética es capturar las partículas presentes en los gases de escape de un motor Diésel para posteriores análisis morfológicos, físicos y químicos. Como se menciona anteriormente, una de las características de la sonda es que trabaja con el fenómeno físico de Termofóresis para que las partículas presentes en los gases de escape de un motor Diésel se depositen en un filtro gravimétrico.

El Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM del Campus Santiago San Joaquín posee un banco de motor dentro de una sala acondicionada para el ruido, temperatura y gases de escape, así el diseño de la sonda Termoforética debe contemplar las condiciones en que el banco de motor se encuentra. Como diseño preliminar se propone que la sonda sea un cilindro neumático que entre al tubo de escape y capture las partículas para finalmente salir del tubo

sin alterar la muestra obtenida. Es importante que el desarrollo del proyecto en el laboratorio no interfiera en los futuros trabajos que puedan llegar a desarrollar en el mismo banco de motores, por ende, la entrada al tubo de escape debe permitir el funcionamiento normal del motor cuando la sonda no se esté utilizando. La Figura 21 resume la idea básica de cómo entra el cilindro al tubo de escape.

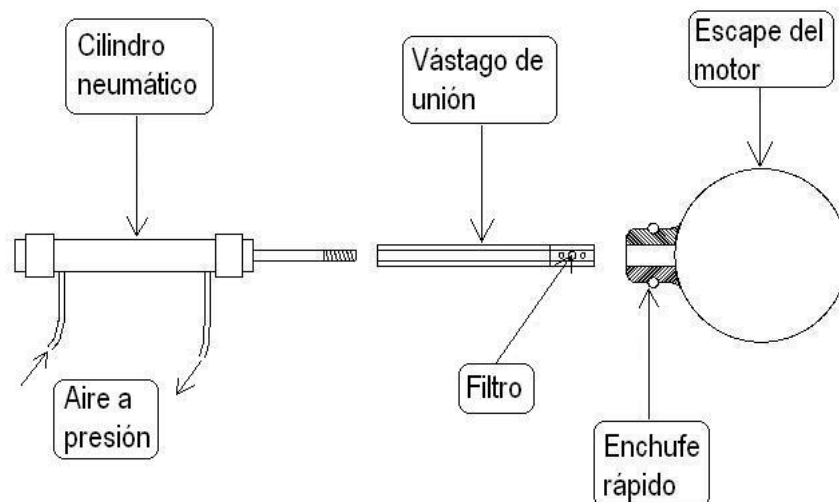


Figura 21: Esquema básico del diseño de la sonda Termoforética.

4.1.1 Motor Diésel

El muestreo de las partículas de MP en el tubo de escape se lleva a cabo en un dinamómetro de motor dentro de una sala acondicionada en el Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.

Las características del motor son las siguientes:

Tabla 6: Características del motor Diésel del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.

Marca	Mercedes-Benz
Modelo	OM 366 LA
Tipo	6 cilindros, verticales en línea, con turbocooler
Potencia máxima	155 kW @ 2.600 r.p.m.
Rotación máxima	2.600 r.p.m
Par motor máximo	660 Nm @ 1.400 r.p.m.
Cilindrada total	5958 [cm3]
Consumo específico	197 g / kWh @ 1.950 r.p.m

4.1.2 Compresor

El aire a presión que mueve al cilindro neumático para entrar al tubo de escape es suministrado por el compresor del laboratorio, este corresponde a un modelo de la marca SCHULZ y sus características son descritas en la **Error! Reference source not found.**



Figura 22: Compresor modelo Schulz CSA 6,5/30 presente en el laboratorio.

Tabla 7: Características del compresor del Laboratorio de Termo-Hidráulica de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín.

Caudal Teórico	50Hz	[pies³/min]	5,2
		[l/m]	148
	60Hz	[pies³/min]	6,5
		[l/m]	185
Presión Máxima		[lbf/pulg³]	120
		barg	8,3
Tanque de Aire	Volumen	[l]	29
	Tiempo de llenado	50Hz	4'40"
		60Hz	3'30"
rpm	50Hz		1440
	60Hz		1670
hp			1,5

Es importante tener en consideración la presión y flujo de trabajo del compresor puesto que estos valores determinan las características del cilindro (diámetro y carrera) y la velocidad de avance de éste. Para esto se deben realizar simulaciones en softwares para determinar las características de los elementos de la sonda.

4.2 Sonda Termoforética

4.2.1 Introducción

Se denomina sonda Termoforética al conjunto de elementos que componen y permiten el movimiento del conjunto cilindro-porta filtro hacia el centro del tubo de escape. Dentro de estos elementos se encuentra: la electroválvula que permite el movimiento en ambos sentido del cilindro (doble efecto), el sensor de final de carrera del cilindro encargado de detectar la posición del émbolo al final de la carrera, un pulsador para dar marcha al muestreo y un dispositivo llamado Controllino, que mezcla las características de un PLC¹⁵, pero con la facilidad de la tecnología de software de código abierto Arduino que permite controlar todos los elementos mencionados anteriormente.

Todos los elementos del diseño deben estar protegidos dentro de una caja para evitar el desgaste del conjunto, incluyendo el conjunto cilindro-porta filtro y el sensor de final de carrera (que está montado al cilindro) que necesita conectarse al tubo de escape.

A continuación, se describen los elementos que componen la sonda Termoforética:

4.2.1 Filtros Gravimétricos

Si bien los filtros gravimétricos se utilizan para medir la cantidad de partículas que fueron filtradas, también es un método simple de captura de partículas en base a diferentes diámetros, tal como muestra la Figura 8. Debido a esto, en el diseño propuesto se decide que la sonda Termoforética debe utilizar filtros para capturar las partículas de MP presentes en los gases de escape.

El objetivo de los filtros en la sonda es que las partículas atraídas (mediante la fuerza Termoforética) se depositen en estos al enfrentarse a un gradiente de temperatura inducido. Para esto también se debe diseñar un sistema que porte a estos filtros, capaz de soportar la temperatura con la que vienen los gases.

¹⁵ Siglas en inglés para Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller).

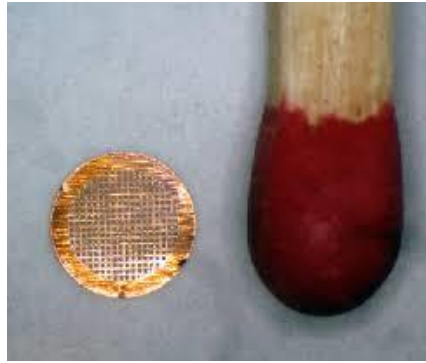


Figura 23: Filtro de cobre de 3 [mm] de diámetro, al lado la punta de un fósforo como referencia.

4.2.2 Cilindro Neumático

El actuador neumático tiene la función de introducir el vástago porta filtros al centro del tubo de escape, permanecer un tiempo específico para tomar la muestra y finalmente salir del tubo de escape. Para esto se utiliza un cilindro neumático de doble efecto comandado por una electroválvula que permite desplazar el émbolo junto al vástago en sentido radial hacia el centro del tubo de escape y luego desplazarlo en sentido contrario.

Se define que el tiempo de muestreo no sea mayor a 2 segundos para que las partículas no se acumulen y cambien sus características físicas en el filtro gravimétrico. Este específico tiempo de muestreo junto al diámetro del tubo de escape (89 [mm]) condicionan las características físicas del actuador, pues a la presión de trabajo del laboratorio (6 [bar]), la velocidad de recorrido del pistón queda dependiente de las características físicas del cilindro (diámetro del émbolo y diámetro de vástago), mientras que la carrera depende de cuánto debe recorrer el centro del filtro (en el porta filtro) desde cuando está en reposo hasta cuando llega al centro del tubo de escape.

La industria de cilindros neumáticos ofrece diferentes actuadores con rangos de diámetros de émbolo de 12 a 300 [mm] y carreras de hasta 3000 [mm]. Como el diámetro del tubo de escape es de 89 [mm] y la sonda debe posicionarse en el centro geométrico del tubo, se debe considerar el largo del sistema de entrada al tubo (que también es una distancia que debe recorrer el vástago) y el largo del porta filtro. Más adelante se entregan detalles de la conexión al tubo de escape y del porta filtro. De acuerdo con las mediciones, 200 [mm] para la carrera del vástago del actuador es suficiente para desplazar el vástago porta filtro desde el comienzo de la conexión al tubo hasta el centro del tubo (ver Figura 21).

