



Diseño y fabricación de un dispositivo termoforético para la recolección de material particulado en el ambiente

Carlos Mateo Vélez Rodríguez

Luisa Fernanda Gómez Buitrago

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero electrónico e Ingeniera electrónica.

Tutor

Andrés Felipe López García, PhD. en Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Vélez Rodríguez & Gómez Buitrago, 2022)
Referencia	Vélez Rodríguez, C. M., & Gómez Buitrago, L. F. (2022). <i>Diseño y fabricación de un dispositivo termoforético para la recolección de material particulado en el ambiente</i> . [Trabajo de pregrado]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Augusto Enrique Salazar Jiménez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Lista de tablas	4
Lista de figuras.....	4
Resumen.....	5
Introducción	6
Objetivos	7
General.....	7
Específicos.....	7
Marco Teórico	8
• PM	8
• Termoforesis	8
• Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	9
• Análisis de imágenes	10
Metodología.....	10
• Recopilación y depuración de información	10
• Diseño de la estructura, selección del método de fabricación y del material de la estructura del muestreador termoforético	11
• Selección de componentes electrónicos.....	12
• Caracterización de sensores y actuadores y acondicionamiento de señales	13
• Elaboración de un prototipo y montaje del sistema electrónico	16
• Programación del dispositivo de control	17
• Pruebas de recolección de PM.....	18
• Elaboración del dispositivo final	18
• Desarrollo de software de análisis de imágenes de material particulado	19
Cronograma de actividades.....	21
Presupuesto	22
Resultados y análisis.....	23
Conclusiones	28
Líneas futuras	29
Referencias Bibliográficas	30

Lista de tablas

Tabla 1. Cronograma de actividades	21
Tabla 2. Presupuesto.....	22

Lista de figuras

Figura 1. Diseño seleccionado para fabricación	11
Figura 2. Diseño CAD Muestreador Termoforético.	11
Figura 3. Componentes electrónicos.....	13
Figura 4. Caracterización de la bomba para succión de la muestra.....	14
Figura 5. Caracterización de dos resistencias calefactoras.	15
Figura 6. Diseño de tarjeta electrónica.....	16
Figura 7. Esquema electrónico de pulsadores del LCD Keypad Shield de DF Robot .	17
Figura 8. Prototipo.....	17
Figura 9. Prototipo recolector de PM.....	19
Figura 10. Montaje prototipo.....	23
Figura 11. Dispositivo final.	24
Figura 12. Algunos resultados de las pruebas de recolección.	24
Figura 13. Detalles en formato TIF de las imágenes obtenidas por medio del microscopio TEM.	25
Figura 14. Gráfico de diámetro promedio de partícula vs densidad de frecuencia .	25
Figura 15. Resultados arrojados por el software de análisis de imágenes de PM.....	26
Figura 16. Imágenes software.....	26
Figura 17. Selección de partículas software	27
Figura 18. Marcación manual mediante regionprops.....	27

Resumen

Diversas actividades desarrolladas por el ser humano usan la combustión, la cual es generadora de diversos contaminantes que impactan el medio ambiente y la salud de las personas, principalmente en entornos urbanos donde se concentra la industria y los medios de transporte que usan combustibles fósiles. Uno de los contaminantes de mayor interés de investigación es el material particulado (PM) que se suele clasificar por tamaños, según su nivel de impacto en el entorno. Esta problemática motivó la realización de la tesis de maestría "Conteo del número de partículas y caracterización morfológica del material particulado medio ambiental en grandes centros urbanos", la cual requirió recolectar material particulado ultrafino UFP (tamaño inferior a 500 nm). Para lograrlo, se construyó un muestreador termoforético cuya estructura se basó en otras desarrolladas en estudios previos, logrando la recolección con pruebas realizadas durante 6 horas continuas aproximadamente, en diferentes horarios (diurnos y nocturnos), en las instalaciones de la Ciudad Universitaria de la Universidad de Antioquia, sede Medellín. En cuanto al diseño, se fabricó un prototipo y posteriormente se hicieron modificaciones al diseño de la estructura para facilitar la manipulación de la rejilla recolectora. Se diseñó y fabricó una tarjeta electrónica para realizar la interconexión de los sensores y actuadores con el controlador principal (Controllino Mini) en el que se programó un sistema de control ON/OFF para mantener la temperatura deseada del sistema. Se configuró el dispositivo para tener un delta de temperatura máximo entre sus superficies internas de 70 °C. Por medio de uso de un microscopio TEM se pudo constatar la recolección de PM y las imágenes obtenidas en el microscopio eran procesadas inicialmente de forma manual para posteriormente hacer uso de un software que hace extracción de las características del material particulado. Como complemento de este trabajo de grado, se desarrolló otro software que permitió facilitar el procedimiento que se realizaba manualmente de preprocesamiento de imágenes (limpieza del fondo) para poder ser procesadas posteriormente en otras aplicaciones.

Introducción

Las actividades cotidianas como lo son, el transporte en automóviles, motocicletas y la producción industrial, emiten emisiones contaminantes a la atmósfera que son nocivos para la salud [1]. Por este motivo, ha crecido el interés en estudiarlas y recolectarlas, en especial el material particulado (PM), para comprender su comportamiento e impacto en la salud y el medio ambiente.

La línea de máquinas térmicas del grupo GIMEL en los últimos años ha venido trabajando en diferentes proyectos evaluando la calidad del aire del Valle de Aburrá y de Colombia, y las fuentes que lo impactan. Durante el desarrollo de uno de sus proyectos de maestría, denominado "Conteo del número de partículas y caracterización morfológica del material particulado medio ambiental en grandes centros urbanos", en el que se busca evaluar si el PM 2.5 (material particulado con diámetro menor a 2.5 micrómetros) es un parámetro suficiente como contaminante criterio para determinar concentración de partículas en el aire, y comparar la estructura de las partículas ambientales con la de las generadas por fuentes de combustión. Para ello se pretende recolectar PM del ambiente cuyo tamaño es de nanómetros (nm); sin embargo, en los métodos tradicionales de recolección de PM como filtros y bomba de vacío se ha encontrado que no son los más idóneos para hacer análisis morfológico y nanoestructural [2]. Es aquí donde la termoforesis toma un papel importante ya que su principio físico es usado para recolectar material particulado ultrafino (UFP) del ambiente (menor a 500 nm), donde los primeros muestreadores termoforéticos se emplearon para evaluar la exposición al PM [3].

