



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA SONDA DE
MUESTREO POR TERMOFORÉISIS EN EL
ESCAPE DE UN MOTOR DE AUTOMOCIÓN**

Autor

Luis Alejandro Grajales Rojas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2019



**IMPLEMENTACIÓN DE UNA SONDA DE MUESTREO POR TERMOFORÉISIS
EN EL ESCAPE DE UN MOTOR DE AUTOMOCIÓN**

Luis Alejandro Grajales Rojas

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Asesor:
Andrés Felipe Agudelo Santamaría
Profesor de la facultad de ingeniería

Línea de Investigación:
Ciencias Térmicas
Grupo de Investigación:
GIMEL

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica.
Medellín, Colombia
2019

DEDICATORIA

A mis padres que han sido ejemplo de superación y me enseñaron a no tener temor de emprender grandes proyectos, a mis hermanos y familiares que me ayudaron durante el proceso de formación.

A mi esposa y mis hijos que son quienes me ayudan y alientan a completar este ciclo formativo.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores que durante la carrera han compartido su conocimiento y me han ayudado a desarrollar habilidades para identificar oportunidades e innovar.

De una forma especial quiero agradecer al grupo GIMEL por su acogida familiar y todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo. A los profesores Cristian Ávila Jiménez, Andrés Felipe Agudelo Santamaría, y John Ramiro Agudelo Santamaría, por su ayuda incondicional para la realización de esta tesis y el invaluable conocimiento compartido.

De todos ustedes estoy muy agradecido por ser mis benefactores.

Tabla de contenido

1. OBJETIVOS	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos	11
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Material particulado	11
2.2. Clasificación del material particulado	12
2.2.1. Partículas	12
2.2.2. Agregados	12
2.3. Principales métodos de muestreo de partículas	13
2.3.1. Túnel de dilución	13
2.3.2. Analizador electrostático de aerosol (EAA)	14
2.3.3. Impactador electrostático de baja presión (ELPI)	15
2.3.4. Escáner móvil de tamaño de partículas (SMPS)	15
2.3.5. Sonda termoforética	17
2.4. El fenómeno de la termoforésis	18
2.5. Aplicaciones de la termoforésis en combustión	19
2.5.1. Fenómenos de combustión en llama abierta	19
2.5.2. Recolección de material particulado en motores	19
2.6. Imágenes TEM y HRTEM	19
2.7. Programa para análisis de partículas	20
3. METODOLOGÍA	24
3.1. Diseño de la sonda	24
3.1.1. Condiciones de diseño	24
3.1.2. Condiciones de operación	25
3.2. Selección y diseño de los elementos de la sonda	26
3.2.1. Diseño del porta rejilla	26
3.2.2. Selección del actuador lineal	27
3.2.3. Selección del microcontrolador de la sonda	28
3.2.4. Selección de la electroválvula de la sonda	29

3.2.5.	Selección de la fuente de potencia	29
3.2.6.	Selección del contenedor para la sonda	30
3.3.	Fabricación de la sonda	31
3.3.1.	Conexiones eléctricas.....	32
3.3.2.	Conexiones neumáticas.....	33
3.3.2.	Secuencia de control del Controllino Mini	34
3.4.	Caracterización de la sonda.....	34
3.5.	Montaje de la sonda en el banco motor.....	35
3.6.	Pruebas de funcionalidad.....	38
3.6.1.	Selección de los modos de operación del motor.....	38
3.6.2.	Selección de los tiempos de exposición de las rejillas dentro del ducto	40
3.7.	Plan de ensayos	40
3.7.1.	Motor	40
3.7.2.	Sonda.....	40
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
4.1.	Validación de la sonda termoforética	41
4.2.	Toma de imágenes	41
4.3.	Diámetro de partícula primaria.....	42
4.4.	Análisis con el programa FRACTAL.....	43
5.	CONCLUSIONES	45
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
	ANEXOS.....	48
	Anexo 1. Imágenes TEM obtenidas	48
	Anexo 2 imágenes limpias para análisis con el programa FRACTAL.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencia de los elementos de la sonda termoforética.....	29
Tabla 2. Experimento a 3 bar	35
Tabla 3. Experimento a 3,5 bar	35
Tabla 4. Modos de operación.....	40

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 TEM de partículas a 20 nm.....	10
Ilustración 2 TEM de agregados a 20nm.....	11
Ilustración 3 Túnel de dilución del LMT UdeA.....	12
Ilustración 4 Esquema Analizador Electrostático de Aerosol.....	13
Ilustración 5 Diagrama del ELPI.....	14
Ilustración 6 Diagrama del SMPS.....	15
Ilustración 7 Rejilla de Termoforésis.....	16
Ilustración 8 Película "Lacey Carbon" (red de lasos)	16
Ilustración 9 Fenómeno de la Termoforésis.....	17
Ilustración 10 Microscopio Tecnai G2 F20 de FEI.....	19
Ilustración 11 Medición del diámetro primario de partícula en TEM_powerpoint...20	
Ilustración 12 información del archivo Data.....	21
Ilustración 13 Salida_analisis_fractal.....	21
Ilustración 14 Aglomerado lineal índice =1.....	22
Ilustración 15 Aglomerado plano con Índice de Df=2.....	22
Ilustración 16 Agregado volumétrico con índice Df=3.....	23
Ilustración 17 Explicación del radio de giro.....	23
Ilustración 18 Cámara climática del LMT UdeA.....	25
Ilustración 19 Porta Rejillas.....	26
Ilustración 20 Actuador Lineal Neumático.....	27
Ilustración 21 ControllinoMini.....	28
Ilustración 22 Electroválvula 5/2.....	29
Ilustración 23 Fuente de Potencia.....	30
Ilustración 24 Modelado 3D de los Componentes de la Sonda.....	31
Ilustración 25 Ensamble de la Sonda.....	31
Ilustración 26 Conexiones Eléctricas.....	33
Ilustración 27 Conexiones Neumáticas.....	34
Ilustración 28 Plano Neumático de la Sonda.....	34
Ilustración 29 Banco Motor del LMT UdeA.....	37
Ilustración 30 Selección del espacio de Instalación para la Sonda.....	38
Ilustración 31 Montaje de la Válvula al Ducto de Escape.....	38

Ilustración 32 Soporte en la Base del Banco Motor.....	39
Ilustración 33 Montaje del Final de Carrera en la Válvula.....	40
Ilustración 34 Potencia Específica Vehicular.....	41
Ilustración 35 Imagen TEM.....	43
Ilustración 36 Modo MP con B100.....	44
Ilustración 37 Modo AP con B100.....	44
Ilustración 38 Modo MP con B10.....	44
Ilustración 39 Modo AP con B10.....	45
Ilustración 40 Resultados Fractal Modo MP con B100.....	45
Ilustración 41 Resultados Fractal AP con B100.....	46
Ilustración 42 Resultados Fractal MP con B10.....	46
Ilustración 43 Resultados Fractal AP con B10.....	47

RESUMEN

Este trabajo describe el proceso de diseño, fabricación e implementación de una sonda termoforética para la captura de material particulado en del ducto de escape de un motor Diesel (Cummins ISF 2.8), en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad de Antioquia (LMT UdeA).

Se adapta esta tecnología para satisfacer la necesidad del grupo de investigación, con materiales existentes en el medio. Se fabricó y se puso en funcionamiento el equipo de muestreo. Se realizaron pruebas en un proyecto de investigación, en la cuales se tomaron muestras con la sonda, e imágenes TEM. Finalmente, se realizó el análisis de éstas, con la ayuda de software desarrollado por el grupo GIMEL.

INTRODUCCIÓN

La termoforésis, es ampliamente utilizada por los investigadores, para el muestreo de nano partículas presentes en diversos medios (aerosoles, gases de combustión en llama abierta y motores de combustión, aire, etc.) para su posterior análisis con microscopía de alta resolución; las partículas se recogen sobre una rejilla de cobre recubierta con una película de carbono donde éstas se adhieren [1,2].

Se han ideado varios dispositivos manuales y mecánicos que exponen la rejilla al medio donde capturan las partículas. Los más modernos son los electromecánicos, los cuales permiten controlar el tiempo de exposición de la rejilla para la captura de partículas.

En esta tesis de grado, se presenta el diseño, la fabricación e implementación de una sonda termoforética de accionamiento electro-neumático, controlada mediante un autómata programable, que muestrea en el ducto de escape de un banco motor. La sonda se diseñó a partir de materiales existentes en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad de Antioquia (LMT UdeA), y en el mercado local de la ciudad. Se construyó en el laboratorio con las herramientas existentes, se verificó su funcionalidad en el banco motor, se capturaron partículas en las rejillas, que luego se llevaron a microscopía TEM, con las cuales se validó el trabajo.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Se pudo obtener muestras de partículas de buena calidad, y los análisis posteriores de estas partículas fueron similares a los obtenidos por otros investigadores.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Implementar una sonda de muestreo por termoforésis en el escape de un motor diesel para la captura de partículas y su caracterización por imágenes TEM y HRTEM.

1.2. Objetivos específicos

- 1.2.1. Diseñar, fabricar e instalar una sonda termoforética en el sistema de escape de un motor Diesel montado en un banco de ensayos.
- 1.2.2. Validar la funcionalidad de la sonda durante el proceso de muestreo de material particulado.
- 1.2.3. Tomar imágenes TEM y HRTEM de las partículas y analizarlas con las herramientas de análisis desarrolladas por el grupo GIMEL.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Material particulado

Según la CARB (*California Air Resources Board*), el material particulado en el aire ("PM" – *Particulate Matter*, por sus siglas en inglés), no es un solo contaminante, sino que es una mezcla de muchas especies químicas. Es una mezcla compleja de sólidos y aerosoles, compuesta de pequeñas gotas de líquido, fragmentos sólidos secos, y núcleos sólidos con recubrimientos líquidos. Las partículas varían ampliamente en tamaño, forma y composición química, y pueden contener iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y compuestos de la corteza terrestre. Las partículas se clasifican según su diámetro para fines de regulación de la calidad del aire. Aquellos con un diámetro de 10 μm o menos (PM10) son inhalables a los pulmones y pueden inducir efectos adversos para la salud. Las partículas finas se definen como partículas de 2,5 μm o menos de diámetro (PM2.5). Por lo tanto, el PM2.5 comprende una porción de PM10 [3].

2.2. Clasificación del material particulado

2.2.1. Partículas

Las partículas se generan durante la combustión y se presentan en diversos tamaños y formas. El avance en la tecnología de los motores diesel lleva a generar partículas cada vez más pequeñas y más reactivas, debido a su tamaño cada vez menor. En motores Diesel, estas partículas se presentan con tamaños de 20 a 35 nm en promedio [2,4,5]. En la Ilustración 1 se aprecia la imagen TEM a 20 nm de una partícula producto de la combustión en el motor.

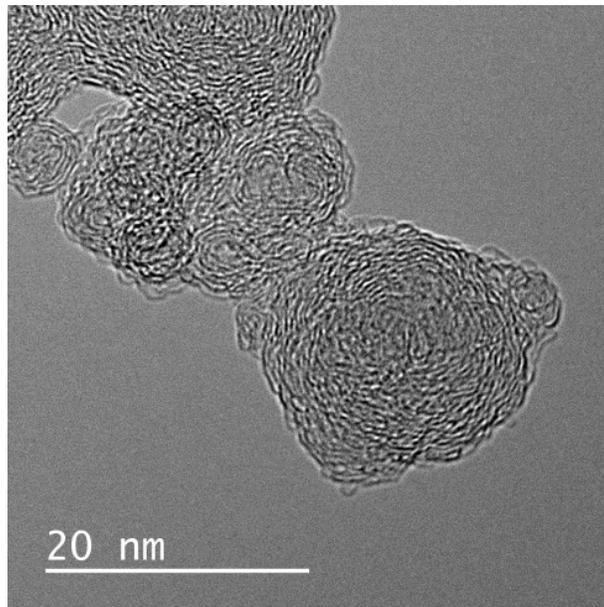


Ilustración 1. TEM de partículas a 20 nm

2.2.2. Agregados

Los agregados son partículas que se han aglomerado durante el proceso de combustión, sinterizándose a altas temperaturas, o por su viaje a través del ducto de escape en presencia de algunos hidrocarburos sin quemar. El tamaño típico de los aglomerados oscila entre 50 y 100 nm [4], así como en rangos entre 140 y 290 nm en motores diesel [2]. La ilustración 2 muestra una imagen TEM a 200 nm, típica de un aglomerado.