Para determinar cuál diámetro de émbolo se debe usar, se recurre al software FESTO FluidSim v4.2, mediante el cual se simula el circuito neumático del actuador configurando las características físicas del actuador: cilindro redondo de doble efecto, carrera de pistón de 200 [mm], diámetro de émbolo y de vástago (valores a variar), de la válvula que controlará al actuador: válvula de 5 vías y 2 posiciones NC (normalmente cerrada) con accionamiento mediante pulsador (lado a conmutar) y retorno a posición central mediante otro pulsador; y finalmente los parámetros asociados al compresor: presión de trabajo del compresor (6 [bar]) y flujo de aire (148 [l/min]). Se varía el diámetro del émbolo y vástago de acuerdo a la disponibilidad industrial manteniendo constante la carrera (200 [mm]) y se obtienen los tiempos de ida y regreso del pistón, y por ende, el tiempo total de muestreo. También se muestra en la **Error! Reference source not found.** la velocidad máxima obtenida en el cilindro y debajo de este dato se detalla en qué parte de la carrera se obtuvo la mayor velocidad:

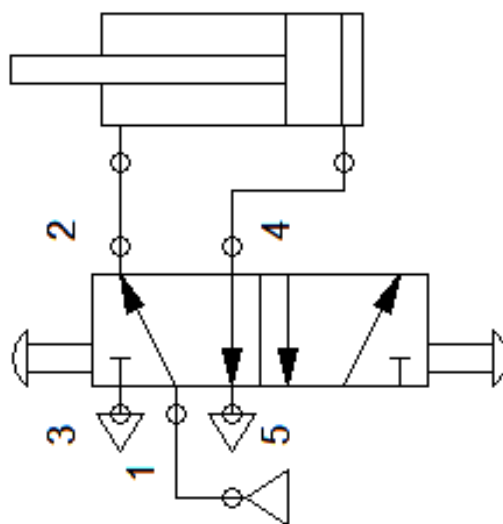


Figura 24: Circuito neumático de la sonda Termoforética simulado en FESTO FluidSim.

Tabla 8: Parámetros entregados para simular circuito neumático (izq.), y los datos obtenidos a partir de esta simulación para la misma carrera de 200 [mm].

Parámetros de Entrada				Parámetros de Salida			
ø émbolo [mm]	10	12	16	Velocidad máx. [m/s]	1.01 (39 mm)	1.15 (42 mm)	1.34 (49 mm)
ø vástago [mm]	4	6	6	Tiempo de ida [S]	0.386	0.382	0.400
Área frontal [mm ²]	78.5	113.1	201.1	Tiempo de vuelta [s]	0.378	0.395	0.430

Área trasera [mm ²]	66.0	84.8	172.8	Tiempo total [s]	0.764	0.777	0.830
------------------------------------	------	------	-------	---------------------	-------	-------	-------

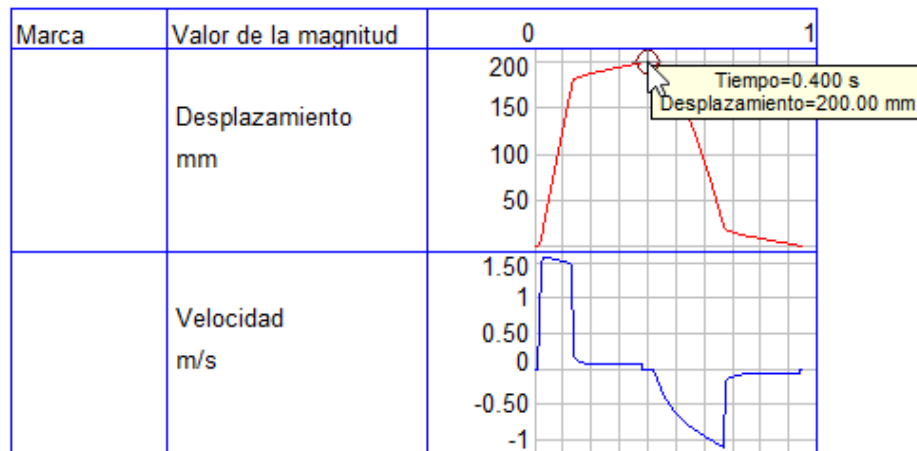


Figura 25: Ejemplo de los datos de salida de la simulación en FESTO FluidSim para un diámetro de émbolo de 16 [mm], 6 [mm] de vástago y 200 [mm] de carrera.

Como se observa en la **Error! Reference source not found.**, los 3 modelos simulados cumplen con el tiempo mínimo de muestreo establecido (2 segundos), sin embargo, el actuador con diámetro de émbolo de 16 [mm] logra un tiempo “más céntrico” en el intervalo adecuado de muestreo. Así, las características del cilindro elegido son:

Tabla 9: Parámetros elegidos para el actuador a partir de las simulaciones.

Tipo	Ø Émbolo	Ø Vástago	Carrera
Neumático, Doble efecto.	16 mm	6 mm	200 mm



Figura 26: Cilindro neumático marca SMC modelo C85.

4.2.3 Porta Filtro

El elemento que porta los filtros encargados de atrapar las partículas de MP no es el vástago del actuador neumático en sí, más bien es una extensión de este.

Producto de la combustión ocurrida en el motor en operación, los gases de escape vienen con temperaturas sobre los 400 [°C], por lo que es necesario que el material del portador de los filtros sea resistente a estas altas temperaturas de trabajo y además tenga un sistema que porte a los filtros sin alterar el muestreo de las partículas de MP.

La unión entre el vástago del actuador y el vástago porta filtros (denominado así por considerarse una ‘extensión’ del vástago del actuador), es mediante una rosca que se encuentra condicionada por el diámetro del vástago del actuador. El material elegido para este elemento es el acero 304 inoxidable, gracias a las características de este acero el vástago porta filtros, que tiene contacto directo con los gases de escape, es capaz de resistir altas temperaturas de muestreo.

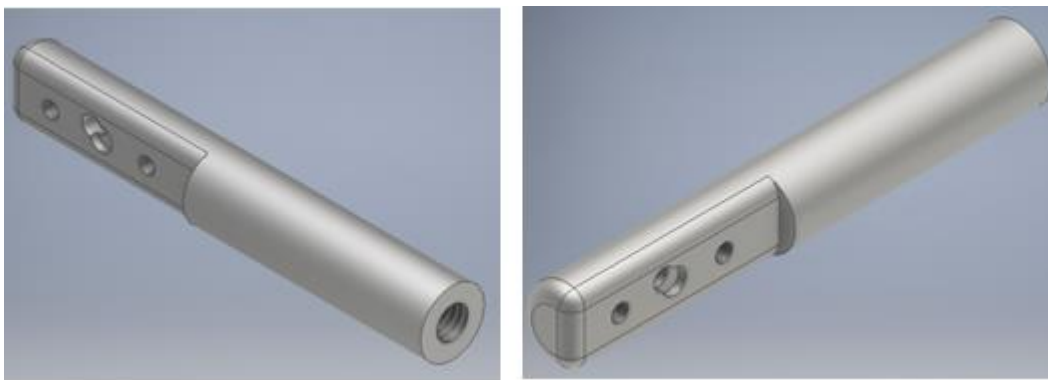


Figura 27: Porta filtro que se acopla al final del vástago del cilindro.
En Anexos se detallan las dimensiones de este componente en planos.

4.2.4 Electroválvula

La entrada y salida del vástago del cilindro es controlado por una electroválvula de 5/2 (5 vías y 2 posiciones) normalmente cerrada (NC), donde la conmutación de la válvula es controlada por dos solenoides conectados al dispositivo programable. Mediante el código de programación del dispositivo se pueden entregar condiciones para conmutar cualquiera de las dos posiciones de la válvula mediante una señal lógica al solenoide, y así efectuar el movimiento del cilindro.

El modelo de electroválvula elegido es el LK14 de la serie VUVG de la marca Festo por la confiabilidad que entrega Festo en sus productos y por su facilidad de instalación.



Figura 28: Electroválvula Festo 5/2 utilizada para mover actuador neumático.

4.2.1 Pulsador

El pulsador es el aparato que permite el accionamiento manual que da inicio al muestro de la sonda Termoforética, en pocas palabras este es un interruptor eléctrico (ver Figura 29) que cuando está apagado no pasa corriente, interpretándose la señal digital como un 'LOW' o '0' en código binario, o un rango de voltaje entre 0 y 7,2 [V] y cuando se presiona éste deja pasar corriente, interpretándose como un 'HIGH' o '1' en código binario o un rango de voltaje entre 18 y 26,4 [V].

Este pulsador está conectado al Controllino y es junto al sensor magnético los encargados de comenzar el muestreo. Cabe destacar que el pulsador es el único método manual para iniciar el muestreo, por ende, es importante que esté al alcance de la persona que conecta la sonda al sistema de entrada.



Figura 29: Pulsador eléctrico que da inicio a la entrada de la sonda al tubo de escape.