Buscando resolver esta necesidad, se plantea el diseño de un dispositivo muestreador que funcione bajo el principio de termoforesis para recolectar PM del ambiente en una rejilla. El dispositivo estará compuesto por una estructura de tamaño y forma definida, que contendrá elementos de calefacción, enfriamiento, succión y sensores, cuyo funcionamiento será guiado, mediante un programa, por una unidad de control que permitirá que se mantenga en un punto de operación deseado.

El PM capturado en la rejilla se podrá llevar a un microscopio electrónico de transmisión (TEM) para obtener imágenes a una escala del orden de 500 nm. De estas imágenes se podrán obtener características del PM para realizar su

caracterización morfológica y nanoestructural. Esta tarea será cumplida desarrollando un software de procesamiento de imágenes que obtendrá las características que se requieran analizar durante la ejecución del proyecto de maestría mencionado.

Objetivos

General

Diseñar y fabricar un muestreador termoforético, tomando como referencias las tecnologías existentes, para recolectar material particulado y evaluar las condiciones ambientales en algunos sectores de la ciudad de Medellín.

Específicos

- Fabricar la estructura del muestreador termoforético haciendo uso de diseños desarrollados en estudios previos.
- Adquirir la unidad de control, los sensores y actuadores adecuados para el dispositivo y hacer la caracterización y el acondicionamiento de señales a los elementos que corresponda.
- Programar el microcontrolador o PLC, que será el encargado de controlar el sistema por medio de la lectura de los sensores seleccionados e instrumentados.
- Realizar mediciones ambientales con el muestreador termoforético y obtener imágenes de la rejilla recolectora de partículas por medio de la técnica TEM, que permitan evaluar y mejorar su funcionamiento a través de la modificación de las variables a controlar del sistema.
- Desarrollar un software que permita analizar las imágenes obtenidas por técnica TEM de las muestras recolectadas en el equipo termoforético, para obtener características o propiedades del PM, relacionadas con su morfología y su nanoestructura.

Marco Teórico

- **PM**

El material particulado (PM) hace referencia a una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire, como por ejemplo, la suciedad, el polvo, el hollín o el humo, que son lo suficientemente grandes u oscuros para ser observados a simple vista. Otras partículas son tan pequeñas que solo pueden observarse con un microscopio electrónico [4].

El PM suele clasificarse en PM10 (partículas con tamaño igual o inferior a 10 micrómetros) y en PM2.5 (partículas con tamaño igual o inferior a 2.5 micrómetros). Estas partículas que se forman en diferentes tamaños y que están compuestas por muchos elementos o sustancias químicas diferentes, son emitidas directamente por fuentes como sitios de construcción, carreteras sin pavimentar, chimeneas o incendios. Pero la gran mayoría de partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones de sustancias químicas contaminantes emitidos por centrales eléctricas, la industria y los medios de transporte [4].

En años recientes ha aumentado el interés de estudiar el PM debido a su impacto ambiental negativo (reducción de visibilidad o neblina, acidificación de fuentes hídricas, afectación a los ecosistemas, entre otros) y a su impacto a la salud (generación de problemas cardíacos y respiratorios). Todas estas afectaciones están directamente vinculadas al tamaño de la partícula, especialmente a partículas PM10 [5].

- **Termoforesis**

Existen diversos métodos de recolección de PM: Directos e indirectos. Los métodos directos tales como, conteo de partículas por condensación, carga por difusión o medidores de partículas por movilidad, son ampliamente usados, pero tienen una gran desventaja porque estos equipos son más robustos, de gran tamaño y de alto costo, lo que los hace menos prácticos a la hora de medir en espacios pequeños y, además, se capturan las partículas en aglomerados que no permiten el análisis de partículas individuales. Los métodos indirectos, como la termoforesis, permiten analizar la morfología o nanoestructura del material particulado puesto

que la recolección es independiente del diámetro de las partículas (en el rango entre 15 y 300 nanómetros) [6].

Debido a que se desea hacer recolección y análisis de PM con diámetro en escalas nanométricas (alrededor de 100 nm), la termoforesis resulta ser adecuada al ser uno de los métodos más empleados para este fin. La termoforesis es un fenómeno físico de separación de partículas por gradiente térmico. Una partícula inmersa en un gas con una temperatura no uniforme mantenida por una fuerza exterior al sistema, sufre una fuerza que lo acelera y lo mueve de la región más caliente a la más fría en la dirección del flujo de calor, con una velocidad proporcional al gradiente de temperatura [7] logrando con esto la deposición de partículas en la zona más fría (zona donde se ubica la rejilla TEM).

- **Microscopía electrónica de transmisión (TEM)**

Es un instrumento científico en el que se utiliza alto voltaje para producir y enfocar un haz de electrones acelerados en alto vacío que al impactar en una de las caras de una muestra de tejido ultra delgado forman una imagen al emerger por la cara contraria. Con este instrumento se alcanzan aumentos de 1 '000.000 de veces. Hoy en día es posible ver desde los cromosomas y las moléculas de ADN (ácido desoxirribonucleico) hasta átomos, con un poder de resolución de 0.2 nm [8].

La unidad de microscopía electrónica de transmisión ofrece la caracterización de muestras sólidas orgánicas e inorgánicas a nivel nanométrico, mediante la obtención de imágenes y mapas analíticos. Las imágenes de transmisión convencional (CTEM) permiten descubrir la estructura interna de las muestras con una resolución de hasta 0.1 nm, y mediante la difracción de electrones (SAED) se puede obtener valiosa información sobre su estructura cristalina. En las imágenes obtenidas en modo STEM (por barrido), el contraste es proporcional al peso atómico de los elementos de la muestra, lo que nos permite comprobar cómo se distribuyen estos en la estructura [9].

- **Análisis de imágenes**

La experimentación del fenómeno termoforético mediante la recolección de PM en rejilla TEM para la obtención de las imágenes morfológicas, se complementa con su posterior análisis y procesamiento digital para con ello obtener los datos que confirman los resultados del diseño del dispositivo.

Con el avance de la tecnología y la capacidad computacional, es posible mediante software, realizar un análisis preciso de imagen. En este punto, para el análisis de la misma existen diversas técnicas y métodos para la extracción de información, pero cabe resaltar, que existen dos procesos muy importantes en el tratamiento de las imágenes que son: el preprocesamiento, que consiste en mejorar la calidad de la imagen y la segmentación, con el fin de extraer un área específica y así obtener partículas individuales [10].

Metodología

- **Recopilación y depuración de información**

Para cumplir con los objetivos de este trabajo de grado se procedió inicialmente a la búsqueda de información en artículos científicos en los cuales se describe el principio de funcionamiento de un dispositivo termoforético. Durante el desarrollo de esta actividad se encontraron diferentes arquitecturas de diseño de este dispositivo.