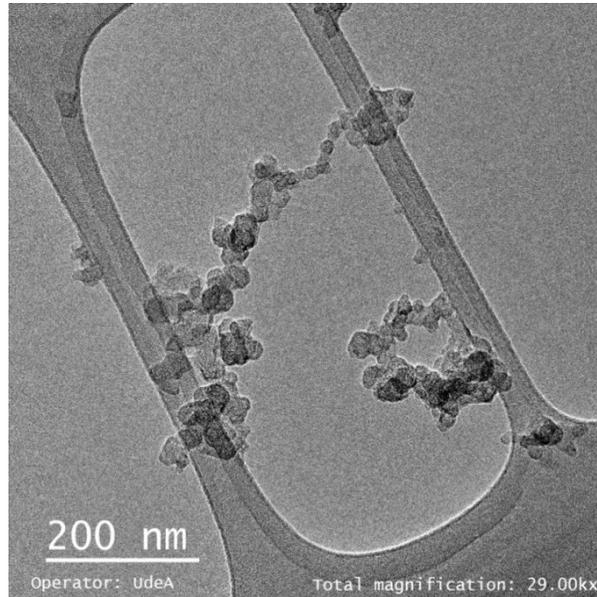


Ilustración 2. TEM de agregados a 200 nm

2.3. Principales métodos de muestreo de partículas

2.3.1. Túnel de dilución

El túnel de dilución se utiliza para la dilución en aire de partículas que salen de una chimenea o ducto de escape. El objetivo es facilitar el estudio de diversas condiciones en las que podrían distribuirse en la atmósfera.

Este método consiste de un tubo permeable, por el cual se hace circular el gas que contiene alta concentración de partículas, el cual se introduce concéntricamente en otro que hace las veces de coraza, por donde circula aire limpio. El aire se impulsa con un ventilador centrífugo, y se le pueden controlar su temperatura y humedad. En la corriente diluida se pueden ubicar filtros o dispositivos para la captura y conteo de partículas para su análisis posterior. La ilustración 3 muestra el túnel de dilución del LMT UdeA.



Ilustración 3. Túnel de dilución del LMT UdeA

2.3.2. Analizador electrostático de aerosol (EAA)

Este dispositivo cuantifica la concentración de partículas en el aerosol (gas con partículas en suspensión) [6]. La ilustración 4 muestra su esquema.

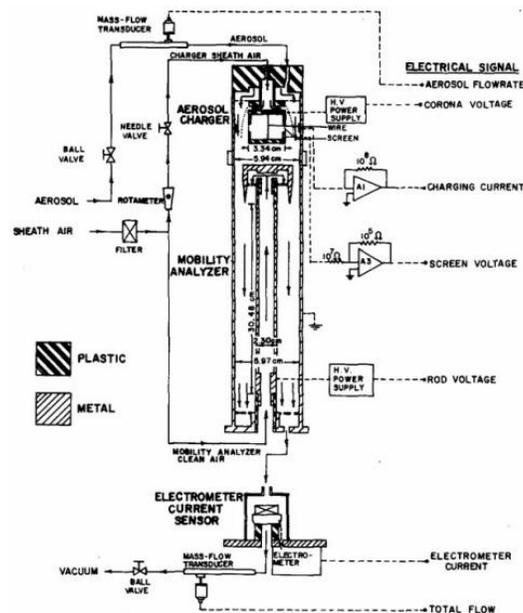


Ilustración 4. Esquema del Analizador Electrostático de Aerosol

El aerosol se mezcla con un gas de dilución en el cargador iónico, en la parte superior. Las partículas cargadas se pasan a través del clasificador de movilidad en forma descendente, y salen por una abertura inferior que los conduce al electrómetro que cuantifica la carga. Con la cuantificación de la carga se conoce la concentración de las partículas en el aerosol. Variando el voltaje de carga en el

analizador de movilidad, se separan las partículas de diferente movilidad y se puede conocer la distribución de tamaños.

2.3.3. Impactador electrostático de baja presión (ELPI)

El ELPI (*Electrical Low Pressure Impactor*) se utiliza para conocer la distribución de partículas de un gas en tiempo real. Su principio de operación se puede dividir en tres etapas: las partículas se cargan eléctricamente en el cargador de corona. Después de la carga, las partículas entran en un impactador de baja presión en cascada, con etapas de recolección aisladas eléctricamente. Las partículas se recogen en las diferentes etapas del impactador, en función de su diámetro aerodinámico, y la carga eléctrica transportada por las partículas en cada etapa del impactador se mide en tiempo real mediante electrodos sensibles. Esta señal de corriente medida es directamente proporcional a la concentración y tamaño de las partículas, por lo que el ELPI proporciona la concentración de partículas y la distribución del tamaño en tiempo real. Al apagar la unidad del cargador de corona, el ELPI se puede usar para medir la distribución de carga de partículas [7]. En la ilustración 5 se aprecia el esquema del ELPI.

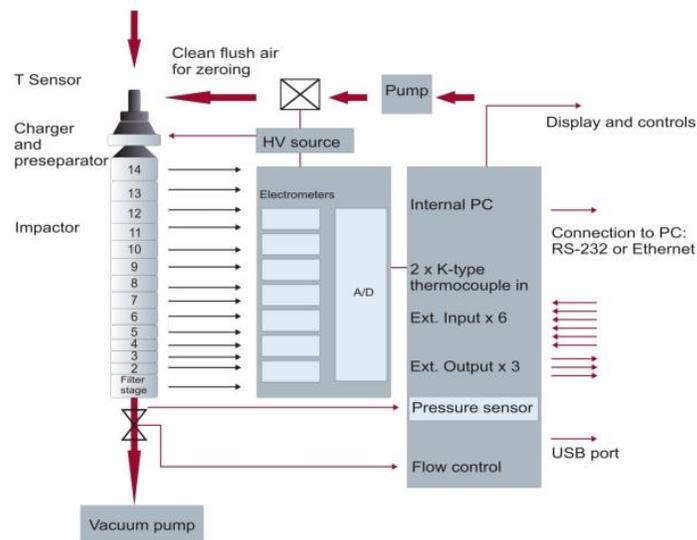


Ilustración 5. Diagrama del ELPI

2.3.4. Escáner móvil de tamaño de partículas (SMPS)

SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) se usa ampliamente para medición de distribuciones de tamaño de partículas en el aire y en gases de combustión. Este sistema también se usa para la medición del tamaño de las nanopartículas

suspendidas en líquidos. Las concentraciones se miden directamente sin importar la distribución del tamaño de partícula. El método es independiente del índice de refracción de la partícula o fluido, y tiene un alto grado de precisión de tamaño absoluto y repetibilidad de la medida.

Se basa en el principio de la movilidad de una partícula cargada en un campo eléctrico. Las partículas que ingresan al sistema se neutralizan (utilizando una fuente radiactiva o rayos X de baja energía), de manera que tienen una distribución de carga en equilibrio con sus alrededores. Luego, ingresan a un analizador de movilidad diferencial (DMA – *Differential Mobility Analyzer*), donde se clasifican de acuerdo con su movilidad eléctrica, en un rango estrecho, y salen por una ranura separada del flujo analizado. Esta distribución monodispersa luego se dirige a un contador de partículas de condensación (CPC) que determina la concentración de partículas en ese tamaño. El DMA consiste en un cilindro, con una varilla cargada negativamente en el centro. El flujo principal a través del DMA es aire 'envolvente', libre de partículas. Es importante que este flujo sea laminar. El flujo de partículas se inyecta en el borde exterior del DMA. Las partículas con una carga positiva se mueven a través del flujo de la vaina hacia la varilla central, a una velocidad determinada por su movilidad eléctrica. Las partículas de una movilidad dada salen a través de la ranura de la muestra en la parte superior del DMA, mientras que todas las demás partículas salen con el flujo de escape. El tamaño de la partícula que sale a través de la ranura está determinado por la carga, por el voltaje de la barra central y por el flujo dentro del DMA. Al variar exponencialmente el voltaje en la barra central, se crea una distribución completa del tamaño de partícula [4]. En la ilustración 6 se aprecia el diagrama del SMPS.

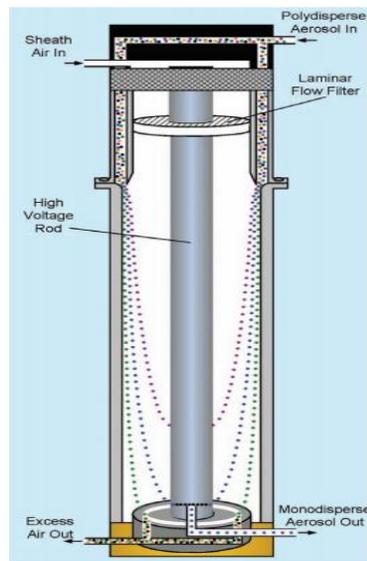


Ilustración 6. Diagrama del SMPS

2.3.5. Sonda termoforética

La sonda termoforética toma su nombre de la rejilla utilizada para el muestreo de partículas por el fenómeno termoforético, que se explica más adelante. La sonda es todo el sistema de fijación y movimiento, que permite la manipulación de la rejilla en condiciones controladas dentro del fluido o llama en estudio [1]. La rejilla de muestreo está fabricada en cobre con un recubrimiento de *Lacey carbon* (una película de carbono translúcida de aspecto similar a una trama de lazos), al cual se adhieren las partículas [5]. En la ilustración 7 se aprecia la manipulación de una rejilla de termoforésis típica.



Ilustración 7. Rejilla de Termoforésis

En la ilustración 8 se aprecia la “red de lazos” generada por la película de carbón que recubre la rejilla.

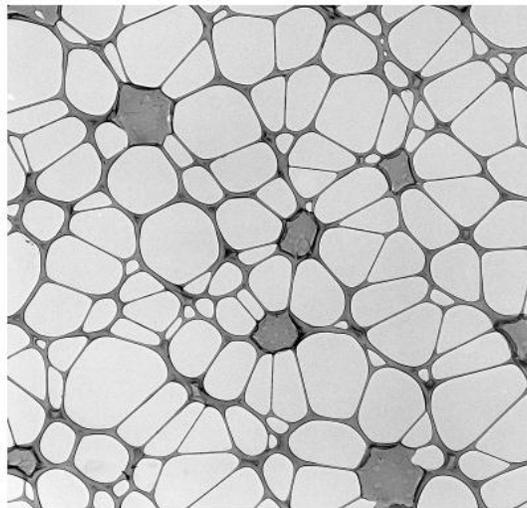


Ilustración 8. Película "*Lacey Carbon*" (red de lazos) [7]

La rejilla Pelco No 160 se usó con éxito el estudio realizado en la referencia [5].

2.4. El fenómeno de la termoforésis

El fenómeno de la termoforésis ocurre por el gradiente térmico existente entre un sólido a baja temperatura y un medio fluido a alta temperatura, cuando el fluido de mayor temperatura se desplaza para igualar su temperatura con el cuerpo de baja temperatura [8]. En la ilustración 9 se aprecia gráficamente, dicho fenómeno.

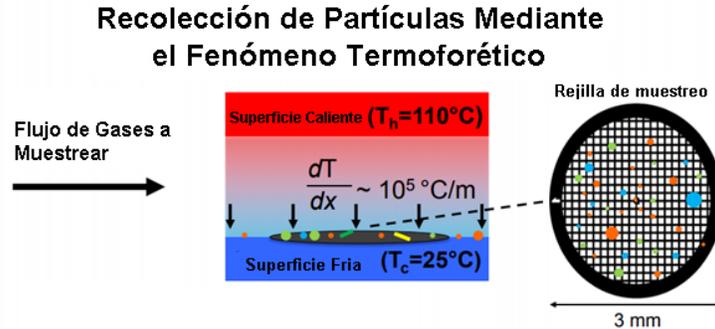


Ilustración 9. Fenómeno de la Termoforésis [5]

Este fenómeno es aprovechado para la captura de partículas sobre rejillas recubiertas con diversos materiales, según sea el tipo de partícula a capturar [9]. Gracias a que las fuerzas de atracción por el gradiente térmico son pequeñas, se tienen menor riesgo de dañar una partícula nanométrica. Este fenómeno es utilizado para el estudio de material particulado en procesos de combustión [4,5,10] tanto de llama abierta como de combustión en motores. Este método ofrece grandes ventajas a la hora de capturar partículas en su estado más elemental. Muchos métodos de recolección utilizan filtros que se ponen en frente de la corriente de gases de combustión ocasionando daños y aglomeraciones de partículas que afectan el resultado de las investigaciones por mala utilización de un método inadecuado de muestreo. El muestreo por termoforésis tiene menores afecciones sobre la partícula recogida.

Para garantizar que las rejillas se encuentren a la temperatura y humedad óptimas, se utiliza una cámara climática existente en el laboratorio de máquinas térmicas para guardarlas con una humedad relativa inferior al $44\% \pm 5\%$, y una temperatura de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La presencia de gotas de humedad sobre la superficie de la rejilla, ya que representa una barrera para la captura de partículas por el fenómeno termoforético.

2.5. Aplicaciones de la termoforésis en combustión

2.5.1. Fenómenos de combustión en llama abierta

La captura de partículas en llama abierta se hace mediante la inserción de una rejilla para termoforésis montada en el extremo de un soporte de alambre, el cual se introduce manualmente en la llama o los gases de combustión, dependiendo del lugar donde se desee desarrollar el estudio. [4,5,11].

2.5.2. Recolección de material particulado en motores

Para la recolección de muestras en motores, se utiliza una sonda que introduce la rejilla termoforética de cobre, dentro del ducto de escape del motor, dependiendo la necesidad de la investigación [4,10]. Lo usual es introducir la sonda al ducto de escape mediante la apertura de una válvula que comunica a la corriente de los gases de combustión. Se ingresa la sonda y se expone al flujo de gases durante un periodo de tiempo corto. Seguidamente, se extrae la sonda y se cierra la válvula, para no dejar escapar los gases del ducto de escape del motor.