4.2.1 Sensor magnético de carrera

El sensor magnético es el encargado de detectar el final de carrera del cilindro mediante un imán dentro del émbolo; cuando el imán pasa por el sensor, dentro de éste entran en contacto dos elementos ferromagnéticos que cierran el circuito y se genera una señal digital a través de código binario (0 o 1) que es una entrada al Controllino.

Se utiliza un sensor magnético para detectar cuando el vástago esté extendido (dentro del tubo de escape). El sensor magnético junto al pulsador corresponden a las dos señales encargadas de dar inicio al muestreo.



Figura 30: Sensor magnético de final de carrera.

4.2.2 Control lógico de la sonda

El muestreo Termoforético se inicia con un pulsador (interruptor), sin embargo, ésta no es la única señal digital que controla el inicio del muestreo, sino también se deben dar condiciones con los sensores de finales de carrera que detectan si el vástago está dentro o fuera. Así, presionar el pulsador y que el vástago esté completamente retraído conforman las entradas digitales a procesar.

El dispositivo Controllino, como el que se observa en la Figura 31, es un tipo de PLC listo para la industria, libremente programable. Se basa en la tecnología de software de código abierto Arduino. Puede servir virtualmente para cualquier propósito de control, automatización y registro de datos.



Figura 31: Microcontrolador CONTROLLINO MINI que permite controlar señales analógicas y digitales.

Este dispositivo admite una cantidad de señales de entrada o “inputs” que al ser procesadas en el código tienen salidas o “outputs”; que comandan los solenoides para conmutar la válvula. Las entradas en este caso son dos: el sensor de final de carrera y el pulsador, mientras que las salidas corresponden a los dos solenoides (uno en cada posición de la válvula).

Este dispositivo necesita una alimentación de 24 [V] cuando esté funcionando en la sonda Termoforética. Para pasar el código Arduino al Controllino se realiza a través de un cable USB conectando el Controllino con un PC de escritorio o notebook que posea un software para escribir el código, para este trabajo de título se ocupa el software Arduino IDE.

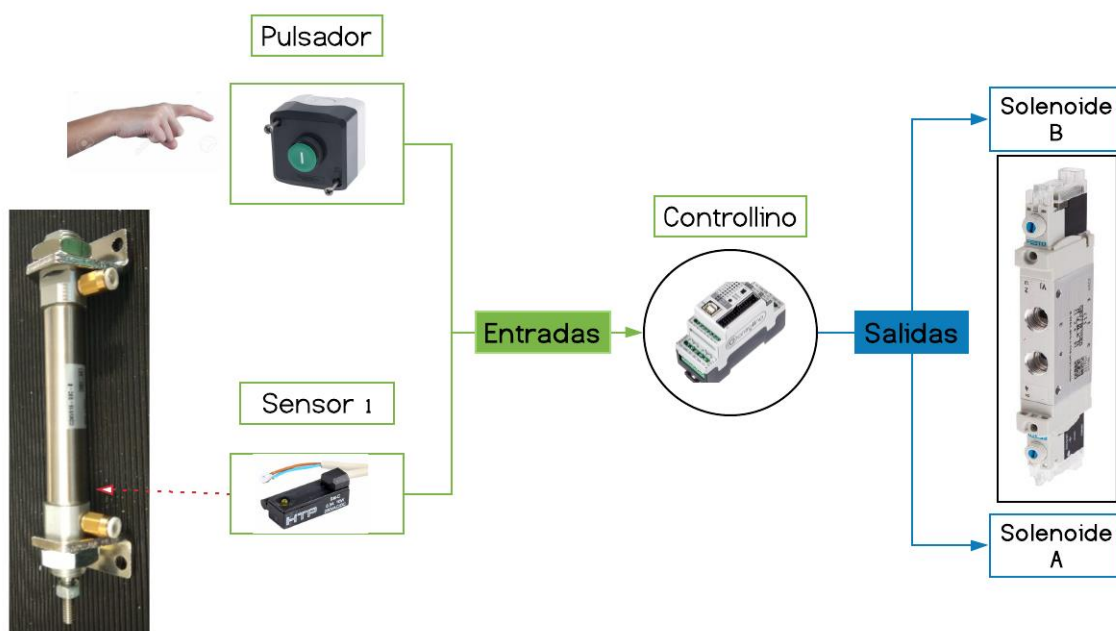


Figura 32: Representación de las entradas y salidas digitales del Controllino.

El código se escribe para programar la entrada y la salida de la sonda Termoforética, consiste en cuatro estados posibles, los primeros dos estados aseguran que el vástago retorne al cuerpo independiente de la posición que tenga y el tercer estado es la posición en equilibrio a la espera de iniciar el muestreo, que es el último estado:

1. Estado 1: Retornar el vástago cuando está completamente extendido.
2. Estado 2: Retornar el vástago cuando está extendido, pero no completamente.
3. Estado 3: Mantener el vástago dentro del cuerpo una vez que esté retraído.
4. Estado 4: Realizar muestreo y volver de acuerdo al tiempo establecido.

4.2.3 Resistencia Pull-Down

Como se menciona antes, el pulsador junto al sensor son las dos entradas digitales al Controllino que serán interpretadas como '0' o '1' en el código Arduino dependiendo de las condiciones. Concretamente, lo que recibe el Controllino es un voltaje que al estar entre 0 y 7,2 [V] se interpreta como un '0' y si está entre 18 y 26,4 [V], como un '1'. En algunos casos (dependiendo de la configuración y elementos del circuito) si el circuito no está aterrizado (conectado a GROUND) puede quedar electrizado y esto conlleva a que los voltajes de estas señales digitales se alteren y puedan tener valores fuera de estos dos rangos de voltajes que representan valores lógicos en el código. Para esto se utiliza una resistencia "PULL DOWN", la cual establece un estado lógico 'LOW' o '0' cuando el circuito está en estado de reposo, esto evita los falsos estados que se producen por el ruido generado por los circuitos electrónicos.

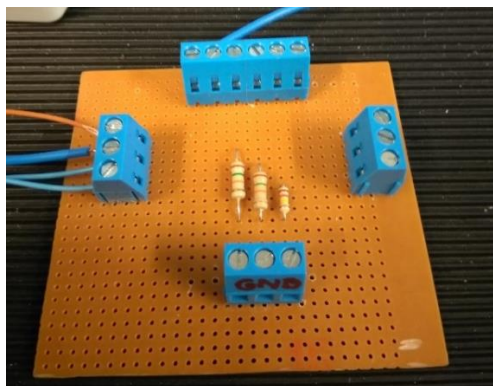


Figura 33: Resistencia Pull-Down, encargada de mantener el circuito de la unidad Termoforética a voltaje cero para no alterar las señales.

4.3 Entrada al Tubo de Escape

4.3.1 Introducción

El sistema de entrada al tubo de escape es el encargado de permitir la conexión y el ingreso del porta filtro al centro del tubo de escape para tomar la muestra de MP. Este sistema tiene principalmente dos componentes: la válvula de bola y la unión americana. En la Figura 34 se observa el sistema de entrada completo mediante una vista explosionada, en ella también se incluye los conectores hidráulicos que sirven para acoplar los diferentes elementos (la unión americana al cilindro, la unión americana a la válvula y la válvula al tubo de escape). El componente 1 corresponde a la válvula de bola que restringe el contacto de los gases de escape con el sistema de muestreo cuando se están estableciendo las condiciones del motor, mientras que el componente 2 corresponde a una unión americana que permite conectar la sonda a la válvula de bola sin tener que girar el cilindro y sus conexiones neumáticas.

En la Figura 35 se presenta el diseño en el software Inventor del sistema de entrada ensamblado con la sonda conectada mediante la unión americana y el vástago extendido mostrando el porta filtro ya posicionado al centro del tubo de escape, este último no se muestra en las figuras para efectos de una mejor visualización de la entrada del porta filtro al tubo.