El diseño del equipo fabricado inicialmente (Figuras 1 y 2), basado en diseños de algunos artículos científicos, se seleccionó por consenso entre los desarrolladores de este trabajo de grado y de la tesis de grado de maestría "Conteo del número de partículas y caracterización morfológica del material particulado medio ambiental en grandes centros urbanos". Los principales criterios tenidos en cuenta para seleccionar la estructura del dispositivo fueron la facilidad de su fabricación y de la instalación de sensores y actuadores, y la facilidad para manipular la rejilla recolectora.

El dispositivo está diseñado de la siguiente manera: este posee internamente dos superficies opuestas entre sí que están separadas aproximadamente 1 milímetro

y entre las cuales se estableció un diferencial de temperatura. Para lograrlo, en una de las superficies se instaló una resistencia calefactora y en la otra una celda de Peltier para enfriarla. Por medio de estas dos superficies se hace pasar aire con una bomba cuyo caudal de succión es de 2 litros por minuto sin carga. En medio de las dos superficies se ubica una rejilla recolectora de material particulado, magnetizable, la cual está asentada sobre un imán que evitará que se mueva mientras la bomba esté activada y genere flujo de aire.

- **Diseño de la estructura, selección del método de fabricación y del material de la estructura del muestreador termoforético**

Posterior a la selección del diseño se realizó el esquema de la estructura haciendo uso del software CAD Inventor, con ayuda de personal del grupo GIMEL Máquinas Térmicas capacitado para este tipo de actividades.

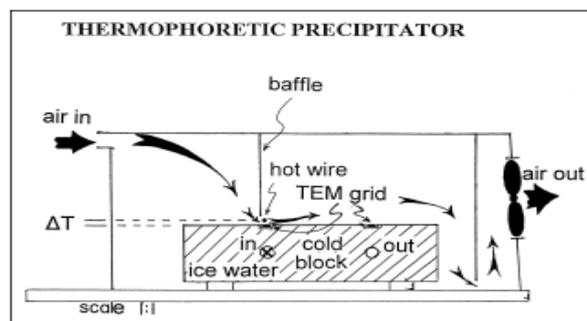


Figura 1. Diseño seleccionado para fabricación [11].

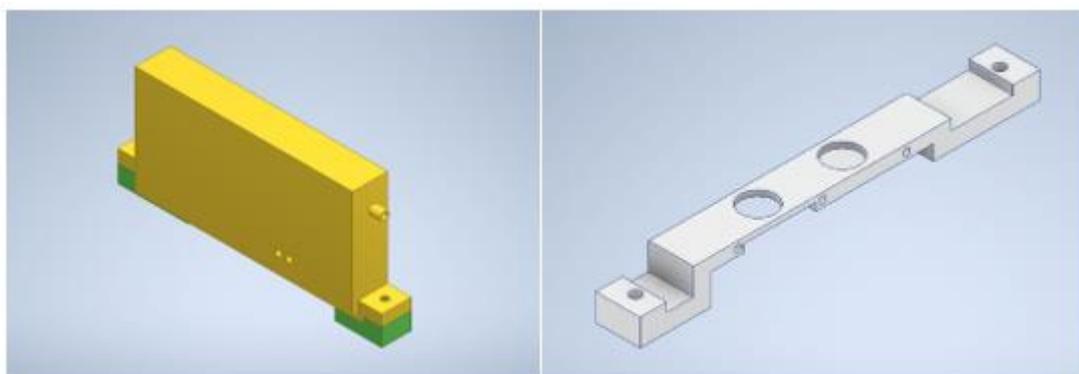


Figura 2. Diseño CAD Muestreador Termoforético. Izquierda: estructura externa del dispositivo. Derecha: parte inferior del dispositivo donde se aloja el imán (perforación circular pasante) y la rejilla para recolectar material particulado.

Luego de hacer el diseño en Inventor, se tuvieron en cuenta los posibles materiales a emplear en su fabricación. Inicialmente se contempló hacer la fabricación en aluminio u otro metal, como una pieza completa, para evitar fugas de aire en el dispositivo. Debido a los costos que representaba fabricarlo en estos materiales, se decidió realizar un prototipo en impresora 3D en material PLA para evaluar su comportamiento. La fabricación de este prototipo tardó aproximadamente cuatro semanas, desde el momento de la solicitud hasta el momento de la entrega.

- **Selección de componentes electrónicos**

Durante el tiempo en que se estuvo fabricando el dispositivo, se realizó la selección y compra de elementos necesarios para su funcionamiento, basado en los requerimientos del trabajo de maestría para el cual el dispositivo funcionó como apoyo para su desarrollo. A continuación se listan los elementos principales adquiridos para instalar en el dispositivo: una resistencia de calentamiento para generar alta temperatura en una de las superficies internas, un termopar tipo K para medir la temperatura de la resistencia, una celda de Peltier con su respectivo disipador y extractor de aire para generar baja temperatura en una de las superficies internas (opuesta a la de alta temperatura), un bloque de aluminio para ubicar la resistencia y el termopar para lograr mejor transferencia de temperatura, un sensor de temperatura LM35 para medir la temperatura de la celda de Peltier, una bomba para generar una succión aproximada de 2 litros por minuto sin carga, imanes, rejillas para recolección de material particulado, un display LCD 16x2 con teclado Keypad Shield de DF Robot, una fuente de voltaje de 3 canales de 12 voltios/10 amperios y un controlador Controllino Mini para generar el control automático del sistema por medio de los sensores y actuadores, el cual posee un circuito integrado Atmega 328p usado en Arduino UNO que puede ser programado usando Arduino IDE (Figura 3).

Durante las pruebas de los elementos se observó que el máximo valor corriente entre los sensores y actuadores no era superior a 5 amperios, con un valor máximo de 12 voltios. Dichos valores son soportados por el Controllino Mini según su hoja de datos [12] [13].

Debido a requerimientos iniciales del trabajo de maestría para el cual se desarrolló el dispositivo, se buscaba que la temperatura máxima que este alcanzaba no fuese superior a los 100 °C para hacer evaluación posterior de la posible existencia de material biológico. Este requisito cambió posteriormente, pero al verificar que el dispositivo logró recolectar material particulado usando temperaturas inferiores a 100 °C, se determinó que el dispositivo final estaría fabricado en PLA. El material PLA también condicionó el máximo de temperatura empleado ya que solo soportaba hasta 100°C antes de empezar a deformarse. Por lo anterior, se decidió que la máxima temperatura a usar en el dispositivo sería de 90° C, y así mismo, el delta máximo de temperatura sería de 70 °C teniendo en cuenta que la celda de Peltier enfrió hasta los 10°C aproximadamente.