2.6. Imágenes TEM y HRTEM

Las Imágenes TEM toman su nombre del microscopio de emisión de electrones (*Transmission Electron Microscopy*), por sus siglas en inglés.

Los electrones se disparan sobre la muestra. Algunos son absorbidos por la muestra, otros rebotan y otros la atraviesan. Los que la atraviesan, se enfocan con unas lentes de campos magnéticos que dirigen los electrones hacia una pantalla fosforescente, donde se forma la imagen en la parte inferior de la columna del microscopio. En la ilustración 10 se aprecia el Microscopio TEM de la Universidad de Antioquia.



Ilustración 10. Microscopio Tecnai G2 F20 de FEI

Con este microscopio se pueden obtener resoluciones de 0,144 nm, equivalente a 1 millón de aumentos [11].

Las imágenes HRTEM se logran con este equipo modificando algunos componentes, como las lentes magnéticas y el cañón de electrones. Con esto se logran resoluciones de 0,08 nm. Este equipo se utiliza principalmente para el estudio cristalográfico de materiales.

2.7. Programa para análisis de partículas

Se utiliza el programa desarrollado por el grupo GIMEL para el análisis morfológico. Éste se desarrolló en Matlab, y consta de dos programas principales. El primero, llamado TEM_powerpoint, es un programa que permite medir los diámetros de las partículas primarias. Se usan imágenes a las cuales se les ha cambiado el tamaño a 640x480 píxeles, y se les ha limpiado previamente el fondo con la ayuda de una función del programa Powerpoint de Microsoft. La interfase de usuario de este programa se muestra en la ilustración 11. Este módulo permite la medición del diámetro de las partículas primarias con la ayuda de una herramienta manual que consiste en una cinta métrica de píxeles que se patronea con la escala incluida en las imágenes TEM suministradas.

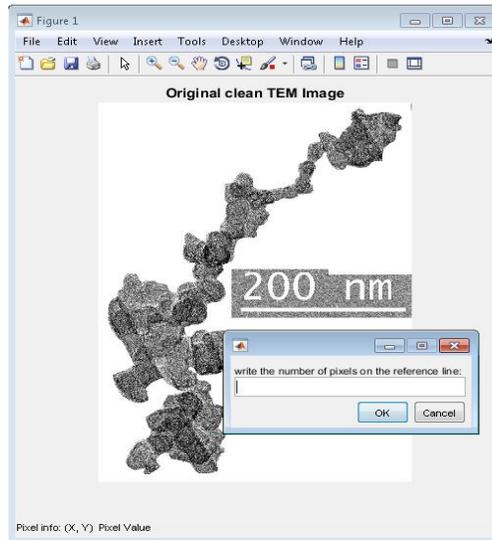


Ilustración 11. Medición del diámetro primario de partícula en TEM_powerpoint

Al finalizar más de 10 mediciones de diámetros de partículas, el programa genera un archivo de Excel llamado "Data", cuya información se muestra en la ilustración 12, con el número de píxeles por cada 100 nm, y el cálculo del diámetro promedio de las partículas primarias (*dpo*) de la imagen TEM correspondiente. Además, el programa también entrega una nueva imagen que no contiene la escala, llamada "clean-image", la cual se utilizará en el segundo programa, llamado FRACTAL.

	A	B	C
1	%name	pix/100nm	dpo
2	clean-image1	52,2	22,5587835
3	clean-image2	169	33,5957181
4	clean-image3	161	23,6249506
5			

Ilustración 12. Información del archivo Data

El software FRACTAL permite la subida en grupo de imágenes limpias, llamadas "clean-image", así como la captura del archivo de Excel "Data", generados por el programa TEM_powerpoint. Mediante sus algoritmos, el programa FRACTAL hace cálculos para el aglomerado de partículas: la dimensión fractal, el radio de giro, el área proyectada, el número de partículas primarias, y el prefactor. Este programa también genera un nuevo archivo de Excel, llamado "salida_analisis_fractal", donde se incluye la información mostrada en la ilustración 13.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Motor tipo Cummins ISF 2,8L							
2	Condiciones de funcionamiento: n=2200 [rpm], M=90 [Nm]							
3	Condiciones ambientales: T=T [°C], p=p [bar] bar							
4	Combustible tipo B100							
5								
6	Versión 2, Coef. aplastamiento=1							
7								
8	nº foto	índice	Radio de giro	Área proyectada	nº partículas primarias	Dimensión fractal	Prefactor	Fallo
9	clean-image1	1	229,2106325	67247,9852	234	1,613641357	1,813833176	-
10	clean-image2	1	88,30483613	12183,04681	16	1,335150146	1,781985451	-
11	clean-image3	1	76,80280716	16264,03302	52	1,79430542	1,807629248	-
12								
13	Media		131,4394253	31898,35501	100,6666667	1,581032308	1,801149292	
14	Desviación típica		84,86743126	30681,60488	116,864594	0,231308028	0,016883772	
15								
16	nº ejecuciones exitosas			3				
17	nº ejecuciones fallidas			0				
18								

Ilustración 13. Salida_analisis_fractal

El coeficiente de aplastamiento con el que se calculan las propiedades del aglomerado es 1: se supone que las partículas se tocan en un solo punto, y que no sufren aplastamiento [12,13].

El “índice” de la dimensión fractal (Df), con el que se calculan las propiedades del aglomerado, equivale a 1 para un aglomerado lineal $Df = 1$. La ilustración 14 muestra un arreglo ideal de este tipo

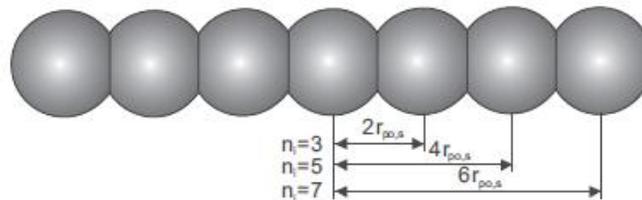


Ilustración 14. Aglomerado lineal índice = 1, tomado de [13]

El índice de la $Df = 2$, es un plano hexagonal formado por partículas, o un plano circular. La ilustración 15 muestra un arreglo ideal de partículas con este índice.

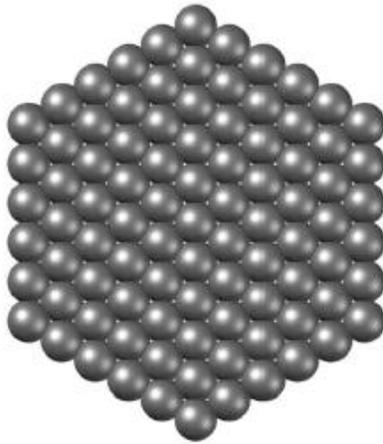


Ilustración 15 Aglomerado plano con Índice de $D_f = 2$, tomado de [13]

El índice de la $D_f = 3$ es un cuboctaedro, según [13]. En la ilustración 16 se aprecia este sólido. Otros autores asumen una esfera [14,15].

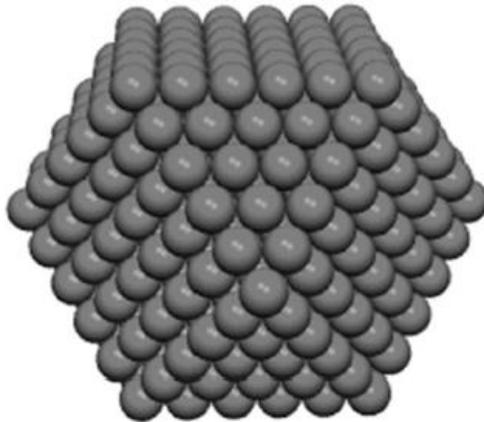


Ilustración 16. Agregado volumétrico con índice $D_f = 3$, tomado de [13]

El radio de giro (r_g) se define como el radio de un anillo que tiene igual masa e igual momento de inercia que el cuerpo o aglomerado para nuestro caso [12,14]. En la ilustración 17 se aprecia la explicación gráfica de este concepto.

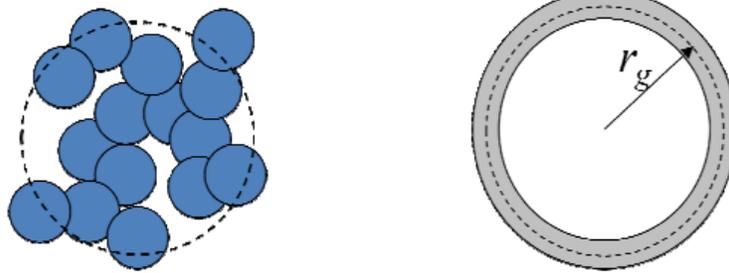


Ilustración 17. Explicación del radio de giro tomada de [12]

El Área proyectada (A_o) es el área, en nanómetros cuadrados, correspondiente al área de la imagen donde se muestra el aglomerado. El programa calcula este parámetro automáticamente. El número de partículas primarias (np_o) también se cuenta automáticamente por el algoritmo del programa, a través de su procesamiento de imagen. El Prefactor (K_f), mostrado en la siguiente expresión, expresa cómo se llena el espacio por las partículas dentro del aglomerado [12,13].

$$K_f = np_o \left(\frac{d_{po}}{d_g} \right)^{D_f}$$

La dimensión fractal (D_f) es un concepto euclidiano generalizado de la dimensión de un cuerpo: lineal ($D_f = 1$), plano ($D_f = 2$), o esférico ($D_f = 3$). Ésta se calcula para la imagen procesada con base en la siguiente ecuación [13], al despejar de la siguiente ecuación el término de D_f .

$$np_o = K_f \left(\frac{d_g}{d_{po}} \right)^{D_f}$$

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño de la sonda

3.1.1. Condiciones de diseño

El LMT cuenta con tres celdas para ensayos. En las dos primeras se tienen bancos motores, y en la tercera equipo de laboratorio y la cámara climática donde se hace el montaje de las rejillas en la sonda en un ambiente controlado (ver ilustración 11).



Ilustración 18. Cámara climática del LMT UdeA

La sonda se debe transportar entre la segunda y tercera celda entre mediciones, por lo cual, el equipo debe tener las siguientes características: ser portátil, liviano, compacto, de fácil conexión, y que aisle los componentes electrónicos del sistema de control del ambiente cálido de la celda donde se encuentra instalado el banco motor. Además, debe accesible a sus componentes para hacer ajustes, calibraciones, y el montaje y desmontaje del porta rejillas. También se busca que sea económico, y que la fabricación se pueda hacer con materiales que se consigan en la ciudad.

3.1.2 Condiciones de operación

La sonda debe cumplir varias condiciones específicas de operación, dentro de las cuales, la más importante es la calibración del tiempo de exposición de la rejilla, el cual es del orden de milisegundos. El cumplimiento de esta condición descarta cualquier tipo de mecanismo de accionamiento manual, pues se pierde el control sobre el tiempo de exposición.

Para cumplir la condición de exposición se necesita un equipo de control electrónico preciso, que permita hacer la medición de tiempo y la actuación eléctrica sobre un relé, para controlar un actuador lineal que responda a la exigencia del tiempo de exposición.

La sonda en el extremo del actuador lineal debe alojar el porta rejillas, el cual debe permitir su montaje y desmontaje con rapidez. El actuador lineal debe impedir que el porta rejillas gire en el momento de inserción dentro del ducto de escape, y permitir que se pueda fijar en una posición deseada. Esto con el fin de garantizar que la rejilla siempre se encuentre en posición paralela al flujo de los gases de escape del motor. El porta rejillas y el vástago del actuador deben ingresar al ducto de escape a través de una válvula de bola, sin chocar en sus paredes para evitar daños a la sonda y las rejillas. El soporte de la sonda en el banco motor debe posicionarla perpendicular al ducto de escape del motor, y centrada en su

eje para permitir el ingreso del porta rejillas, a través de la válvula de bola. Ésta se abrirá manualmente para la introducción del porta rejilla en el interior del ducto de escape del motor.

La sonda debe recibir la señal de introducción del porta rejilla al ducto cuando la válvula se encuentre totalmente abierta. La sonda se debe ubicar en el ducto de escape en el tramo comprendido entre el catalizador y el silenciador, para hacer el muestreo de partículas en este tramo en particular, según los requerimientos de una investigación en curso en el LMT UdeA.

El rango de temperaturas de operación de la sonda, específicamente del porta rejillas, se establece desde la temperatura ambiente del laboratorio (22° C) hasta las temperaturas de trabajo en el ducto de escape, las cuales pueden estar alrededor de los 450° C.

3.2. Selección y diseño de los elementos de la sonda

3.2.1. Diseño del porta rejilla

El diseño se plantea desde los elementos existentes. La rejilla de muestreo es el elemento que conduce este diseño, pues es la razón misma de la sonda. La rejilla tiene un diámetro de 3 mm y un espesor de 0.7 mm, y se debe montar y asegurarse con facilidad sobre el porta rejillas. La manipulación de la rejilla se hace con la ayuda de una pinza de punta ultra fina que es delicada. En la ilustración 19 se aprecia el sistema porta rejillas.