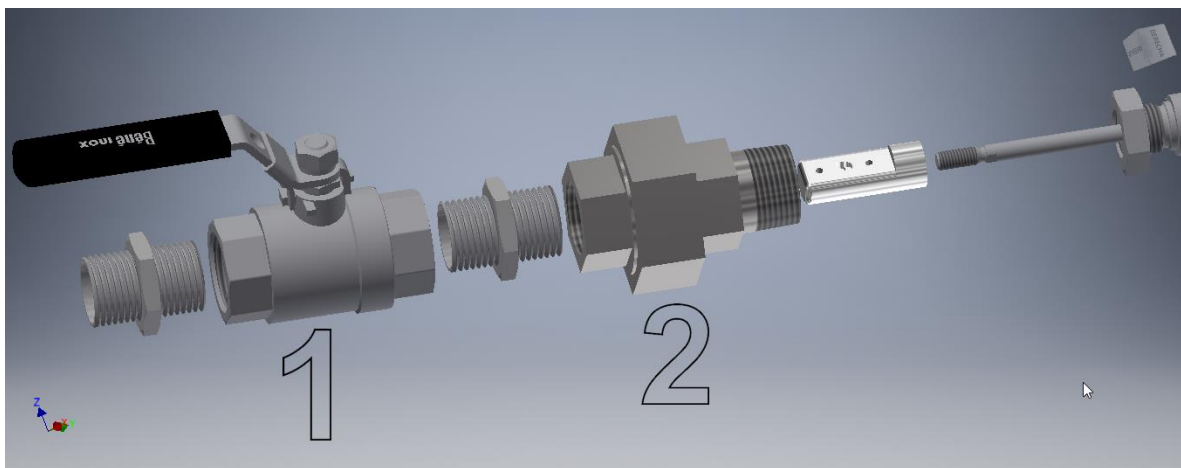


Figura 34: Vista explosionada del sistema de entrada al tubo de escape compuesta por una válvula de bola (1), una unión americana (2) y conectores roscados para unir los componentes.

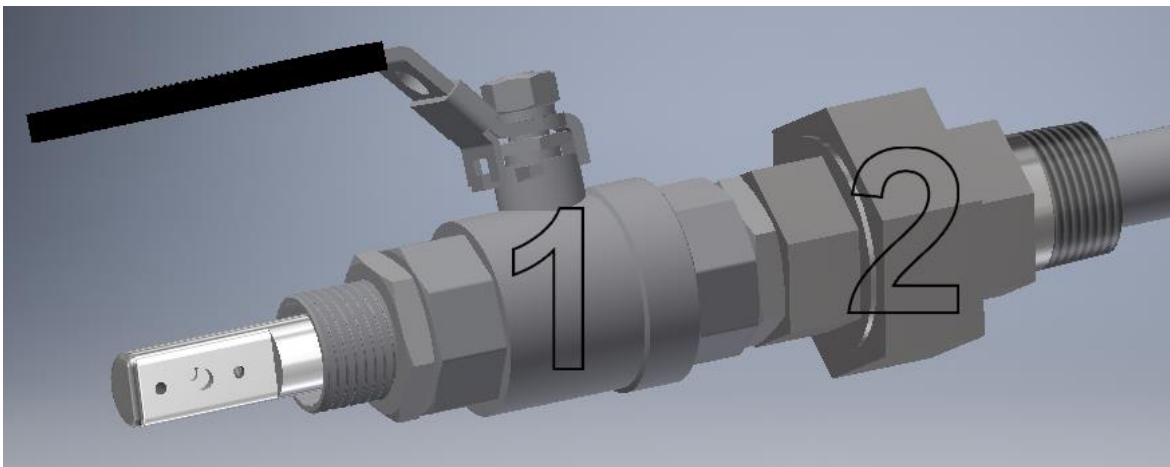


Figura 35: Vista del sistema de entrada ensamblado con el vástago extendido y el portfiltro ya dentro del tubo (omitido para efectos de visualizar la exposición del filtro).

A continuación, se detallan los componentes mencionados anteriormente:

4.3.2 Válvula de Bola

La función de la válvula de bola es restringir el contacto de los gases de escape con el exterior, es decir, restringir el contacto de los gases con el porta filtro (y, por ende, el filtro mismo) cuando la sonda esté conectada mientras se está esperando las condiciones deseadas del motor antes del muestreo y restringir la salida de los gases cuando la sonda no esté conectada y el motor esté encendido para ser utilizado con otros propósitos en el laboratorio.

En la industria chilena se encuentran varios modelos de válvulas de bola para distintos propósitos (alta/baja presión, alta/baja temperatura, fluido de trabajo, n° de vías, n° de cuerpos, entre otros), para este trabajo se utiliza una válvula de bola de acero inoxidable de 2 cuerpos, paso total y ambos lados con rosca de $\frac{3}{4}$ pulgadas o en 19,05 [mm] en SI, este valor es relevante pues restringe el diámetro del porta filtro que pasará a través de la válvula. Es importante que la válvula que se utilice sea resistente a las temperaturas de trabajo del tubo (cercanas a 400 [°C] en un punto específico a realizar el muestreo).

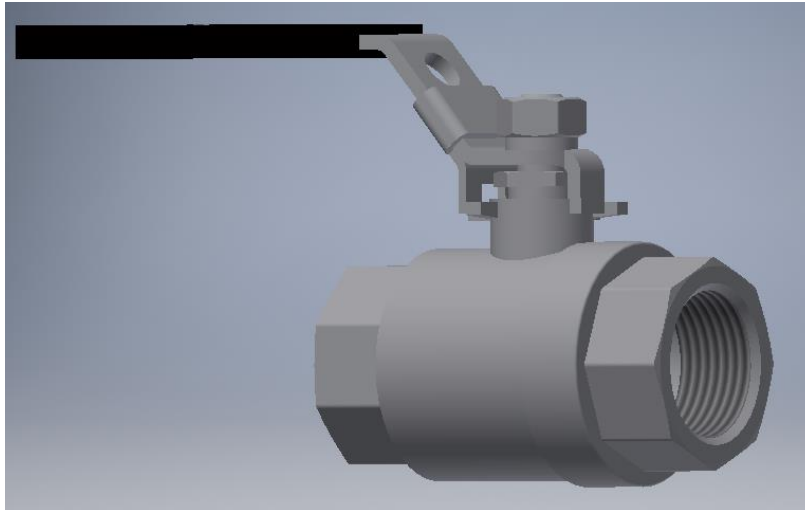


Figura 36: Válvula de bola encargada de permitir el acceso de la sonda al tubo de escape.

4.3.3 Unión Americana

La unión americana es un elemento hidráulico que permite unir la sonda Termoforética a la válvula de bola. La mayor particularidad de la unión americana es que permite conectar la sonda a la válvula sin la necesidad de girar ninguno de los 2 elementos, así no se manipula la válvula que tendrá una alta temperatura producto del contacto con el tubo de escape ni tampoco se gira la sonda con sus conexiones neumáticas que podrían dañar el suministro de aire.

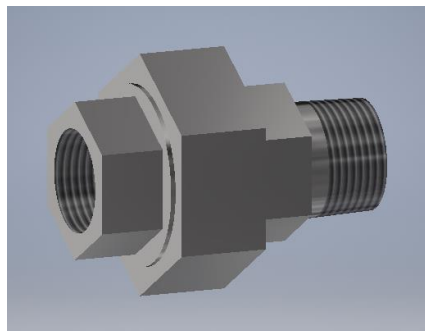


Figura 37: Unión americana que permite conectar la sonda con la válvula de bola.

4.3.4 Conectores Roscados

Dentro de los elementos que componen el sistema de entrada al tubo de escape, los conectores roscados tienen la función de unir los componentes principales de este sistema (válvula de

bola y unión americana), también tienen las características de resistencia a altas temperaturas y ser de acero inoxidable.

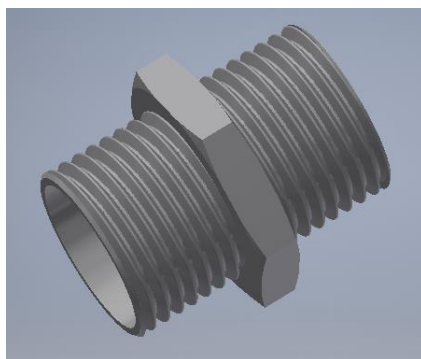


Figura 38: Conector hidráulico.

4.4 Caja contenedora del sistema de muestreo

Como el sistema de muestreo contiene elementos electrónicos delicados (como la resistencia Pull Down, que es una placa con un circuito impreso y con los puertos de conexión, el Controllino, los solenoides, entre otros), y otros elementos con masas considerables (como los conectores de acero inoxidable y la válvula de bola), es necesario diseñar una caja que permita contener todos estos elementos de forma seccionada que permita el transporte de todo el sistema sin que se toquen entre sí y que también favorezca el muestreo de forma cómoda. La Figura 39 muestra un diseño a mano de una caja que tiene cavidades de diferentes dimensiones pensadas para cada elemento anteriormente descrito, notar que la caja tiene una abertura en pendiente que permite distribuir de forma eficiente el espacio para poder dejar el control manual (botón) accesible al usuario y también ver qué entradas y salidas se activan en el panel de luces del Controllino, además de las entradas neumáticas de la sonda.