Figura 3. Componentes electrónicos. Arriba, de izquierda a derecha: Sensores de temperatura LM35, celda de Peltier, bomba de succión de aire, extractor de aire. Abajo, de izquierda a derecha: resistencia calefactora, termopar tipo K, crema disipadora de calor para la celda de Peltier, disipador de calor para la celda de Peltier, Controllino Mini.

- **Caracterización de sensores y actuadores y acondicionamiento de señales**

Respecto a los sensores y actuadores utilizados, la bomba operó con voltaje constante, ya que el flujo que esta generaba también debía ser constante durante la prueba según la información recolectada de otros artículos. Así mismo, se usó un voltaje constante con la celda de Peltier para tomarla como

temperatura de referencia al momento de hacer el control del delta de temperatura generado entre esta y la resistencia calefactora. Se obtuvo una temperatura mínima de 10 °C aproximadamente.

Durante la caracterización de la bomba (Figura 4) se observó que el consumo de corriente no fue superior a 1 amperio. Además, se obtuvo con 12 voltios el valor de flujo deseado para el sistema.

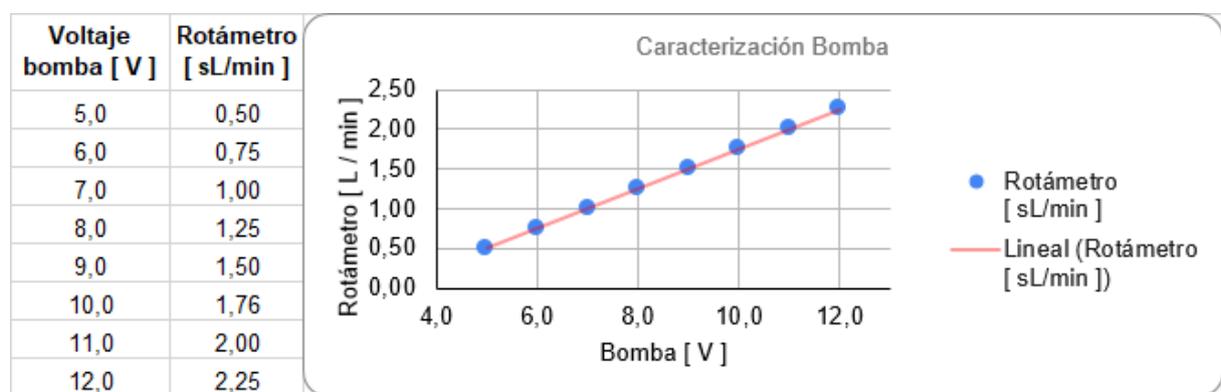


Figura 4. Caracterización de la bomba para succión de la muestra.

Al realizar la caracterización de las dos resistencias calefactoras de las que se disponía (Figura 5) y con ayuda de un sensor LM35, no se observaron diferencias significativas de temperatura en su respuesta a diferentes voltajes, además se apreció que el voltaje al que deben ser operadas para obtener la máxima temperatura permitida es de aproximadamente 6 voltios.

Para interconectar los actuadores y sensores con el Controllino Mini, se diseñaron dos tarjetas electrónicas (Figura 6), teniendo en cuenta algunos parámetros de para minimizar el ruido eléctrico y garantizar la estabilidad de las señales [14][15][16][17][18]. Una se diseñó para el acondicionamiento de la señal del termopar tipo K y la otra para conectar el sensor LM35, el Keypad Shield DF Robot con LCD 16x2 y la señal acondicionada del termopar tipo K. Los dos sensores de temperatura entregan al controlador 10 milivoltios por grado centígrado. El Keypad Shield LCD 16x2, la tarjeta de acondicionamiento del termopar tipo K y el sensor LM35 se conectaron a la fuente de alimentación de 5 voltios del controlador.

Los pulsadores del Keypad Shield se caracterizaron por medio de un código implementado en el Controllino para capturar el valor resultante del ADC cuando

se presionaba cada uno de ellos. En la Figura 7 se observa en el esquema de los pulsadores que estos se conforman por divisores de voltaje que permiten diferenciar cuando se presiona un pulsador a la vez, pero no cuando se presionan simultáneamente. Una vez caracterizados, se definieron umbrales de valores resultantes del ADC para determinar con precisión cuál pulsador se presionaba en cada instante. Las conexiones del LCD Keypad Shield de DF Robot con el Controllino, se realizaron teniendo en cuenta su hoja de datos [19] [20].

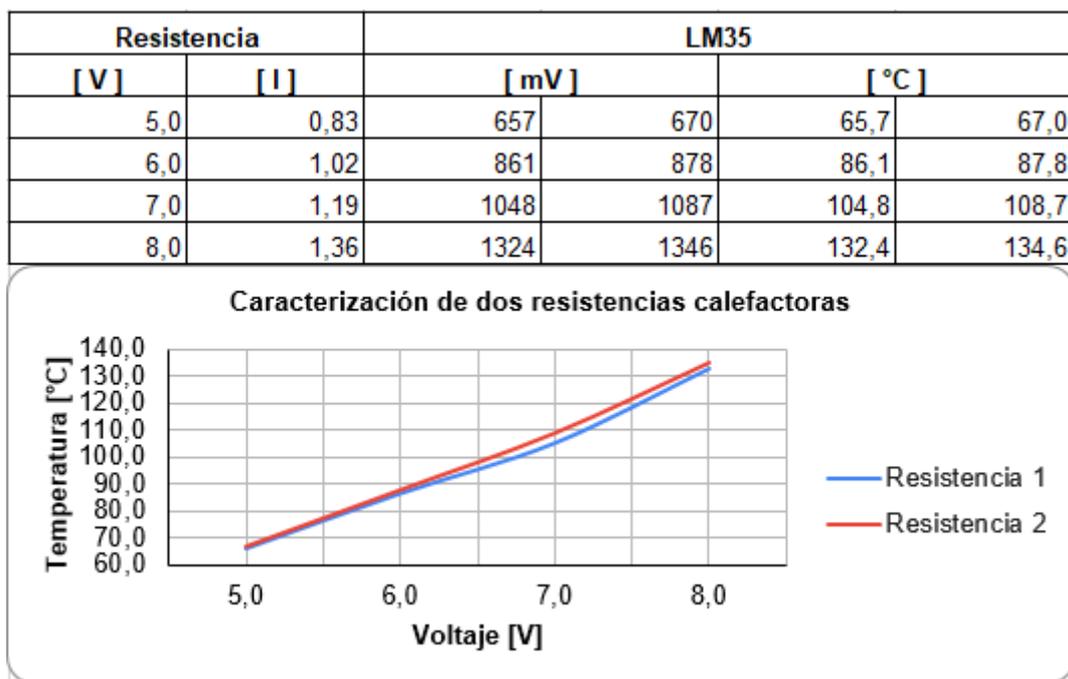


Figura 5. Caracterización de dos resistencias calefactoras.