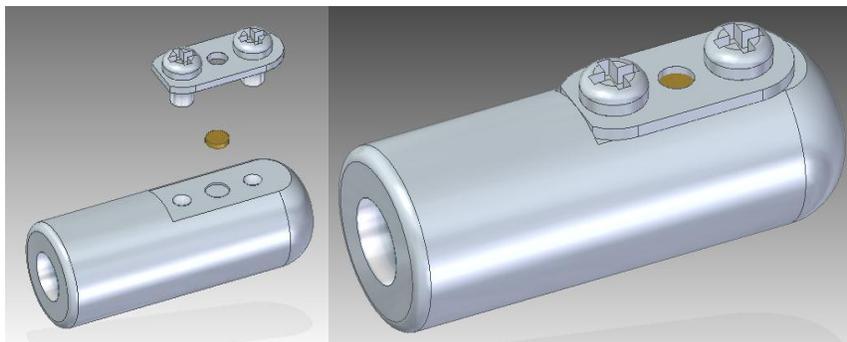


Ilustración 19. Porta Rejillas

El porta rejillas se fabrica a partir de un cilindro de acero inoxidable SAE304, para evitar su corrosión. Su diámetro es de 14 mm, y su longitud es de 36 mm, para facilitar su manipulación de forma ergonómica. A éste se le mecaniza una cavidad con profundidad de la mitad del espesor de la rejilla, lo cual permitirá su posicionamiento correcto, asegurándola con una lámina retenedora perforada, que

permite el acceso de las partículas a la rejilla. La lámina retenedora se fija al porta rejillas con dos tornillos. El método de fijación del porta rejillas al actuador lineal se hace por unión roscada.

El material para la fabricación del porta rejillas permite su operación a temperaturas superiores a los 450°C, necesarios para la operación de la sonda dentro del ducto de escape.

3.2.2. Selección del actuador lineal

Para hacer que la sonda sea lo más compacta posible, se selecciona el desplazamiento más pequeño del actuador lineal, con base en las geometrías posibles dentro de lo existente, y considerando la seguridad para el operador de la sonda.

Dentro de los actuadores lineales que se consiguen en el mercado nacional, encontramos actuadores lineales eléctricos y actuadores lineales neumáticos, más conocidos como cilindros neumáticos. Los actuadores lineales eléctricos son más costosos, más lentos y complejos de controlar que los cilindros neumáticos, por lo que se descartan para esta aplicación. La ilustración 20 muestra un actuador lineal neumático.



Ilustración 20. Actuador Lineal Neumático

Las velocidades lineales de operación de los cilindros neumáticos dependen de su diámetro, de la presión del aire, del caudal disponible en la línea de aire, y de la eficiencia de la válvula que los acciona. En general, los fabricantes proporcionan tablas que aproximan estos valores a la realidad. Para mayor precisión, se realizará una caracterización de las velocidades de actuación del cilindro neumático.

Los cilindros neumáticos permiten la ubicación de sensores magnéticos que indican su posición. En este trabajo los utilizaremos para controlar el tiempo de exposición de la rejilla, así como la posición retraída y extendida de su vástago. Se selecciona un vástago de sección cuadrada para evitar que la sonda gire por accidente, y se introduzca en una orientación no deseada.

El desplazamiento del vástago es de 150 mm, suficiente para salir de la sonda, pasar a través de la válvula de bola, e ingresar al ducto de escape y capturar las partículas, posicionando la rejilla en el centro del ducto de escape del motor. El diámetro del cilindro neumático es de 20 mm, lo cual permite movimientos de gran velocidad. Debido a que no se cuenta con la electroválvula del mismo fabricante, se debe caracterizar la velocidad del sistema.

El material del vástago del cilindro neumático es acero inoxidable, lo cual permite su operación a temperaturas superiores a los 450°C.

3.2.3. Selección del microcontrolador de la sonda

La exigencia en la exactitud de exposición de la rejilla a la corriente de gases de escape, hace necesario el uso de un temporizador de alta resolución que de mediciones en el rango de milisegundos. Dentro de las opciones se tienen temporizadores digitales y relés programables de marcas como Siemens, Telemecanique, entre otros. La opción más económica con desempeños y características similares a estas reconocidas marcas, es el Controllino mini [16], el cual se muestra en la ilustración 21.



Ilustración 21. Controllino Mini

El Controllino mini es un micro controlador basado en el Arduino. Éste se puede programar mediante *software* libre, similar al lenguaje “C”. Posee entradas y salidas digitales y analógicas para la instalación del *hardware*, como pulsadores e interruptores externos. Con sus salidas digitales se pueden energizar las bobinas de las electroválvulas. Adicionalmente, se adiciona un circuito que referenciará todos los componentes a “Tierra”, para evitar posibles daños y ruido eléctrico en el Controllino.

3.2.4. Selección de la electroválvula de la sonda

La electroválvula se encarga de controlar el flujo de aire que recibe el cilindro neumático para su actuación. Éste debe sacar el vástago en todo su desplazamiento, exponer a la corriente de gases la rejilla el tiempo programado, y retraerlo en todo su desplazamiento. Para esta tarea, la electroválvula que mejor funciona es una 5/2 bi-estable, la cual se muestra en la ilustración 22. Esta electroválvula tiene 2 posiciones y 5 puertos.



Ilustración 22. Electroválvula 5/2

Con esta electroválvula se tiene control adecuado de desplazamiento y exposición de la rejilla: se energizan sus bobinas para sacar y retraer el vástago del cilindro neumático, una vez se haya alcanzado el tiempo de exposición de la rejilla. Esta electroválvula está disponible en el LMT. y se usará en la sonda. No se cuenta con la ficha técnica del fabricante, pero con la caracterización del sistema neumático bastará para saber si funciona bien en el sistema.

3.2.5. Selección de la fuente de potencia

Tanto el Controllino como la electroválvula necesitan una fuente de energía para su funcionamiento, que los alimente al voltaje y corriente necesarios. La potencia necesaria por ambos equipos se haya al sumar sus potencias individuales y aumentarla por un factor de seguridad, para futuras ampliaciones o funcionamiento continuo. En la tabla 1 se presentan las potencias de los elementos de la sonda.

Tabla 1. Potencia de los elementos de la sonda termoforética

Elemento eléctrico de la sonda	Potencia [W]
Controllino	10
Bobina de electroválvula	10
Circuitos externos	10
Potencia Total	30

En el mercado local se consiguen fuentes de potencia con entrada AC 110v, y salidas de 24v DC, de 100 Watts de potencia, las cuales satisfacen la demanda de la sonda. La fuente no se ubica al interior de la sonda para hacerla más compacta. En la ilustración 23 se aprecia la fuente de potencia utilizada



Ilustración 23. Fuente de Potencia

3.2.6. Selección del contenedor para la sonda

Con todos los elementos comerciales seleccionados, se procede al modelado 3D de estos elementos mediante el programa SolidEdge. Éstos se ensamblan para encontrar el volumen adecuado de un contenedor comercial, que sea aislado eléctricamente (plástico), y en lo posible transparente, para poder tener control visual del sistema neumático. Con esta información, se procedió a adquirir un contenedor plástico transparente con las siguientes medidas interiores: largo 340 mm, ancho 125 mm, y alto 125 mm. Este contenedor tiene un espacio adecuado para la instalación de los elementos, y para hacer las conexiones eléctricas y neumáticas con comodidad. La ilustración 24 muestra los componentes de la sonda modelados en 3D.

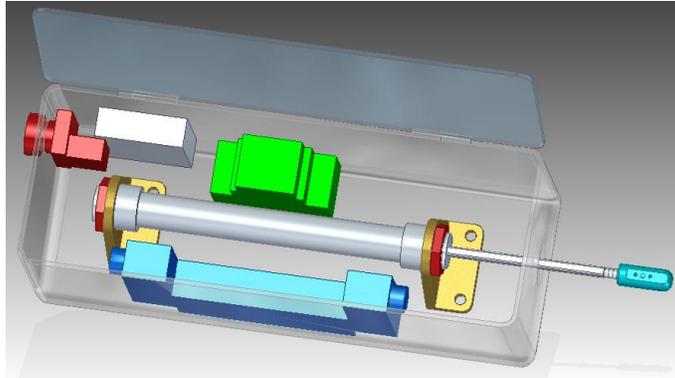


Ilustración 24. Modelado 3D de los Componentes de la Sonda

3.3. Fabricación de la sonda

Luego de tener todos los elementos comerciales y los que se fabricaron, se procede a la fijación de los diversos elementos dentro del contenedor plástico. La forma más conveniente para unir estos elementos al contenedor, es mediante el uso de uniones roscadas, para facilitar su desmontaje en el caso de que se necesite mantenimiento de alguno de los elementos. La ilustración 25 muestra la sonda ensamblada.

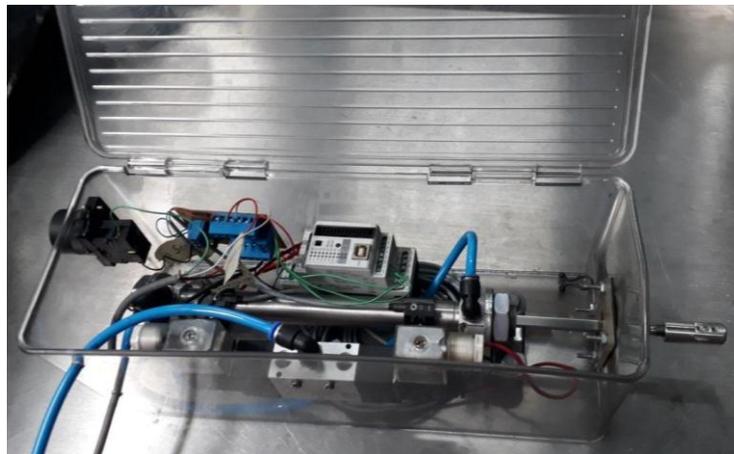


Ilustración 25. Ensamble de la Sonda

Para facilitar el ensamble, primero se localizan los elementos al interior de la sonda sin hacer conexiones eléctricas o neumáticas. Luego, se abren los agujeros de los pernos que aseguran cada componente, y se fijan uno a uno. Después se desmontan nuevamente para hacer las conexiones eléctricas y neumáticas con comodidad en el exterior. Finalmente, se introducen de nuevo los componentes ya conectados para fijarlos en su posición.

3.3.1. Conexiones eléctricas.

Desde el exterior de la caja, se introduce un cable con la alimentación de potencia y la señal del pulsador instalado en la válvula de bola. Por practicidad, se utiliza un cable de 4 conductores calibre 22 (4x22). Mediante dos de sus conductores se ingresa 0 V y +24V DC. Los otros dos conductores se utilizan para la transmisión de la señal del interruptor de final de carrera instalado en la válvula de bola (S1 en la ilustración 26).

El interruptor se conecta en serie con el otro pulsador instalado en la caja de la sonda (S2), y se lleva a la tarjeta de distribución, que sirve como punto de conexión múltiple de los accesorios y como referencia de voltaje a 0V, para evitar posibles ruidos eléctricos. Los accesorios que se conectan desde esta tarjeta son los sensores de final de carrera instalados sobre el cilindro neumático, el de 0V de las electroválvulas, y el pulsador instalado en la caja de la sonda.

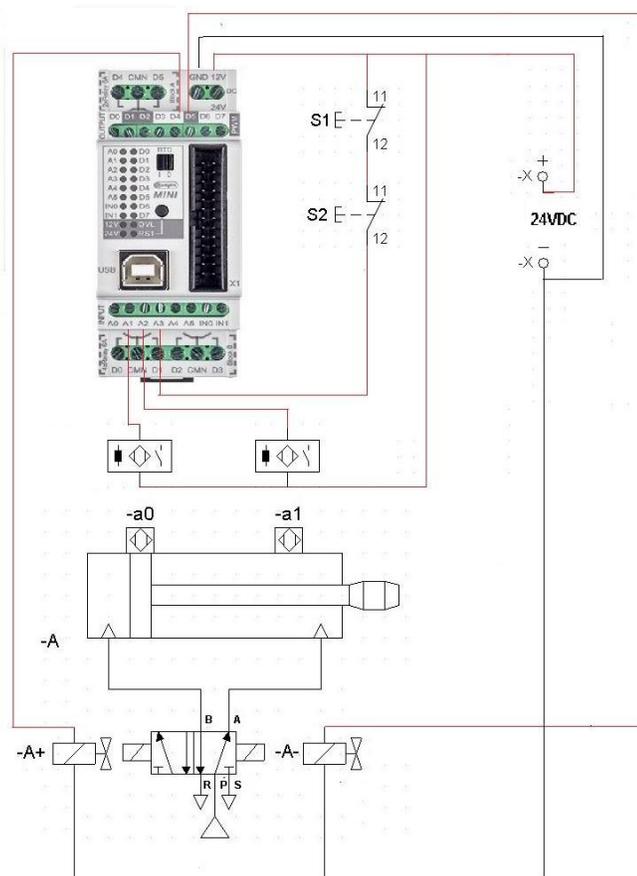


Ilustración 26. Conexiones Eléctricas

El Controllino Mini recibe 3 entradas digitales: el pulsador que inicia el ciclo del proceso, y dos señales de los sensores de posición del cilindro neumático. Las salidas que entrega son dos señales digitales, una para cada bobina de la electroválvula. La potencia la recibe desde la tarjeta de distribución 0 V y +24V DC.