Para estabilizar la presión de trabajo del circuito neumático independiente del compresor a utilizar, se utiliza un regulador de presión con filtro marca Festo que permite regular la presión de entrada a una presión de salida máxima de 14 [bar]. Como antes se menciona, la presión de trabajo es de 6 [bar] y si bien el compresor tiene un regulador, al colocar un filtro regulador de presión cerca de la electroválvula se eliminan las pérdidas de presión que ocurren por las dimensiones de la manguera que conecta el compresor al filtro y sólo se cuentan las pérdidas de presión por el largo de las mangueras de 4 [mm] de diámetro que van al cilindro.

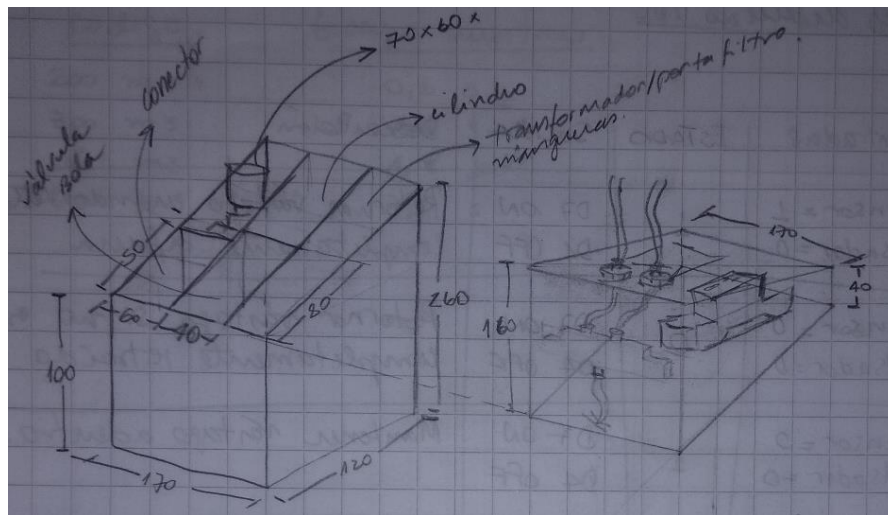


Figura 39: Diseño a mano de la caja que contendrá todos los elementos del sistema de muestreo de forma seccionada sin contacto entre ellos.

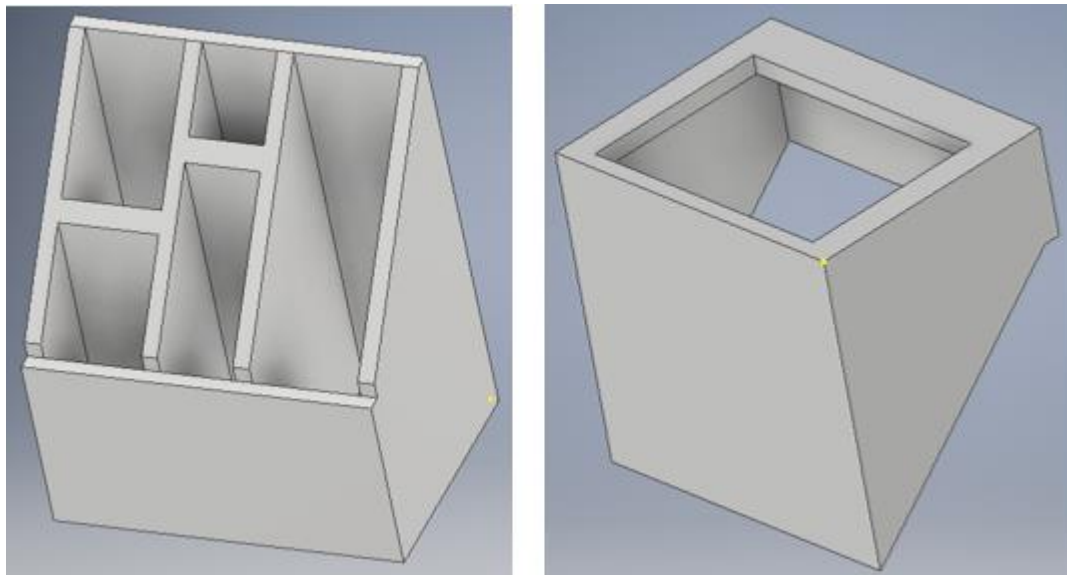


Figura 40: Diseño en software Inventor de la parte inferior de la caja contenedora de los elementos de acero (izq.) y de la parte superior (der.) que contendrá los elementos del control de la sonda.

5. Construcción y Puesta en Marcha del sistema de muestreo

5.1 Construcción entrada al tubo de escape

La construcción del sistema de muestreo Termoforético comienza con el sistema de entrada, específicamente la unión del conector hidráulico con hilo de $\frac{3}{4}$ pulgadas al tubo de escape, mediante este conector la sonda pasa a través de la válvula de bola y llega al centro del flujo de gases de escape (Figura 41), la longitud final del conector soldado al tubo es una restricción futura para la longitud del porta filtro, así como también la longitud del sistema de entrada completo (conector cilindro-americana, conector americana y válvula de bola).



Figura 41: Unión americana conectada a la válvula de bola unida al conector soldado al tubo de escape, todos estos componen el sistema de entrada de la sonda Termoforética.

Una vez que el conector roscado se encuentra soldado al tubo de escape, se conecta la válvula de bola con la unión americana y así se tiene la distancia mínima que debe recorrer el filtro para quedar en el centro del tubo de escape, también se tiene la distancia máxima que puede recorrer el filtro, la cual es el recorrido del cilindro neumático, 200 [mm]. Con estas dos restricciones se procede a construir el conector roscado que unirá el cilindro con la unión americana y que además protege al porta filtro cuando vuelva del tubo con la muestra. El material es acero inoxidable de forma tal que pueda resistir las altas temperaturas que podrían alcanzarse por el contacto con el tubo de escape mediante conducción principalmente.

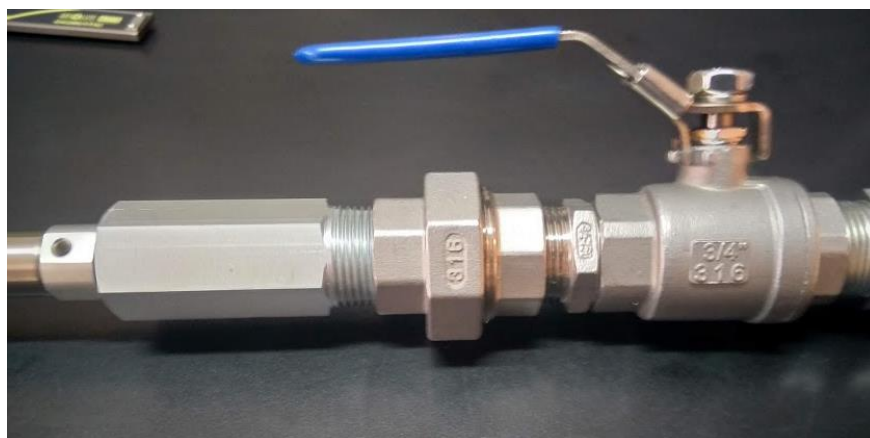


Figura 42: De izquierda a derecha, cilindro-conector roscado-uni3n-v3lvula de bola.

5.2 Construcci3n Sonda Termofor3tica

5.2.1 Porta filtro

Una vez conocida la distancia total desde el cilindro hasta el centro del tubo de escape, pasando por el conector cilindro, la uni3n americana, la v3lvula y el conector soldado al tubo, se despeja la 3ltima restricci3n: la longitud del porta filtro. El material de construcci3n es acero inoxidable, de esta forma puede resistir el contacto con los gases a temperaturas sobre los 300[°C]. En la secci3n Anexos se adjunta los planos del dise1o del porta filtro.

Como se observa en la Figura 43, el porta filtro posee dos agujeros roscados M4 para fijar una placa sobre el filtro para evitar su desprendimiento del agujero del centro, notar tambi3n que el agujero del filtro posee un agujero m3s profundo pero de menor di3metro para tener mayor acceso al filtro para depositarlo antes del muestreo y para retirarlo despu3s del muestreo con mayor facilidad.



Figura 43: Porta filtro construido con acero inoxidable.



Figura 44: Rosca hembra M6 x 1.0 del porta filtro para conectarse al vástago del cilindro neumático.

5.2.2 Conexiones neumáticas y sensor magnético

Las conexiones neumáticas del cilindro son roscadas M5 y van conectadas a la electroválvula que tiene entradas roscadas G 1/8 mediante una manguera de 4 [mm] de diámetro de poliuretano. La longitud de estas mangueras debe permitir al usuario conectar la sonda a la altura del tubo y controlar la entrada de la sonda con el botón desde el piso, así como también la longitud del cable del sensor magnético no debe dificultar el muestreo a la altura del tubo.