La conexión de los demás elementos mencionados anteriormente con el Controllino Mini se realizó teniendo en cuenta su hoja de datos de pines encontrada en la página oficial de Controllino [21]. La conexión de la celda de Peltier, su extractor y de la bomba, se hizo directamente a la fuente (los tres elementos a 12 voltios), y la resistencia calefactora se conectó a uno de los puertos de salida de potencia del Controllino Mini (conmutada con 12 voltios). Mediante varias pruebas se pudo observar que las salidas de PWM de alta potencia del Controllino Mini son trapezoidales y siempre entrega mínimo 4.7 voltios, lo cual no era deseado ya que haría que la resistencia calefactora en algunos casos alcanzará temperaturas más altas de lo deseado, razón por la cual se optó por emplear un control ON/OFF, usando una señal pulsada para disminuir el voltaje DC de la fuente de 12 voltios a 6 voltios, y así aprovechar al máximo las

prestaciones del Controllino Mini, cuya salida de alta potencia usa un relé de estado sólido.

- **Elaboración de un prototipo y montaje del sistema electrónico**

Como se observa en el lado derecho de la Figura 2, el prototipo (Figura 8) posee una bandeja inferior con dos agujeros en los cuales se podía ubicar el imán que sostiene la rejilla recolectora. Durante algunas pruebas se tuvieron algunos inconvenientes de condensación del aire en el interior del dispositivo lo cual afectaba la muestra recolectada. Por esta razón se decide hacer modificaciones al diseño que permitan manipular con mayor facilidad la rejilla recolectora, con el objetivo de evitar que la muestra esté sometida a la humedad por largos periodos de tiempo. Para el sistema electrónico, se ubicaron las tarjetas electrónicas dentro de una caja junto con el Keypad Shield y el Controllino Mini, las fuentes se ubicaron externamente y a través de orificios se hizo pasar el cableado que conecta con los actuadores y sensores del muestreador termoforético.

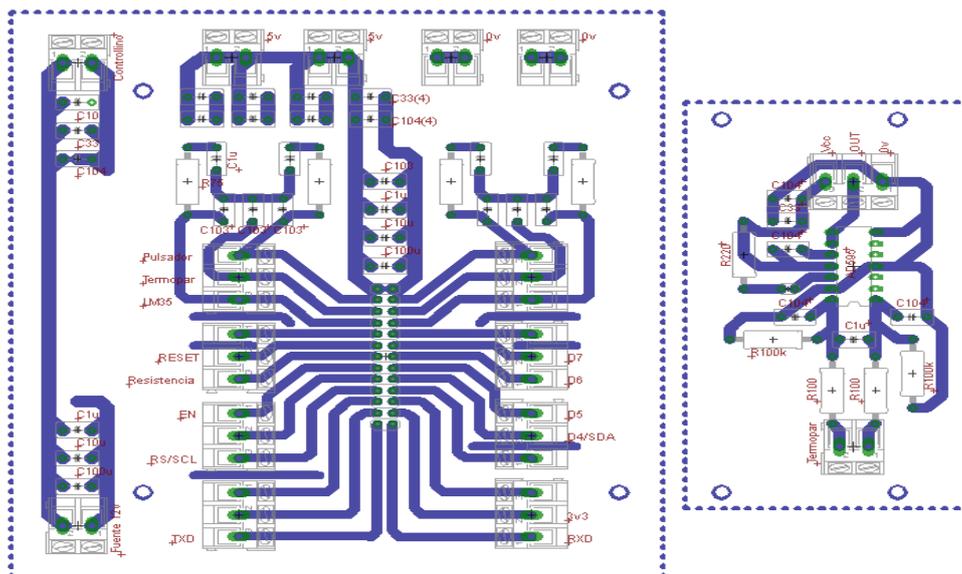


Figura 6. Diseño de tarjeta electrónica. Izquierda: tarjeta electrónica para interconectar display LCD 16x2, señal de termopar acondicionada y LM35. Derecha: tarjeta de acondicionamiento del termopar.

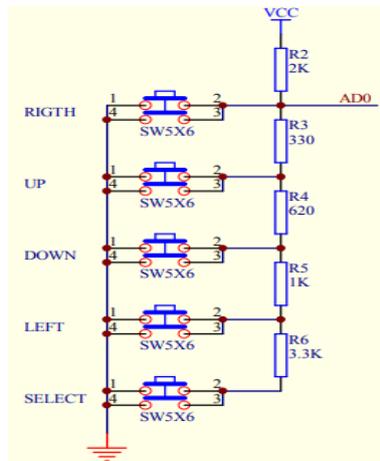


Figura 7. Esquema electrónico de pulsadores del LCD Keypad Shield de DF Robot [19].

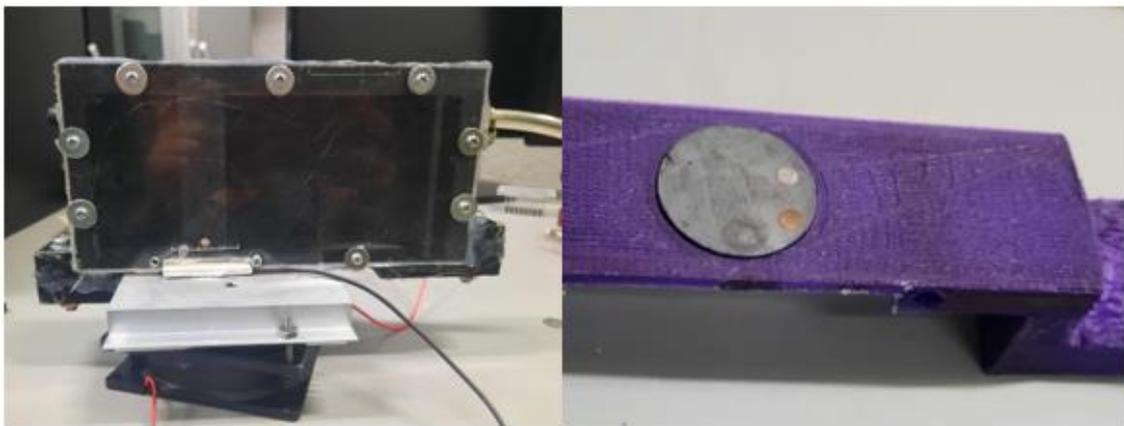


Figura 8. Prototipo. Izquierda: prototipo muestreador termoforético. Derecha: soporte con imán y dos rejillas recolectoras de PM.