Las entradas A1 y A2 se utilizan para los sensores, y A3 para los pulsadores en serie que inician el ciclo. Las salidas D4 y D5 se utilizan para energizar las electroválvulas que controlan el cilindro neumático. En la ilustración 26 se aprecia el plano de conexiones eléctricas de la sonda junto a un diagrama neumático para facilitar su entendimiento.

3.3.2. Conexiones neumáticas

Desde el exterior, a través de un orificio, se ingresa la línea de alimentación de aire comprimido, hasta el puerto P de la electroválvula. Los puertos R y S son descargas de aire de proceso, a los cuales no se les pone silenciadores para no afectar la velocidad del sistema. Los puertos A y B de la electroválvula son los puertos que dan paso al aire que alimenta el cilindro neumático. Éstos se conectan al extremo del vástago, y al extremo trasero, respectivamente. Al energizar las bobinas correspondientes se mueve un cilindro de acero en el interior de la electroválvula, el cual responde al campo magnético generado por las bobinas energizadas, alternando sus salidas. En la ilustración 27 se muestran las conexiones neumáticas del sistema.

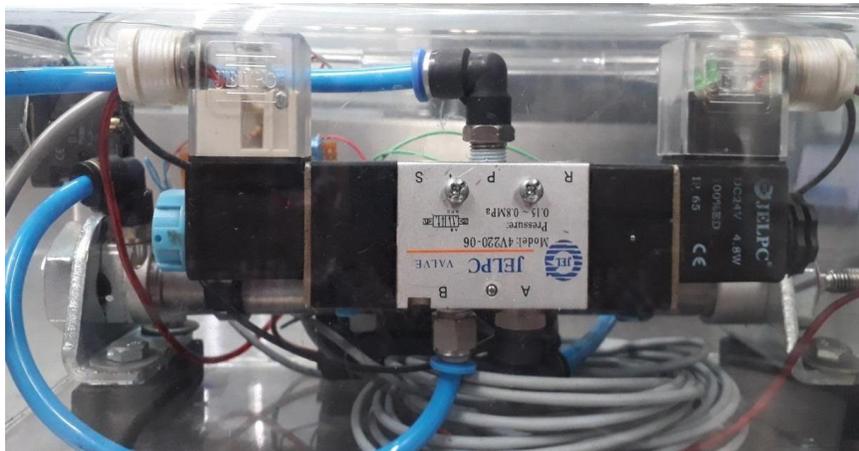


Ilustración 27. Conexiones Neumáticas

En la Ilustración 28 se aprecia el plano neumático de la sonda. El cilindro se nombra como -A, los sensores inductivos montados sobre el cilindro neumático se nombran como -a0 y -a1, y las electroválvulas se nombran como -A+ y -A-.

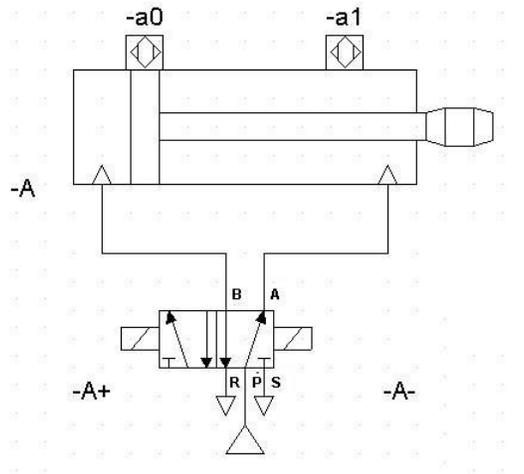


Ilustración 28. Plano Neumático de la Sonda

3.3.2. Secuencia de control del Controllino Mini

El Controllino Mini se programa con el *software* libre de Arduino, similar al C++, el cual se usó en plataforma Windows. Dentro del programa, se definen las entradas y salidas a utilizar en el controlador, y luego se hace el cuerpo del programa con la siguiente secuencia: el pulso de apertura de válvula de bola energiza la bobina – A+ de la electroválvula, y el cilindro mueve el vástago a la posición extendida. Se recibe la señal del sensor –a1, ubicado en el lado del vástago del cilindro neumático, y se inicia el temporizador. Luego éste da la orden para energizar la bobina –A- de la electroválvula, la cual a su vez retrae el vástago del cilindro neumático, activando el sensor –a0, completando de esta forma el ciclo.

3.4. Caracterización de la sonda

Es necesario conocer el desempeño de la sonda para tener la certeza de que va a funcionar conforme a las condiciones del diseño, en cuanto a velocidad de actuación y tiempo de residencia del porta rejillas en el interior del ducto de escape.

Se hicieron doce experimentos diferentes, mostrados en las tablas 2 y 3, programando 6 tiempos distintos de residencia en el micro controlador, y utilizando dos presiones diferentes: una de 3 bar y otra de 3,5 bar.

Tabla 2. Experimento a 3 bar

Retardo programado [ms]	Cuadros contados	Tiempo del ciclo [ms]	Tiempo de desplazamiento [ms]
0	21	87,50	87,50
50	34	141,67	91,67
100	45	187,50	87,50
200	70	291,67	91,67
300	94	391,67	91,67
500	142	591,67	91,67

Tabla 3. Experimento a 3,5 bar

Retardo programado [ms]	Cuadros contados	Tiempo del ciclo [ms]	Tiempo de desplazamiento [ms]
0	21	87,5	87,5
50	33	137,5	87,5
100	45	187,5	87,5
200	69	287,5	87,5
300	93	387,5	87,5
500	141	587,5	87,5

Para la caracterización se toman videos con una cámara de teléfono móvil, la cual permite grabar a 240 fps (cuadros por segundo). Luego, se cuentan estos cuadros y se puede conocer el tiempo en milisegundos que dura el ciclo de la sonda, al dividir el número de cuadros contados por los 240 fps de la cámara, y multiplicarlos por 1000. Se programan los tiempos de espera o “Retardo” en el micro controlador, y luego se hace el experimento para cada caso.

Varios autores reportan el tiempo de residencia de la rejilla dentro de la corriente de gases del ducto, con valores entre 100 y 700 ms [5,2]. Sin embargo, no hay mucha información actualizada con ensayos en motores EURO4. Por esta razón, se deben hacer ensayos preliminares para determinar el tiempo de exposición adecuado a nuestro caso.

3.5. Montaje de la sonda en el banco motor

El LMT en su segunda sala tiene instalado un banco de ensayos con el motor Cummins ISF 2.8. Este banco está bien instrumentado, de forma que permite el seguimiento de las condiciones termodinámicas del motor y su combustión al

interior de uno de sus cilindros. El motor está acoplado al un freno dinamoétrico Schenk E90 para aplicar carga, según se muestra en la ilustración 29.



Ilustración 29. Banco Motor del LMT UdeA

El lugar elegido para la instalación de la sonda es el segmento del escape entre el catalizador y el silenciador, como se aprecia en la ilustración 30. Seguidamente se evalúa el lugar más adecuado para la instalación del soporte de la sonda y se decide por un tramo de estructura del banco de ensayos, donde se cruza con el ducto de escape. Con esto se evita la fabricación de un soporte bajo el motor.



Ilustración 30. Selección del espacio de Instalación para la Sonda

Posteriormente, se suelda un tramo roscado de tubería, perpendicularmente al ducto de escape y paralelo al plano del piso del laboratorio, como se muestra en la ilustración 31. A este tramo se rosca la válvula de bola de 1 pulgada. La longitud de este conjunto suma 105 mm hasta el borde exterior del ducto de escape.



Ilustración 31. Montaje de la Válvula al Ducto de Escape

El soporte para sonda se fabrica en ángulo de acero de 1 ½" x 3/16", con medidas interiores adecuadas para alojar el contenedor de la sonda: 350 mm x 130 mm. Se deja una holgura pequeña, la cual luego se ajusta con una banda de espuma. El soporte tiene la posibilidad de desplazarse en el plano horizontal y vertical, para poder alinear debidamente el recorrido del porta rejillas con el agujero de la válvula de bola del ducto de escape, como se aprecia en la ilustración 32.



Ilustración 32. Soporte en la Base del Banco Motor

Durante el posicionamiento de la sonda perpendicular al ducto de escape, se hizo una primera alineación visual, y seguidamente se extendió manualmente el vástago del cilindro neumático para evitar daños en el porta rejillas, a causa de cualquier posible desalienación. Luego de varios intentos, se logró la alineación correcta.

A la válvula de bola se le fabricó un soporte para el interruptor de final de carrera, el cual se activa con la manija cuando ésta se abre totalmente, según se aprecia en la ilustración 33. Este fin de carrera envía la señal eléctrica al Controllino, y éste a la electroválvula para accionar el cilindro e introducir el porta rejilla al interior del ducto de escape. En una fracción de segundo temporizada, la sonda entra, toma la muestra dentro de la corriente de gases de escape, y sale.



Ilustración 33. Montaje del Final de Carrera en la Válvula

3.6. Pruebas de funcionalidad

3.6.1. Selección de los modos de operación del motor.

Un ciclo de conducción es un perfil de velocidad vs. Tiempo, el cual busca representar la forma en que conducen las personas en la vida real. El WLTC (World Wide Lightduty Test Cycle) es el ciclo más reciente que usa en Europa, y logra ser más real en el seguimiento de la conducción. En el Valle de Aburrá se dispone de un ciclo de conducción propio (AMVA), desarrollado en años recientes por el grupo GIMEL de la UdeA.

Los automotores entregan la potencia de acuerdo con la exigencia impuesta por el conductor, que responde a la necesidad de vencer las ondulaciones del terreno, la resistencia del viento al avance del vehículo, la necesidad de aumentar la

velocidad, etc. A los vehículos se les calcula su potencia específica vehicular (VSP – *Vehicle Specific Power*), dada en kW/Ton. En la ilustración 34 se muestra la interacción de las diferentes variables dentro de la ecuación que define la VSP.

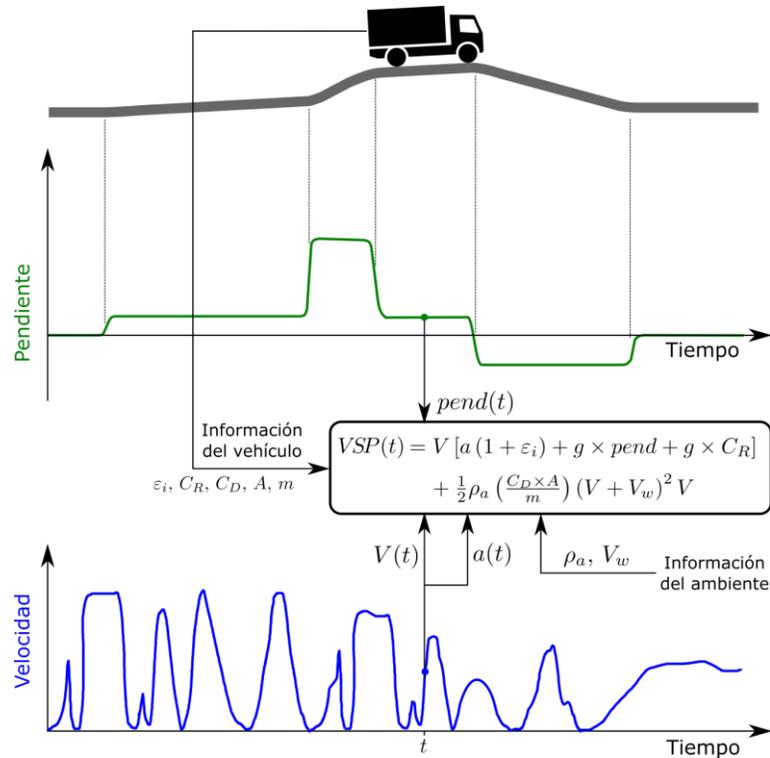


Ilustración 34. Potencia Específica Vehicular

Para determinar los modos de operación en el banco de ensayos, se realizaron simulaciones en una camioneta FOTON TUNLAND siguiendo los ciclos WLTC y el del AMVA. Se desarrolló un modelo de dinámica longitudinal del vehículo, para traducir la velocidad y demanda de potencia instantánea a condiciones de operación del motor. Los datos del ciclo permiten determinar la VSP instantánea. Estos datos analizaron estadísticamente, para identificar los valores más representativos correspondientes a media y alta potencia. Estos valores representativos de VSP se tradujeron a par y régimen de giro del motor, mediante el análisis de dinámica longitudinal del vehículo. De este modo se logró determinar los modos de operación a usar en las pruebas.

Tabla 4. Modos de operación

Modos de operación	Velocidad [rpm]	Par [Nm]
Media Potencia (MP)	2200	90
Alta Potencia (AP)	2800	80

3.6.2. Selección de los tiempos de exposición de las rejillas dentro del ducto

Según lo observado en la caracterización de los tiempos de la sonda, el funcionamiento a la presión de 3.5 bar fue muy estable en cuanto a la repetibilidad del experimento. Por esta razón, se utiliza esta presión, y el tiempo de permanencia o retardo programado será de 200 ms. Se realizarán dos inserciones de la sonda, para aumentar la probabilidad de capturar partículas. Esta forma de medir fue satisfactoria.