Figura 45: Sección del tubo de escape (flecha) donde entra la sonda Termoforética, notar que el punto de muestreo está en altura respecto al suelo del laboratorio.

5.2.3 Alimentación eléctrica

Durante la construcción del porta filtro se trabaja con los elementos que hasta ese momento conforman el sistema de muestreo, para esto se conecta el Controllino y la resistencia Pull Down (que a su vez alimenta al pulsador y al sensor) a una fuente de poder variable en donde se pudo determinar cuántos amperes ocupa el sistema a 24[V] como se muestra en la Figura 46. En la industria no existe una fuente de poder de 24 [V] con tan baja corriente, pero se compra una fuente de poder con 24 [V] y 1 [A], la cual bastará para alimentar el circuito.



Figura 46: Fuente de poder variable que permite determinar la corriente que utiliza el circuito del sistema de muestreo. Notar los valores de la corriente y el voltaje, respectivamente.

5.3 Construcción de la caja contenedora del sistema de muestreo

Se decide que el material de la caja contenedora fuera de acrílico para así darle un carácter más académico y los futuros alumnos usuarios puedan observar fácilmente cómo está constituido este sistema de muestreo y cómo funciona. La construcción se hizo en colaboración con un centro de diseño en acrílico que acoge todos los requerimientos específicos de los planos en cuanto a las dimensiones y forma. En las siguientes figuras (Figura 47 a Figura 50) se muestran el resultado de este trabajo, notar que el regulador de presión no se mueve de su posición en ningún momento, pudiendo conectar la manguera del compresor en la misma caja contenedora y el regulador le entrega aire a la electroválvula mediante una manguera interna en la caja que no impide la abertura de ésta.



Figura 47: Vista frontal de la parte inferior de la caja contenedora durante su construcción con cada elemento en su cavidad respectivamente.

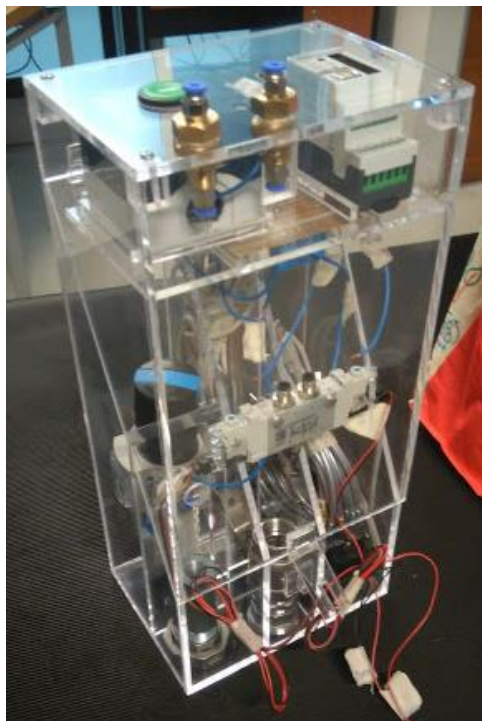


Figura 48: Vista general de la caja contenedora previo a conectar sus elementos electrónicos.

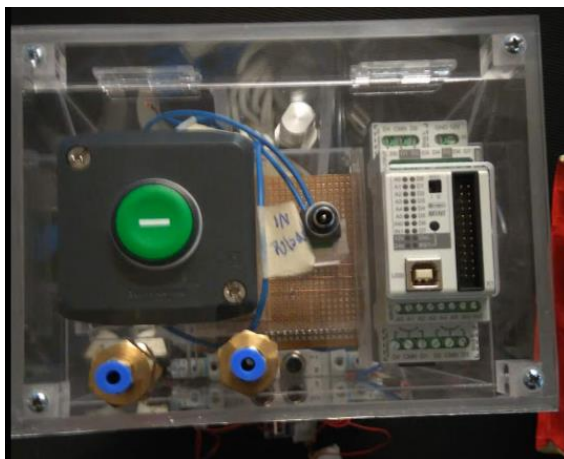


Figura 49: Vista superior de la caja contenedora, se observa el pulsador verde, las dos conexiones neumáticas para la sonda, la conexión de la fuente eléctrica y el panel de luces del Controllino.

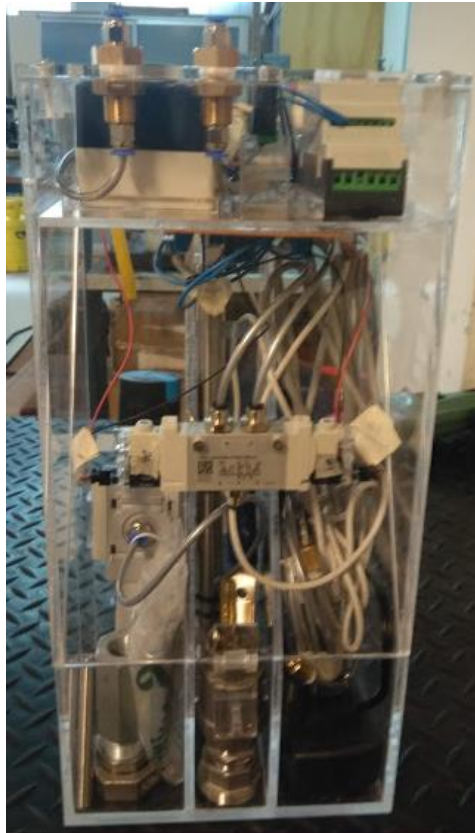


Figura 50: Vista frontal de la caja contenedora una vez conectado todo el sistema electrónico, y los elementos de acero guardados dentro.

5.4 Puesta en marcha del sistema de muestreo

Como se menciona anteriormente, el sistema de muestreo se utiliza de manera preliminar durante la construcción del porta filtro para dimensionar los parámetros de la alimentación eléctrica, sin embargo, aún no se ha determinado un tiempo de muestreo específico pues este depende del régimen del motor (% de carga y revoluciones) , el combustible que se utiliza (en este caso Diesel pero también podría ser Biodiesel), la presión de trabajo y sobre todo de los procesos partícula a partícula (mencionados anteriormente) que se pueden llevar a cabo durante el viaje de las partículas en los gases de escape. Esto se determina mediante prueba y error, es decir, realizando muestreos a diferentes regímenes del motor y observando con un TEM si la cantidad de partículas o el modo de presentación de éstas es suficiente para su estudio morfológico o cualquier otro.

Sin embargo, es posible determinar mediante la simulación de un muestreo el tiempo de exposición real que tiene el filtro cuando tiene contacto con el flujo de gases y así entregar una relación entre el tiempo que se especifica en el código del Controllino y el tiempo real de exposición del filtro a los gases de escape. Para esto se lleva a cabo pruebas de inmersión de la sonda en un perímetro que representa el tubo de escape con una marca en su centro geométrico y se graba con una cámara lenta. Posteriormente con la ayuda de un software de reproducción de videos se procesar el vídeo y se observa cuadro por cuadro el ingreso, la permanencia y la salida del porta filtro.



Figura 51: Prueba de tiempo de exposición del filtro, notar que en el perímetro que representa el tubo de escape tiene marcado el centro geométrico donde debe posicionarse el filtro.

Tabla 10: Relación entre tiempo escrito en el código y el tiempo real de exposición del filtro a una presión de 6 [bar].

Tiempo de Delay en el código [ms]	Tiempo real de muestreo [s]
200	0.6
300	1.0
400	1.4
500	1.8

La explicación de porqué el tiempo que se especifica en el código del Controllino es menor al tiempo real de exposición es porque el tiempo real de muestreo considera el tiempo de ida y vuelta del vástago (solamente cuando el filtro está dentro del tubo), tiempos que no están contabilizados en el código, pues el tiempo de delay es sólo un retraso en la conmutación de

la electroválvula una vez que el sensor detecta el émbolo y esto ocurre cuando el vástago está completamente extendido. Además, se deben considerar los tiempos de respuesta que tiene cada elemento electrónico, es decir, cuando se presiona el botón de accionamiento manual del muestreo existe un tiempo de respuesta del pulsador, del Controllino, de los solenoides y de la conmutación de la válvula que agregan más tiempo a la permanencia del filtro dentro del tubo. Por lo que es necesario dejar una relación entre estos tiempos a una presión de trabajo determinado para los usuarios de este sistema de muestreo.

6. Resultados

Para realizar el muestreo de las partículas es necesario tener en cuenta el régimen de trabajo del motor, es decir el par motor y las revoluciones como también el tiempo de muestreo. Combinando diferentes regímenes para diferentes tiempos de muestreos probablemente entreguen resultados muy variados, es por esto que se deben modificar levemente ambas variables para obtener un muestreo adecuado.