- **Programación del dispositivo de control**

Para poder programar el Controllino Mini usando el IDE de Arduino, fue necesario instalar las librerías de Controllino y los controladores para el reconocimiento de la placa. El código permite al usuario decidir si desea ingresar el delta de temperatura deseado, y si no desea hacerlo o si tarda más de 10 segundos en decidir cambiarlo, el sistema iniciará su funcionamiento con el valor del setpoint almacenado en la memoria EEPROM la última vez que se usó. La memoria EEPROM solo se escribe si el valor ingresado es diferente al anterior para evitar desgastarla prematuramente. Una vez que el sistema inicia su funcionamiento,

sea por inicio automático o por configuración realizada por el usuario, se actualizan periódicamente en el LCD los valores del delta de temperatura deseado y del delta de temperatura actual. El control de temperatura se realiza mediante control ON/OFF y se realizan conmutaciones periódicas (cada 100 milisegundos) entre 0 voltios y 12 voltios (señal pulsada generada en pin de salida de potencia del Controllino Mini) para reducir el voltaje DC que alimenta la resistencia, de 12 voltios a 6 voltios.

- **Pruebas de recolección de PM**

Las pruebas de recolección de material particulado se realizaron en las instalaciones de la ciudad universitaria de la Universidad de Antioquia sede Medellín, en horarios diurnos y nocturnos, y por lo menos se realizó una medición cada uno de los siete días de la semana. El dispositivo se ubicó en la terraza del bloque 20 (Figura 9) junto a dispositivos de medición de contaminantes con los cuales se extrajo otro tipo de información.

Las pruebas nocturnas del muestreador termoforético se realizaron durante 6 horas continuas, usualmente de 9 pm a 3 am. Las pruebas diurnas se realizaron entre las 9 am y las 3 pm.

Al poner el dispositivo en funcionamiento, este se demoraba 10 minutos aproximadamente para estabilizar la temperatura. Al finalizar las pruebas, se desactivaba la celda de Peltier y la resistencia calefactora para iniciar el enfriamiento del dispositivo, sin desactivar la bomba evitando que el aire se condensara al interior y se afectara la muestra recolectada.

Se probaron diferentes deltas de temperatura en pruebas diferentes (60, 65 y 70 grados centígrados) para determinar a partir de la examinación de la rejilla si la variación de este parámetro era influyente en el resultado.

- **Elaboración del dispositivo final**

Una vez que se constataron los primeros resultados por medio del microscopio TEM, se realizaron modificaciones al prototipo original buscando que se facilitara

la manipulación de la rejilla recolectora antes y después de hacer las pruebas, y se construyó un soporte para la bomba de succión de la muestra. El nuevo dispositivo fue probado y se logró nuevamente la recolección de PM.

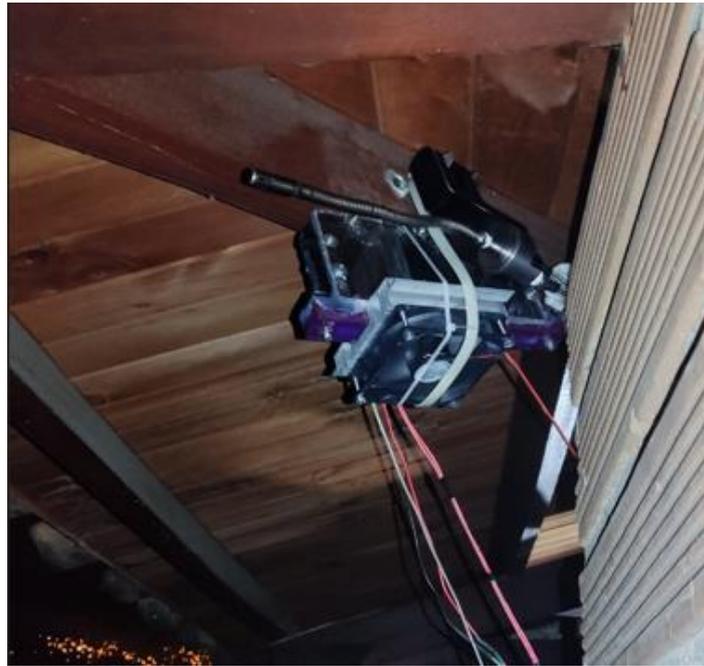


Figura 9. Prototipo recolector de PM en zona de pruebas junto a sonda de equipo de conteo de partículas.

- **Desarrollo de software de análisis de imágenes de material particulado**

Según los requerimientos del trabajo de maestría en ejecución, de las imágenes resultantes del TEM se requiere encontrar el diámetro primario de partícula, por lo cual fue necesario realizar sobre cada imagen:

- Preprocesamiento: para mejorar la calidad y restringirla a la región de interés ubicando los aglomerados de partículas y realizar limpieza de fondo de la imagen.
- Segmentación: extracción del diámetro de la partícula seleccionada manualmente.

Para el desarrollo del código se utilizó el IDE para Python, Spyder y la librería de uso libre OpenCV [22].

Las imágenes a las que se les debía realizar el preprocesamiento eran imágenes en escala de grises detallada en una matriz de $M \times N$ valores en donde cada pixel contiene información de la intensidad de color (2048x2048). En este tipo de imágenes para el preprocesamiento fue necesario redimensionar la imagen ya que estas tenían una dimensión muy grande y para la limpieza de fondo, se realizó una eliminación de ruido de la imagen que usa un algoritmo de medios no locales *cv.fastNlMeansDenoising* junto con operaciones morfológicas como lo son la *erosión* y *dilatación* sobre la imagen original.

El proceso de limpieza se realizó de manera manual seleccionando mediante un *Trackbar* el valor del parámetro de regulación del filtro de eliminación de ruido (*h*) ya que al tratarse una imagen en escala de grises nos encontramos con el problema de la umbralización que reside en la determinación del umbral que segmenta la imagen.