3.7. Plan de ensayos

3.7.1. Motor

El motor se operó en los dos modos anteriormente descritos de media potencia y alta potencia. En cada modo se usaron dos combustibles diferentes: B100, que es biodiesel de aceite de palma puro (al 100%), y B10, que es una mezcla de combustible diésel con 10% (en volumen) de biodiesel.

3.7.2. Sonda

La puesta a punto de la sonda consistió en ajustar y alinear el soporte en el banco de ensayos. Se verificó que la válvula en el ducto de escape estuviera debidamente instalada, con buen funcionamiento del interruptor de final de carrera. El sistema completo se verificó y se realizaron ensayos para comprobar que éste se encontraba listo para la toma de muestras.

La secuencia de operaciones para la toma de muestras es la siguiente:

- a) Instalar la rejilla en el porta rejillas de la sonda: esta operación se realiza en la cámara climática donde se conservan las rejillas bajo condiciones controladas.
- b) Posicionar la sonda en su soporte en el banco de ensayos, y conectar la alimentación eléctrica y neumática.

- c) Con el motor en un estado estable de operación, según el modo de operación seleccionado, abrir la válvula de bola que comunica al interior del escape para que la sonda tome la muestra, se realizan dos inserciones sin desmontar la sonda.
- d) Llevar la sonda a la cámara climática, donde se desmonta la rejilla y se ubica en una caja debidamente rotulada, según la prueba (modo de operación y combustible).

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Validación de la sonda termoforética

Se tomaron muestras con la sonda en los diferentes modos de operación con los dos combustibles, según el plan de ensayos, con dos inserciones de la sonda dentro del ducto, y un tiempo de retardo de 200 ms.

Las pruebas descritas se realizaron durante el segundo semestre del año 2018. Se tiene un total de 3 imágenes para cada combustible, en los correspondientes modos de operación del motor, en alta y baja potencia.

4.2. Toma de imágenes

Las muestras colectadas en las rejillas se llevaron a un laboratorio de la Sede de Investigación Universitaria – SIU, donde se procesaron en el microscopio TEM. Una de las imágenes obtenidas se muestra en la ilustración 35. En el anexo 1 se pueden encontrar todas las imágenes obtenidas en el muestreo.

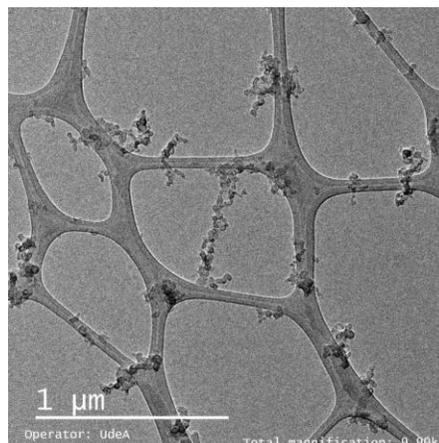


Ilustración 35. Imagen TEM

4.3. Diámetro de partícula primaria

El programa TEM_powerpoint fue claro e intuitivo a la hora de ejecutarlo para hacer la medición del diámetro de partícula primaria en modo manual. Al usarlo sobre las imágenes limpias, se obtuvieron los resultados mostrados en las ilustraciones 36 a la 39. El promedio entregado por el programa se calcula haciendo la sumatoria de los diámetros medidos, y dividiendo entre el número de mediciones hechas (10 por cada imagen). El dato entregado “pix/100 nm”, es un ajuste a la escala que el programa hace para calibrar su cinta métrica.

En el Anexo 2 se presentan las imágenes limpias utilizadas para la medición del diámetro de partícula primaria (dpo en nm) en el mismo orden siguiente.

	A	B	C
1	%name	pix/100nm	dpo
2	clean-image1	52,2	22,5587835
3	clean-image2	169	33,5957181
4	clean-image3	161	23,6249506
5			

Ilustración 36. Modo MP con B100

	A	B	C
1	%name	pix/100nm	dpo
2	clean-image1	67,5	23,692244
3	clean-image2	167,5	28,9451943
4	clean-image3	91,5	24,7939916

Ilustración 37. Modo AP con B100

	A	B	C
1	%name	pix/100nm	dpo
2	clean-image1	27,4	26,7721405
3	clean-image2	70	25,5601219
4	clean-image3	111,5	28,111247

Ilustración 38. Modo MP con B10

	A	B	C
1	%name	pix/100nm	dpo
2	clean-image1	56	27,4249238
3	clean-image2	56,6	22,3678748
4	clean-image3	59,9	23,4416239
5			

Ilustración 39. Modo AP con B10

4.4. Análisis con el programa FRACTAL

Los resultados entregados por el programa FRACTAL se muestran en las ilustraciones 40 a 43.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Motor tipo Cummins ISF 2,8L							
2	Condiciones de funcionamiento: n=2200 [rpm], M=90 [Nm]							
3	Condiciones ambientales: T=28 [°C] °C, p=0,853 [bar]							
4	Combustible tipo B100							
5								
6	Versión 2, Coef. aplastamiento=1							
7								
8	nº foto	índice	Radio de giro	Área proyectada	nº partículas primarias	Dimensión fractal	Prefactor	Fallo
9	clean-image1	1	229,2106325	67247,9852	234	1,613641357	1,813833176	-
10	clean-image2	1	88,30483613	12183,04681	16	1,335150146	1,781985451	-
11	clean-image3	1	76,80280716	16264,03302	52	1,79430542	1,807629248	-
12								
13	Media		131,4394253	31898,35501	100,6666667	1,581032308	1,801149292	
14	Desviación típica		84,86743126	30681,60488	116,864594	0,231308028	0,016883772	
15								
16	nº ejecuciones exitosas		3					
17	nº ejecuciones fallidas		0					

Ilustración 40. Resultados Fractal Modo MP con B100

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Motor tipo Tipo Cummins ISF 2,8L							
2	Condiciones de funcionamiento: n=2800 [rpm] rpm, M=80 [Nm] Nm, EGR=EGR [%] %							
3	Condiciones ambientales: T=T [°C] °C, p=p [bar] bar, w_r=w r [%] %							
4	Combustible tipo B100							
5								
6	Versión 2, Coef. aplastamiento=1							
7								
8	nº foto	índice	Radio de giro	Área proyectada	nº partículas primarias	Dimensión fractal	Prefactor	Fallo
9	clean-image	1	230,367377	256296,296	2548	2,4607605	1,71649481	-
10	clean-image	1	90,96589903	24325,4177	53	1,83666382	1,80545878	-
11	clean-image	1	201,3359828	58471,737	167	1,62203979	1,81374409	-
12								
13	Media		174,2230863	113031,15	922,6666667	1,9731547	1,77856589	
14	Desviación típica		73,54947234	125240,446	1408,733592	0,43570107	0,05391453	
15								
16	nº ejecuciones exitosas		3					
17	nº ejecuciones fallidas		0					

Ilustración 41. Resultados Fractal AP con B100

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Motor tipo Cummins ISF 2,8L							
2	Condiciones de funcionamiento: n=2200 [rpm], M=90 [Nm]							
3	Condiciones ambientales: T=28 [°C] ±C, p=0,853 [bar]							
4	Combustible tipo B10							
5								
6	Versión 2, Coef. aplastamiento=1							
7								
8	nº foto	índice	Radio de giro	Área proyectada	nº partículas primarias	Dimensión fractal	Prefactor	Fallo
9	clean-image1	1	433,9353763	1018914,167	0	0	0	No hay convergencia
10	clean-image2	1	182,0363157	45681,63265	118	1,573577881	1,8118167	-
11	clean-image3	1	104,5312726	25843,27053	57	1,717718506	1,810703946	-
12								
13	Media		143,2837942	35762,45159	87,5	1,645648193	1,811260323	
14	Desviación típica		54,8043416	14027,84039	43,13351365	0,101922813	0,000786835	
15								
16	nº ejecuciones exitosas			2				
17	nº ejecuciones fallidas			1				

Ilustración 42. Resultados Fractal MP con B10

Durante el análisis de la imagen 1, el software reportó un fallo de “No hay convergencia”, debido a que la imagen presentaba un agregado complejo en su forma.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Motor tipo Cummins ISF 2,8L							
2	Condiciones de funcionamiento: n=2800 [rpm], M=80 [Nm]							
3	Condiciones ambientales: T=T [°C] ±C, p=p [bar] bar							
4	Combustible tipo B10							
5								
6	Versión 2, Coef. aplastamiento=1							
7								
8	nº foto	índice	Radio de giro	Área proyectada	nº partículas primarias	Dimensión fractal	Prefactor	Fallo
9	clean-image	1	74,72620786	20640,94388	55	2,017474365	1,78881062	-
10	clean-image	1	87,83385994	28802,33241	132	2,089447021	1,7847733	-
11	clean-image	1	84,07669157	14841,09576	45	1,630328369	1,80952892	-
12								
13	Media		82,21225312	21428,12401	77,33333333	1,912416585	1,79437095	
14	Desviación típica		6,749795091	7013,827171	47,60602203	0,246931847	0,01328149	
15								
16	nº ejecuciones exitosas			3				
17	nº ejecuciones fallidas			0				
18								

Ilustración 43. Resultados Fractal AP con B10

5. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño, construcción, puesta punto y aplicación de una sonda termoforética para la recolección de partículas en motores diesel. El sistema desarrollado se desempeñó muy bien, y permitió tener resultados satisfactorios.

Las competencias técnicas adquiridas durante el estudio de la ingeniería mecánica, permiten plantear soluciones a muchas necesidades en la vida diaria, tanto en el campo científico como industrial. En este caso en particular, se usaron conocimientos de las áreas de transformación de energía, de diseño y manufactura, así como de control y computación.

La asociación de los diferentes mecanismos con el control lógico programable, permitió conseguir las acciones necesarias, con alta repetibilidad, lo cual es fundamental dentro de la experimentación científica, para reducir las incertidumbres.

El uso de la sonda termoforética desarrollada permitió determinar que el tamaño de las partículas disminuye a altas velocidades de giro del motor. Esto se explica por la reducción de los tiempos de residencia, lo cual evita que la partícula crezca y los agregados también reducen su tamaño al disminuir las colisiones entre partículas [17]. Estos resultados se hacen más evidentes con un gran número de imágenes analizadas.

Este proyecto permitió aumentar las capacidades de investigación del grupo GIMEL, ya que el laboratorio de máquinas térmicas quedó dotado con un sistema adecuado para la recolección de material particulado, orientado al análisis de imágenes de microscopía electrónica de alta resolución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.R. Kholghy, Y. Afarin, A.D. Sediako, J. Barba, M. Lapuerta, C. Chu, J. Weingarten, B. Borshanpour, V. Chernov, M.J. Thomson, Comparison of multiple diagnostic techniques to study soot formation and morphology in a diffusion flame, *Combust. Flame*. Vol. 176 (2017), p. 1339–1351.
- [2] A. Neer, U.O. Koylu, Effect of operating conditions on the size, morphology, and concentration of submicrometer particulates emitted from a diesel engine, *Combust. Flame*. Vol. 146 (2006), p. 142–154.
- [3] CARB, California Air Resources Board. Definition of PM, (2019). https://ww2.arb.ca.gov/about/glossary?keywords=particulate+matter#search_anchor.
- [4] L. Dong, W. Han, X. Liang, Y. Wang, Comparative Study on Particles Formation in a Diesel Engine When Lubricating Oil Involved in Fuel Combustion, *J. Chem.* (2015), p. 1–7.
- [5] M. Lapuerta, F.J. Martos, J.M. Herreros, Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates, *J. Aerosol Sci.* Vol. 38 (2007), p. 455–466.
- [6] P. Intra, N. Tippayawong, An overview of differential mobility analyzers for size classification of nanometer-sized aerosol particles, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* Vol. 30 (2008), p. 243–256.
- [7] Dekati, ELPI Plus User Manual, (2015).
- [8] M.C. Jeonghoon Lee, Igor Altman, Design of thermophoretic probe for precise particle sampling, *J. Aerosol Sci.* Vol. 39 (2008), p. 418–431.
- [9] EM Resolutions Ltd, Lacey carbon support films for TEM, Lacey Carbon Support Film. TEM. (2019). <https://emresolutions.com/tem-products/support-films/lacey-carbon-support-films-for-tem/>.
- [10] M.L. Botero, E.M. Adkins, S. González-Calera, H. Miller, M. Kraft, PAH structure analysis of soot in a non-premixed flame using high-resolution transmission electron microscopy and optical band gap analysis, *Combust. Flame*. Vol. 164 (2016), p. 250–258.
- [11] T. Ltd., Tecnai G 20. The benchmark for multi-tasking. *Electronic Microscope.*, 2019.
- [12] E. Luis, Desarrollo de una interfaz de usuario para determinación de la dimensión fractal. Proyecto fin de carrera, Universidad de Castilla-La Mancha, 2014.
- [13] M. Lapuerta, J. José, F.J. Martos, Effect of sintering on the fractal prefactor of agglomerates, *Powder Technol.* Vol. 271 (2015), p. 141–154.
- [14] F.A. Ruiz, Particulate Matter From Tem Images Produced By Dual-Fuel N-

Butanol. Paper 50518, in: IMECE 2018, 2018: p. 1–10.