Una vez que se obtiene la muestra de MP, esta se lleva a un microscopio electrónico de transmisión y se observan las distribuciones de tamaño, morfología y composición química. Como se menciona anteriormente, el objetivo académico del sistema de muestreo termoforético es para poder caracterizar las partículas Diésel. Durante su viaje a la Universidad de Antioquia, Alán Ordoñez, el estudiante que debe caracterizar las muestras obtenidas con la sonda termoforética en el laboratorio de termo-hidráulica del campus San Joaquín, obtuvo muestras de MP para un motor BioDiesel que tienen en Colombia. A continuación se muestran los resultados obtenidos, notar la similitud entre la teoría mostrada en la Figura 1 y los resultados obtenidos por Alan en Colombia. Para ayudar el análisis de los aglomerados y medición de las partículas se elimina el fondo (background) de la micrografía con el software ImageJ.

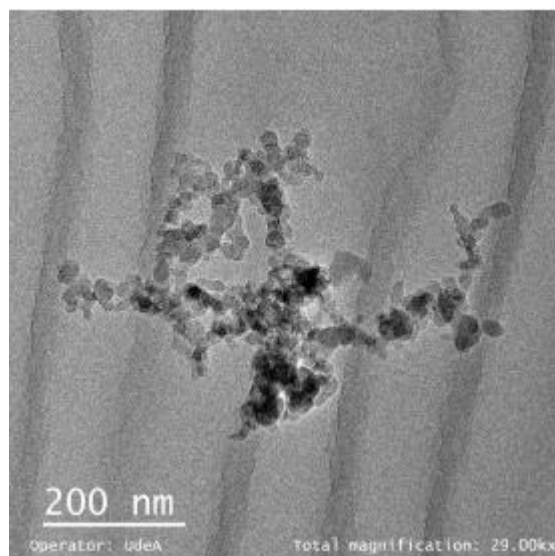


Figura 52: Micrografía de un aglomerado de MP a 29K de aumento.

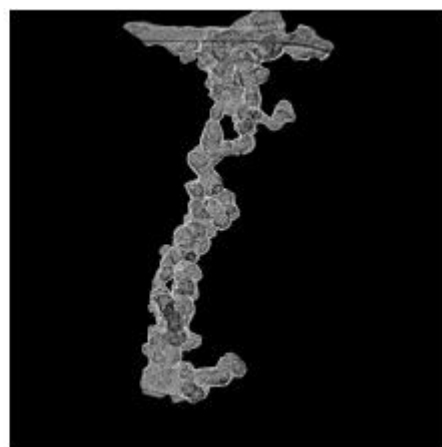
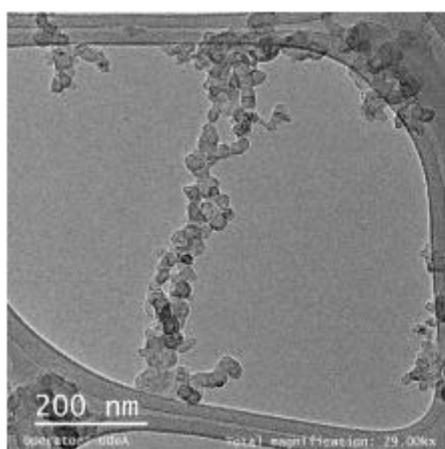


Figura 53: Eliminación del background de la micrografía del aglomerado para el análisis de estructuras y la diferenciación de tamaños.

7. Conclusiones

La importancia de estudiar las partículas de MP y restringir su emisión a la atmósfera radica en la relación de este aerosol con enfermedades cardiorrespiratorias en humanos y la actual creciente contaminación atmosférica en ciudades con altas emisiones vehiculares.

Durante su viaje por el tubo de escape, las partículas de los gases de la combustión de un motor Diésel cambian sus propiedades morfológicas producto de la interacción con su medio (termofóresis, deposición electrostática), con las demás partículas (impacto inercial, reacción química) o ambas (difusión, coagulación), todos estos ejemplos son conocidos como ‘procesos de partícula a partícula’ y deben ser considerados al momento de diseñar un sistema de muestreo de estas partículas.

Como se menciona anteriormente, el Material particulado se puede considerar como una ‘mezcla de mezclas’ debido a las diferentes partículas atmosféricas primarias (directamente de la fuente) que reaccionan formando estas partículas secundarias de baja volatilidad que condensan a fase líquida o incluso sólida quedando suspendidas en el aire. Sin embargo, es posible caracterizar una muestra de MP de forma química, separándola en las diferentes fracciones descritas o también según las características físicas que presenten las partículas, encontrándose los ‘modos’ (grueso, acumulación, nucleación) y según la dosimetría basada en el diámetro aerodinámico (MP_{10} , $MP_{2.5}$ MP_1).

Para un motor Diésel sus gases de escape están compuestos mayormente por la fracción orgánica, compuesta mayormente de hidrocarburos aromáticos policíclicos provenientes de aceites lubricantes derivados de hidrocarburos y la fracción carbonosa compuesta mayormente de carbón y que también se denomina hollín.

Las diferentes características que se pueden estudiar de las partículas ha conllevado a complejos métodos y diferentes instrumentos que ayudan al estudio y caracterización del MP tanto en laboratorio mediante dinamómetros de motor o de chasis, como en ruta con los mencionados PEMS. Si bien las pruebas de medición en ruta aportan diferentes beneficios (más cercano al régimen de un motor, más económico, entre otros), las pruebas en laboratorio entregan resultados con menos variación debido a que se pueden contralar más fácil las

variables físicas (revoluciones, torque, temperatura, entre otras) y desde un aspecto teórico más cercana a lo que describen diferentes autores.

Actualmente existen diferentes usos y estudios que involucran termofóresis y el estudio de partículas en combustión, como es el caso de la Universidad de Toronto, sin embargo para este Trabajo de Título la producción de las partículas de estudio no está a cargo de un instrumento diseñado exclusivamente para eso como es el caso de la Universidad de Linköping que crea su propio hollín con un instrumento para captarlo mediante deposición electrostática en una sonda. La producción de MP será a cargo de un dinamómetro de motor Diésel bajo diferentes regímenes de carga y revoluciones.

A partir del diseño y posterior construcción de una sonda que captura partículas Diésel desde el tubo de escape de un MCI mediante Termofóresis, se concluye la factibilidad de crear un sistema de muestreo de Material Particulado que bajo un gradiente de temperatura logra que las partículas se depositen sin impactarse en un filtro gravimétrico para su posterior análisis. La captura de estas partículas se realiza en el centro geométrico del tubo de escape que está en altura dentro de la sala acondicionada del Laboratorio Termo-Hidráulico de la UTFSM Campus Santiago San Joaquín donde se encuentra el motor.

Con respecto a la selección de los proveedores de los componentes del sistema de muestreo, se concluye que la elección de comprar la mayoría de los elementos neumáticos y electrónicos (cilindro, electroválvula, regulador, pulsador, sensor, entre otros.) a un proveedor internacional mediante el contacto de un representante nacional conlleva la posibilidad de imprevistos relacionados con el traslado aéreo de estos componentes, que puede significar un atraso considerable en el desarrollo del proyecto y se debe tener considerado en la planificación de las actividades.

De acuerdo a las diferentes formas de caracterizar las partículas (distribución de tamaños, tamaños de dosimetrías, composición química, entre otras.), el sistema de muestreo Termoforético al ocupar un filtro gravimétrico para la deposición Termoforética de las partículas está utilizando la caracterización mediante el tamaño de partícula, es decir, las muestras que se obtienen con la sonda son de acuerdo al diámetro aerodinámico de cada partícula.

Como se menciona anteriormente, es importante tener en consideración los procesos que ocurren e partícula a partícula al momento de estudiar una muestra obtenida desde el tubo de escape, pues es en el viaje a través del tubo hasta la sonda en donde se intensifican estos fenómenos, ya sea por las diferentes curvas que tiene el tubo antes de llegar a la sonda que hace que choquen las partículas unas con otras generando coagulaciones o también por la deposición electroestática en las paredes del tubo debido a la carga eléctrica que traen las partículas producto de la combustión.

A partir del estudio de los diferentes usos actuales de la Termofóresis, es posible realizar algunas modificaciones a la sonda para mejorar la deposición de las partículas en el filtro gravimétrico mediante un sensor magnético en la punta de la sonda que aproveche también la deposición electroestática además de la fuerza Termoforética como se hizo en la Universidad de Linköping en Suecia o también aumentar la cantidad de filtros utilizados en el portafiltro por cada entrada de la sonda al tubo y así comparar entre ellos las distribuciones de tamaños encontradas como se hizo en la Universidad de Toronto.