Luego de tener la imagen preprocesada, es decir, la imagen original con fondo blanco y solo en tonos grises los aglomerados de partículas, se procedió a segmentar la imagen para explorar sus características y extraer el diámetro de una región en particular mediante la función *regionprops* que permite dibujar círculos sobre la imagen capturando sus correspondientes coordenadas.

El desarrollo requirió de una etapa adicional de escalado real de la imagen que consiste en una conversión de píxeles a nanómetros para entregar los resultados del diámetro de partícula. Este se realizó mediante la función *regionprops* que permite dibujar líneas sobre la imagen original capturando sus correspondientes coordenadas para obtener la diferencia de píxeles e ingresando manualmente la escala de la imagen original.

Finalmente, el software entrega un archivo de texto que contiene el diámetro de cada partícula identificada manualmente y un archivo de excel que contiene el nombre de la imagen, número de píxeles por cada 100 nm y el diámetro promedio de partículas.

Cronograma de actividades

Actividades	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
1. Recopilación de información	■									
2. Depuración de información	■									
3. Selección y compra de componentes electrónicos		■	■	■	■					
4. Caracterización de los sensores y diseño de hardware asociado		■	■	■	■	■				
5. Selección de material para la estructura, diseño y fabricación del prototipo			■	■	■					
6. Montaje de componentes y pruebas preliminares.					■	■				
7. Programación del dispositivo de control						■				
8. Selección de lenguaje para la realización del software, definición de características a analizar de las imágenes obtenidas con el muestreador termoforético y desarrollo de software				■	■	■				
9. Pruebas del funcionamiento del dispositivo					■	■	■	■		
10. Pruebas finales del software								■	■	
11. Redacción de manuales e informe final							■	■	■	■

Tabla 1. Cronograma de actividades

Presupuesto

El costo total de los recursos de este trabajo de grado fue patrocinado en su totalidad por la línea de máquinas térmicas de GIMEL en apoyo del proyecto de maestría “*Conteo del número de partículas y caracterización morfológica del material particulado medio ambiental en grandes centros urbanos*”.

Elementos	Valor (COP)
1. Herramientas y componentes electrónicos	\$700.000
2. Controllino mini	\$685.000
3. Equipo de computo	\$2.500.000
4. Rejillas de níquel para la recolección de material particulado (caja x25)	\$237.000
5. Fabricación prototipo	\$300.000
6. Fabricación diseño final	\$546.000
7. Fabricación tarjetas electrónicas	\$130.000
8. Microscopio TEM para el análisis de las rejillas (6 horas)	\$1.800.000
9. Personal auxiliar grupo GIMEL (12 horas)	\$100.000
10. Otros gastos	\$ 500.000
Total	\$7.498.000

Tabla 2. Presupuesto

Resultados y análisis

Gracias a la metodología desarrollada, se obtuvo como resultado de este trabajo de grado:

- Dispositivo de control de temperatura.

Este dispositivo (Figura 10) permite variar el delta de temperatura deseado por el usuario para realizar recolección de material particulado por termoforesis. También permite la visualización del delta de temperatura del dispositivo periódicamente para permitir la verificación por parte del operador del mismo. Además, el dispositivo puede ser reiniciado y volver a su estado de operación anterior para facilitar su operación.

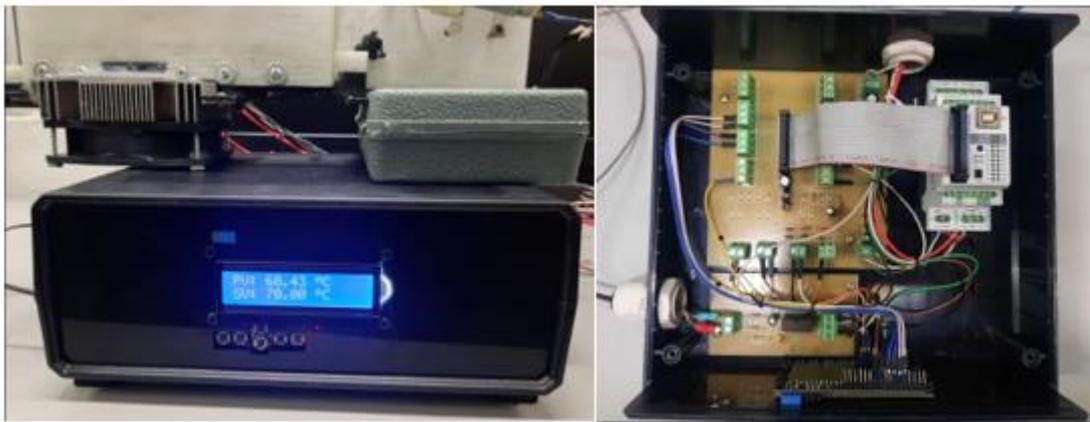


Figura 10. Montaje prototipo. Izquierda: exterior caja electrónica. Derecha: interior caja electrónica.

- Prototipo y dispositivo, recolectores de material particulado nanométrico por medio de termoforesis (Figura 11).

El diseño final facilita al usuario la extracción de la rejilla para su posterior cambio o análisis en laboratorio. En los dos dispositivos fue corroborado el resultado por medio del microscopio TEM, en el cual se observaron las partículas capturadas. Luego de las pruebas de recolección de PM, las rejillas se llevaron al Laboratorio TEM de la Sede de Investigación Universitaria (SIU) para comprobar si se observan aglomerados de partículas. En la Figura 12 se muestran algunas de las imágenes obtenidas como resultado de las pruebas de recolección en las que se aprecia

según el eje de escala que se logró la recolección de nanopartículas. Las imágenes se presentan en una escala de 500 nm con una magnificación total de 19,5kx y con los detalles en formato TIF especificados en la Figura 13.

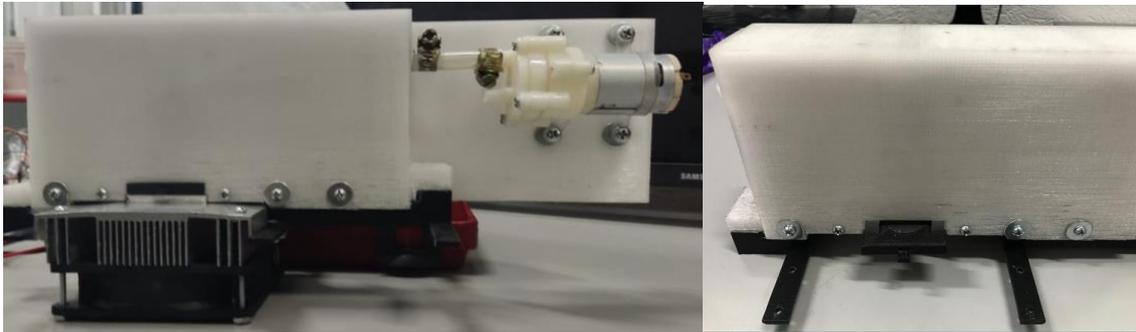


Figura 11. Dispositivo final. Izquierda: estructura final del muestreador termoforético con soporte para la bomba de succión de la muestra. Derecha: bandeja de inserción de rejilla recolectora de PM.