- [15] M. Lapuerta, R. Ballesteros, F.J. Martos, A method to determine the fractal dimension of diesel soot agglomerates, *J. Colloid Interface Sci.* Vol. 303 (2006), p. 149–158.
- [16] Controllino, Datasheet Controllino Mini. V1.0, (2016).
- [17] M. Cadrazco, A. Santamaría, J.R. Agudelo, Chemical and nanostructural characteristics of the particulate matter produced by renewable diesel fuel in an automotive diesel engine, *Combust. Flame.* Vol. 203 (2019), p. 130–142.

ANEXOS

Anexo 1. Imágenes TEM obtenidas

- Modo Media Potencia con combustible B100

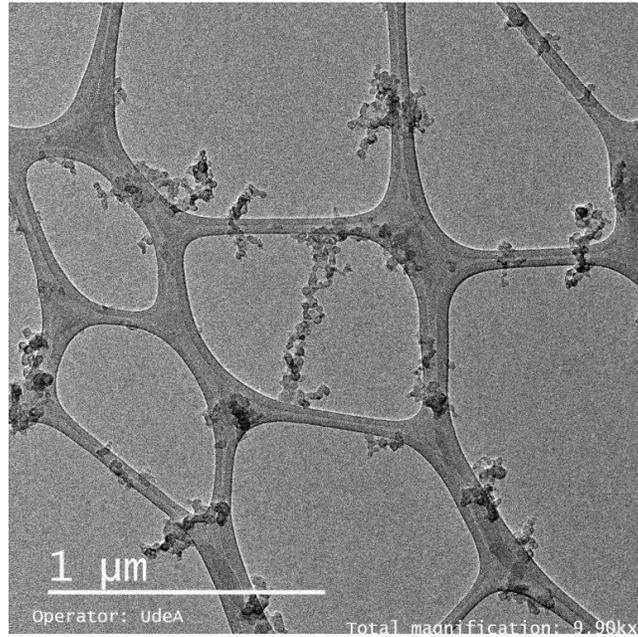


Ilustración 44. Imagen1 MP con B100

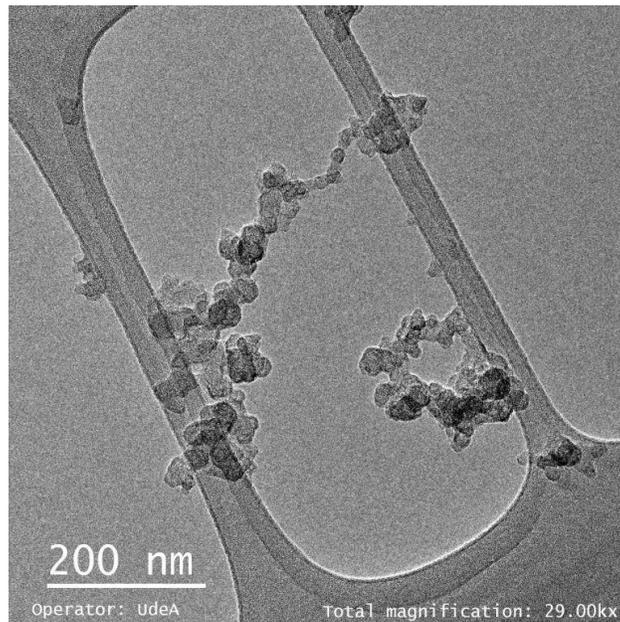


Ilustración 45. Imagen2 MP con B100

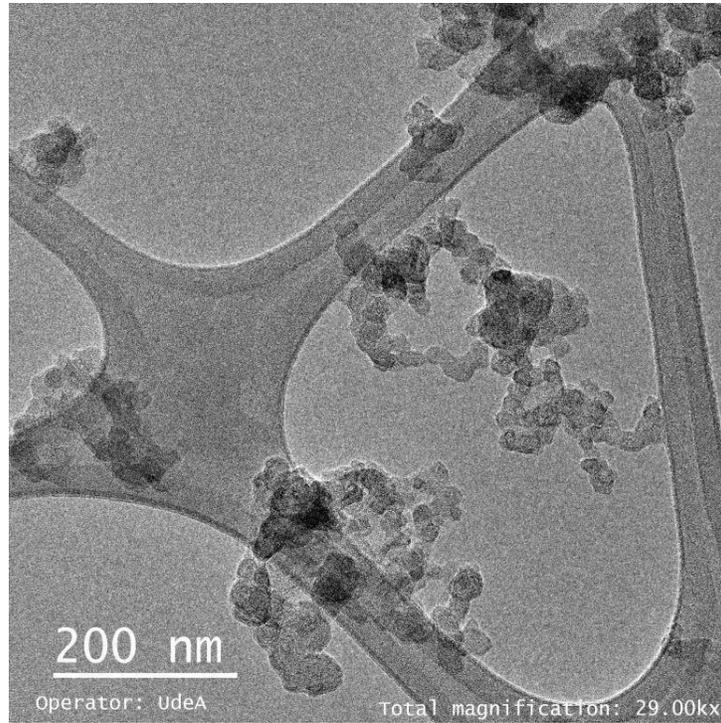


Ilustración 46. Imagen3 MP con B100

- Modo Alta Potencia con combustible B100

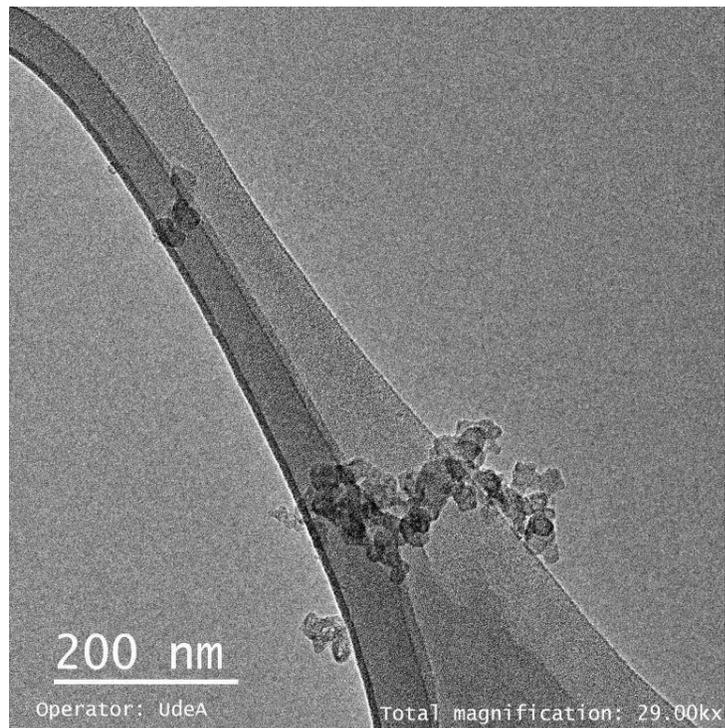


Ilustración 47. Imagen1 AP con B100

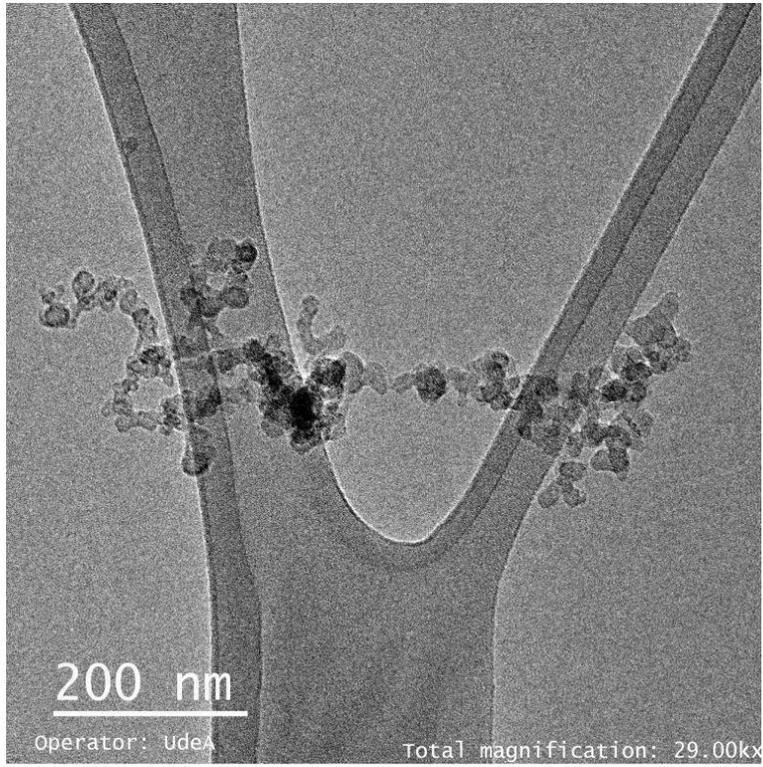


Ilustración 48. Imagen2 AP con B100

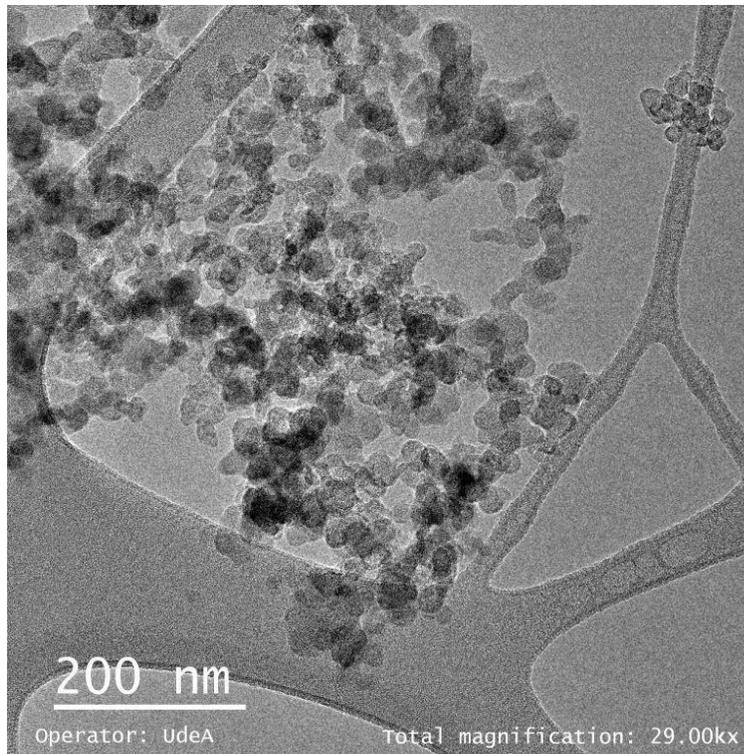


Ilustración 49. Imagen3 AP con B100

- Modo Media Potencia con combustible B10

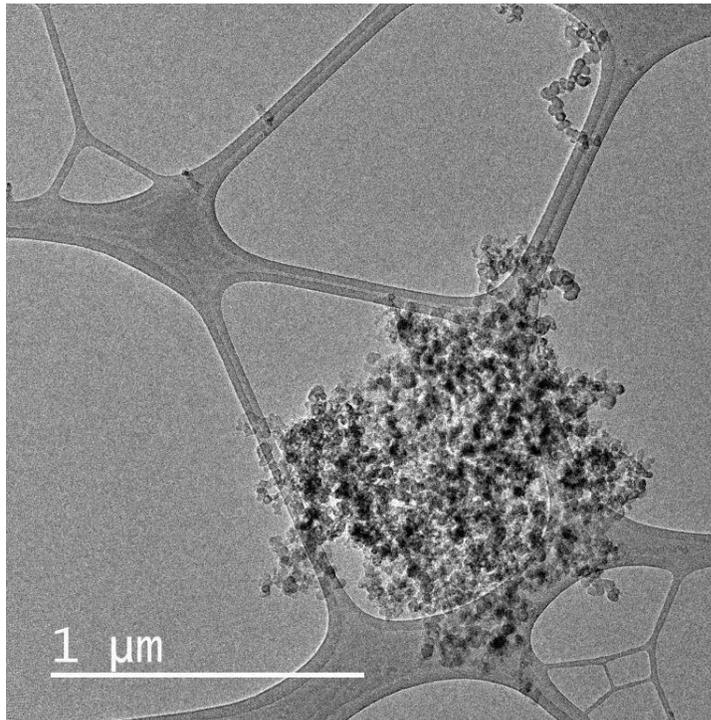


Ilustración 50. Imagen1 MP con B10

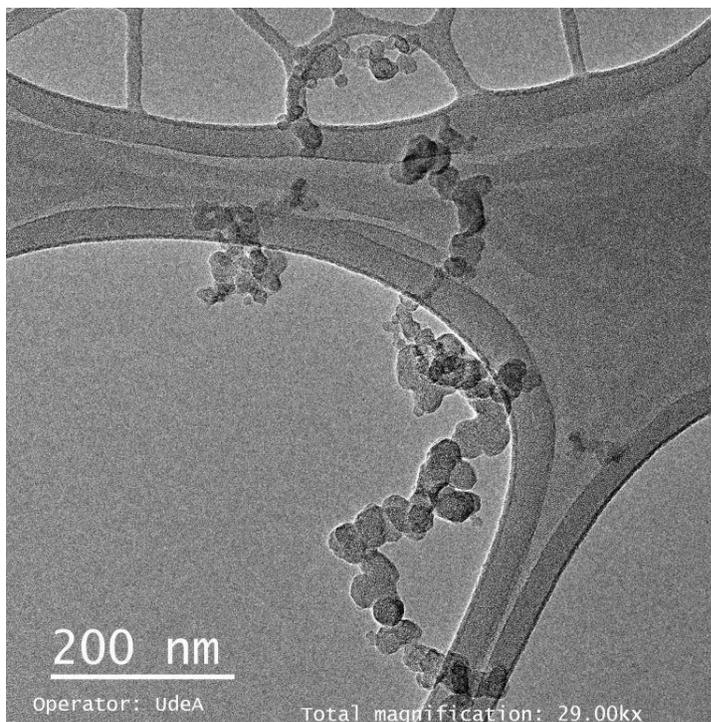


Ilustración 51. Imagen2 MP con B10

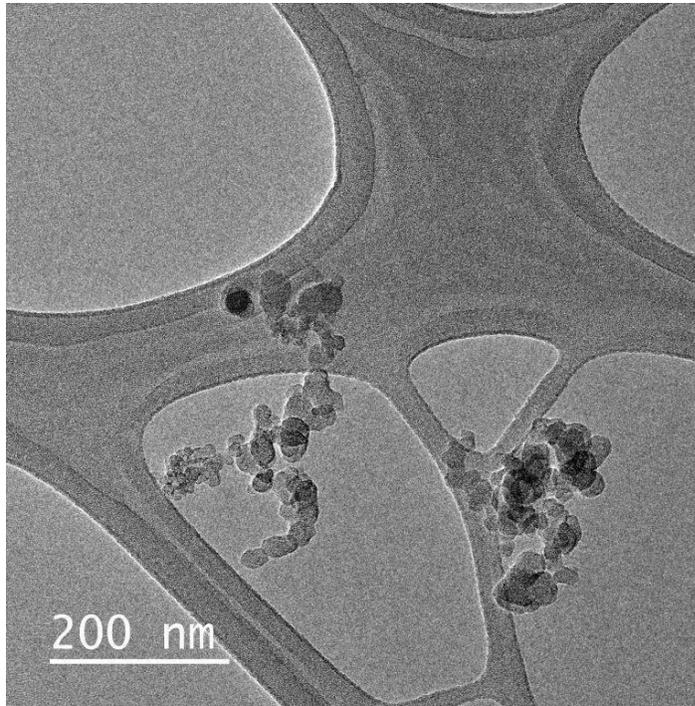


Ilustración 52. Imagen3 MP con B10