8. Anexos

Tabla 11: Detalle de los costos de los elementos constituyentes del sistema de muestreo.

Componente	Cantidad [unid]	Costo total [\$]
Cilindro SMC modelo C85	1	50387
Sensor magnético	1	30881
Botón pulsador 24V	1	24159
Electroválvula Festo 5/2	1	77154
Conector aire cilindro - manguera (M5 - 4mm)	5	2488
Conector aire válvula - manguera (G1/8 - 4mm)	5	1918
Manguera 4 mm x 20 m	1	9102
Cable 0.5 mm	1	19734
Regulador de Presión/Filtro Festo	1	69392
Conectores Solenoides - Controllino	2	5142
Controllino MINI	1	122300
Adaptador regulador - manguera (G1/4 - 3/8)	1	6100
Conector roscado NPT 3/4 Acero inoxidable	2	2000
Broca cónica (agujero en tubo de escape)	1	12000
Fuente de Poder 24V - 1A	1	6990
Conector cilindro - conector americana	1	8400
Válvula de Bola + Conector americana	1	39800
Caja acrílico	1	49000
Porta filtro	1	12000
Conector 24V 5.5 mm	2	650
Conector hidráulico pasa muro + conector 4 mm	2	12250
Costo Total Sistema de muestreo Termoforético		561847

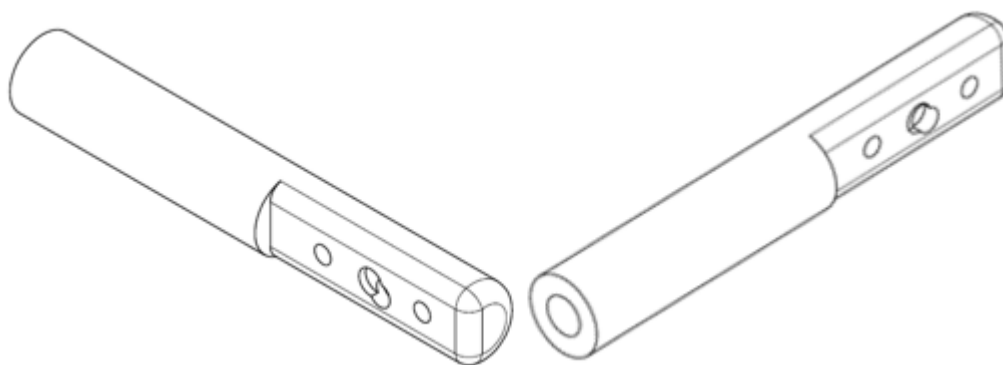


Figura 54: Vistas del portafiltro.

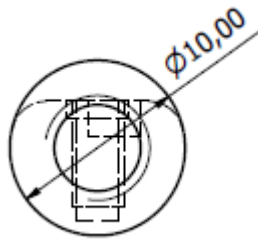


Figura 55: Sección transversal del portafiltro.

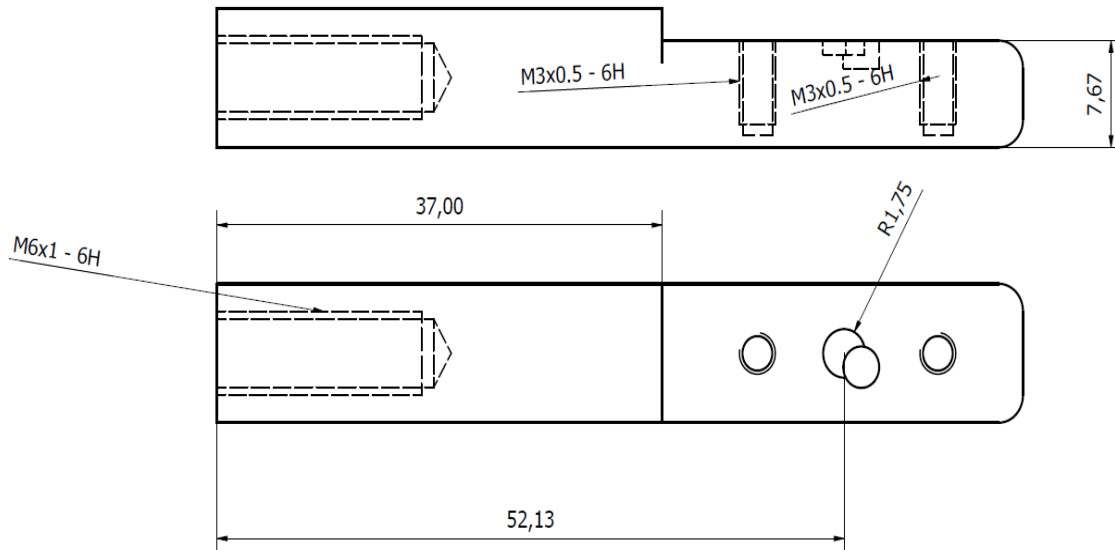


Figura 56: Dimensiones del portafiltro diseñado y construido para el sistema de muestreo.

9. Bibliografía

- [1] C. A. Pope III and D. W. Dockery, "Critical Review: Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 56, no. 6, pp. 709–742, 2006.
- [2] L. Larraguibel and R. O’Ryan, "Contaminación del Aire en Santiago: estado actual y soluciones," *Rev. Perspect. en Polit. Econ. y Gestión*, vol. 4, pp. 153–191, 2000.
- [3] DieselNet, "Emission Standards, EU: Cars and Light Trucks." [Online]. Available: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>.
- [4] D. B. Kittelson, W. F. Watts, and M. Arnold, "Review of Diesel Particle Particulate Matter Sampling Methods," p. 60, 1998.
- [5] H. Kittelson, D. B., Ambs, J. L., & Hadjkacem, "Particulate Emissions from Diesel Engines: Influence of In-Cylinder Surface.," *SAE Trans. J. Engines-V99-3*, p. 19, 1990.
- [6] and D. Y. H. P. Kittelson, D. B., K. C. Moon, "Diesel Particle Control with a Simple Electrostatic Trap," 860009, 1986.
- [7] L. D. Grant, "Air Quality Criteria for Particulate Matter," *Quality*, vol. I, no. October, p. 924, 2003.
- [8] P. Eastwood, *Particulate Emissions from Vehicles*. 2008.
- [9] K. T. Whitby, "The Physical Characteristics of Sulfur Aerosols," in *Atmospheric Environment*, 1978, pp. 135–159.
- [10] W. E. Wilson and H. H. Suh, "Fine particles and Coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 47, no. 12, pp. 1238–1249, 1997.
- [11] A. F. Barrales Soto, "Análisis y cuantificación de material particulado Diesel: Caracterización físico-química de partículas ultrafinas y modelación de emisiones producidas por vehículos fuera de ruta," Universidad de Chile, 2008.
- [12] A. I. Medalia and D. Rivin, "Particulate carbon and other components of soot and carbon black," *Carbon N. Y.*, vol. 20, no. 6, pp. 481–492, 1982.
- [13] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, vol. 21. 1988.
- [14] B. IGER, "The Data And Accuracy Implications Of Different Dynamometer Designs," 2018. [Online]. Available: <https://www.engine-labs.com/engine-tech/dyno-testing/data-accuracy-implications-different-dynamometer-designs/>.
- [15] AIP Company, "Portable Emissions Measurement System PEMS - GAS for gaseous emissions from diesel- and gasoline engines for particle numbers PEMS - GAS/PN for combined measurement Portable Emissions Measurement System PEMS-GAS for gaseous emissions from diesel- and gaso," p. 12, 2019.
- [16] M. Mehrvaran, "Thermophoretic transport and deposition of sub-micron particles suspended in gas flows," p. 152, 2013.
- [17] E. T. Hurtado, "Diseño, construcción y puesta a punto de un sistema de muestreo termoforético en el escape de un motor Diesel de automoción," Universidad de Castilla-La Mancha.

- [18] C.-Y. Wu, "Thermophoresis . Aerosol Science & Engineering." [Online]. Available: <https://aerosol.ees.ufl.edu/Thermophoresis/section01.html>.
- [19] M. Jerabek-Willemsen *et al.*, "MicroScale Thermophoresis: Interaction analysis and beyond," *J. Mol. Struct.*, vol. 1077, pp. 101–113, 2014.
- [20] A. Bjorklund, Robert; Lloyd Spetz, "Soot sensors for efficient combustion and low emissions," no. February, 2011.
- [21] A. M. Vargas, "Design and Development of a Thermophoretic Soot Sampling System for High-Pressure Laminar Diffusion by," University of Toronto, 2016.