- Modo Alta Potencia con combustible B10

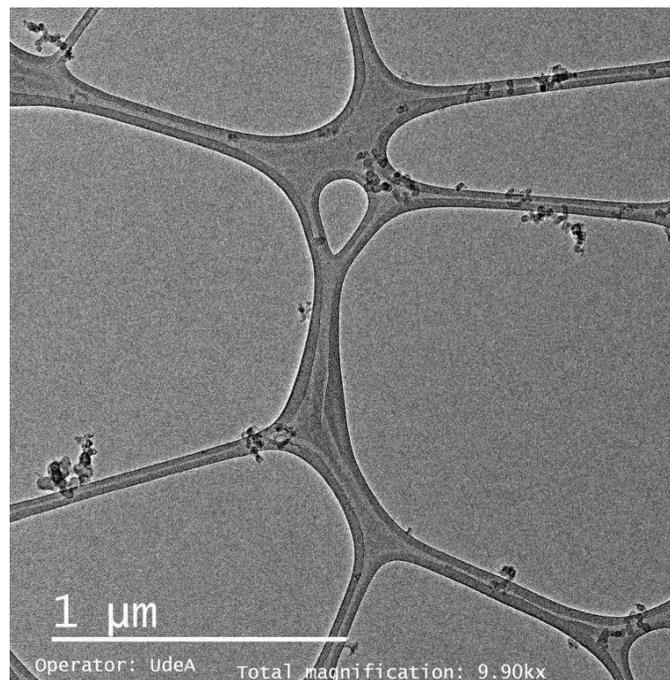


Ilustración 53. Imagen1 AP con B10

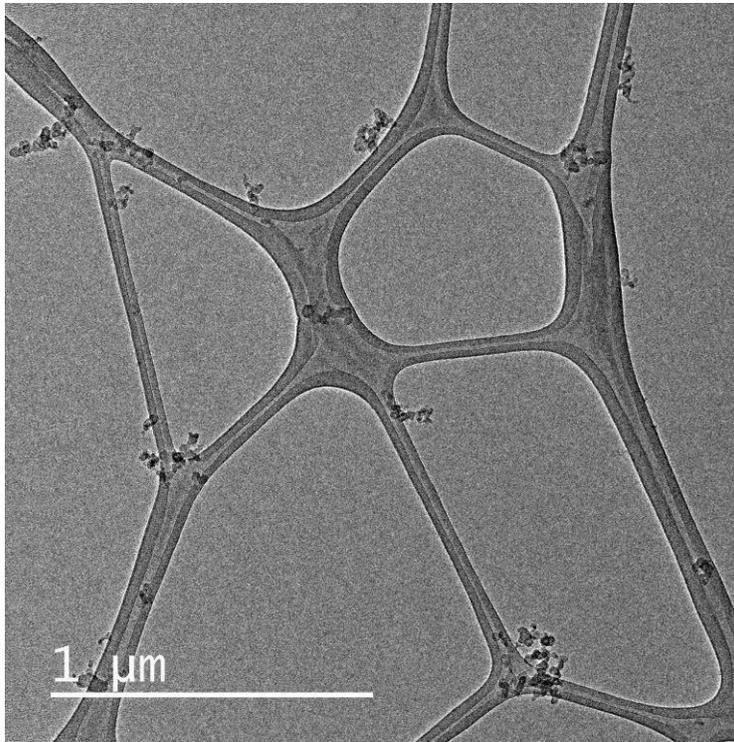


Ilustración 54. Imagen2 AP con B10

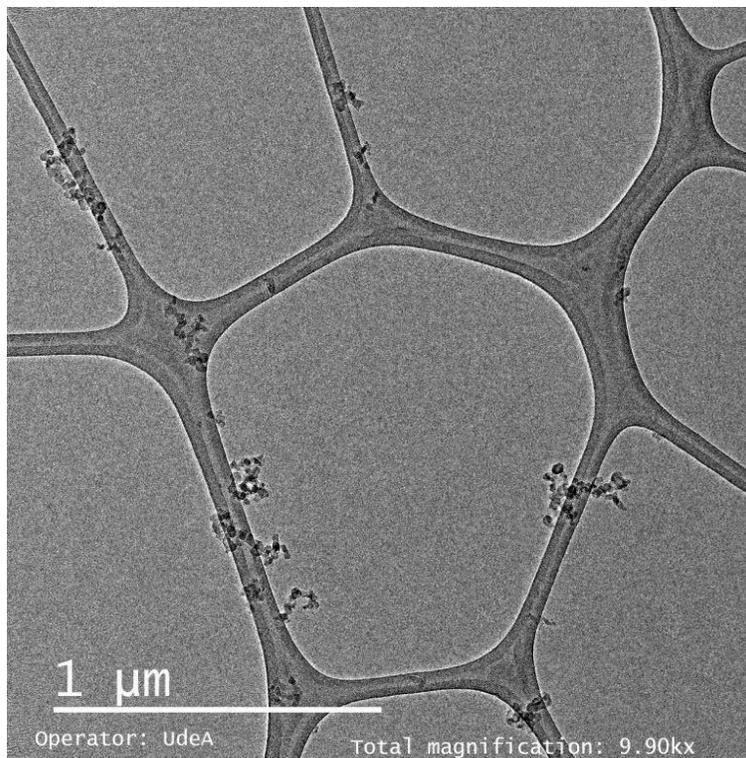


Ilustración 55. Imagen3 AP con B10

Anexo 2 imágenes limpias para análisis con el programa FRACTAL

- Modo Media Potencia con combustible B100



Ilustración 56. clean-image1 MP con B100

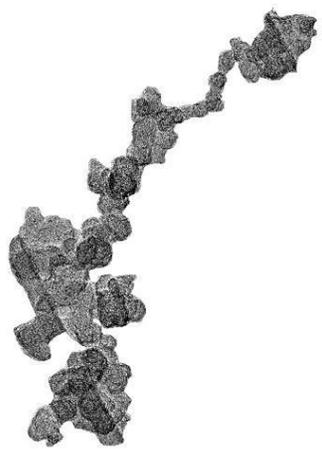


Ilustración 57. clean-image2 MP con B100

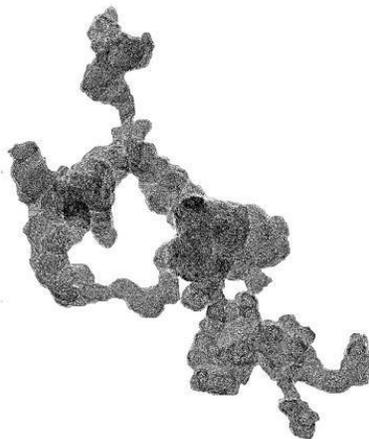


Ilustración 58. clean-image3 MP con B100

- Modo Alta Potencia con combustible B100

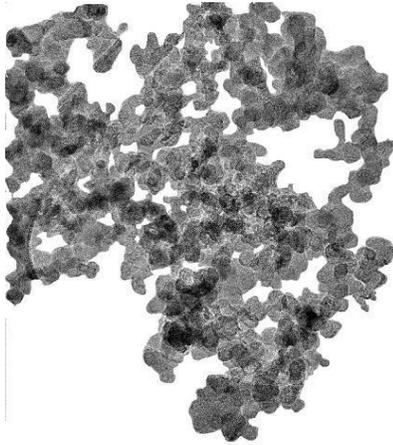


Ilustración 59. clean-image1 AP con B100

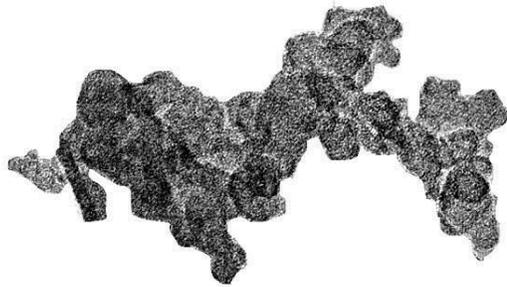


Ilustración 60. clean-image2 AP con B100

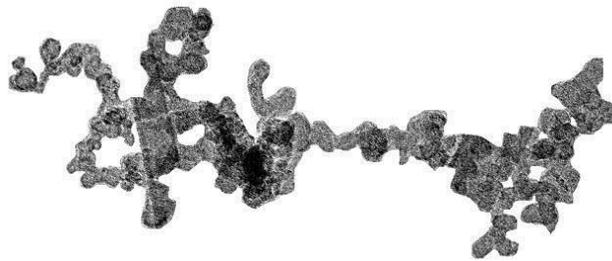


Ilustración 61. clean-image2 AP con B100

- Modo Media Potencia con combustible B10

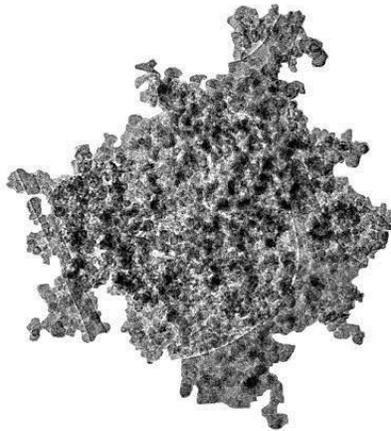


Ilustración 62. clean-image1 MP con B10

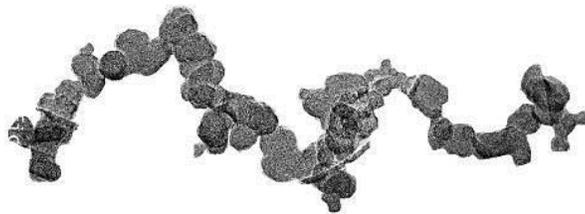


Ilustración 63. clean-image2 MP con B10

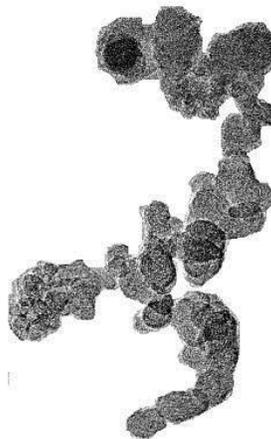


Ilustración 64. clean-image3 MP con B10

- Modo Alta Potencia con combustible B10



Ilustración 65. clean-image1 AP con B10



Ilustración 66. clean-image2 AP con B10



Ilustración 67. clean-image3 AP con B10