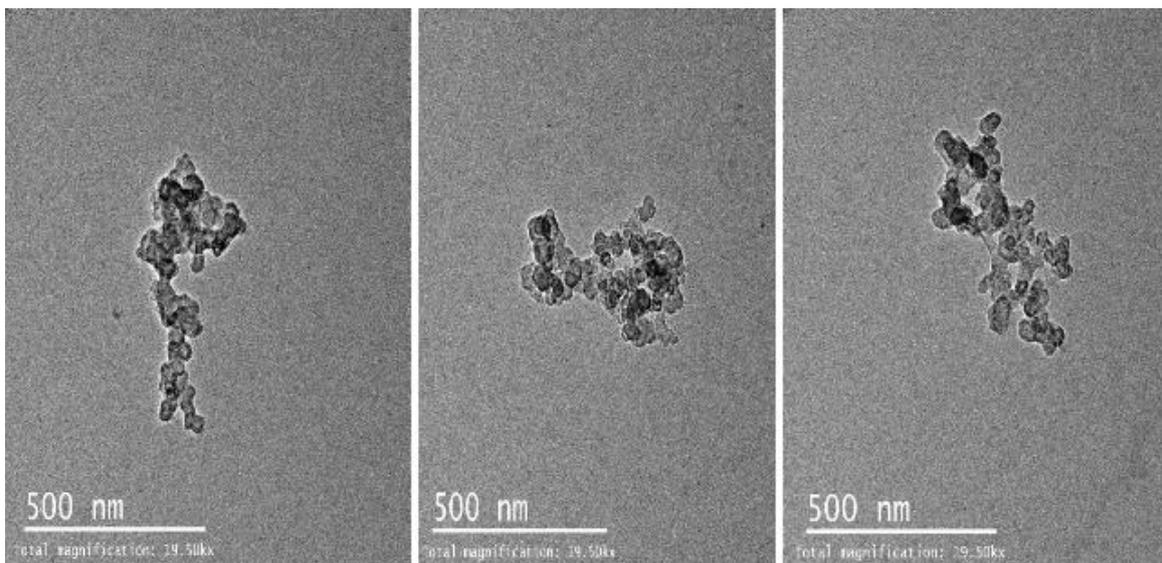


Figura 12. Algunos resultados de las pruebas de recolección.

En la Figura 14 se observa además el resultado gráfico del análisis estadístico realizado con los datos obtenidos con el software desarrollado, con el que se corroboran los diámetros habitualmente recolectados con el muestreador termoforético en distintas pruebas. Los diámetros de las partículas recolectadas varían entre 20 y 25 nanómetros aproximadamente, resultado esperado según lo mencionado en la literatura consultada [6].

Imagen

Id. de imagen	
Dimensiones	2048 x 2048
Ancho	2048 píxeles
Alto	2048 píxeles
Resolución horizontal	72 ppp
Resolución vertical	72 ppp
Profundidad en bits	8

Figura 13. Detalles en formato TIF de las imágenes obtenidas por medio del microscopio TEM.

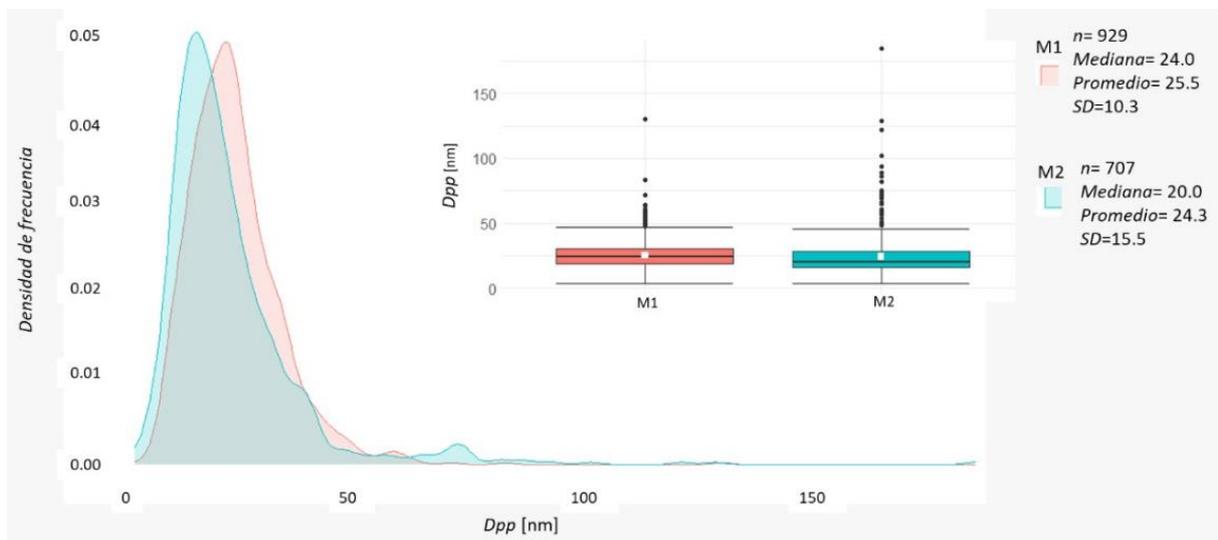


Figura 14. Gráfico de diámetro promedio de partícula vs densidad de frecuencia

- Software de análisis de imágenes de material particulado:

Según los requerimientos del trabajo de maestría en ejecución, de las imágenes resultantes del TEM se obtuvo con el software desarrollado en este trabajo un archivo de texto que contiene el diámetro de cada partícula identificada manualmente y un archivo de excel que contiene el nombre de la imagen, número de píxeles por cada 100 nm y el diámetro promedio de partículas (Figura 14).

Estos datos permiten hacer un mayor análisis del material particulado recolectado en diferentes softwares especializados en el tema.

En las figuras 15, 16 y 17 se ilustra el resultado de limpiar una de las imágenes obtenidas en el microscopio, el proceso de selección manual de partículas para determinación de cada uno de sus diámetros. y la selección de la escala que permite ajustar la imagen al tamaño adecuado, respectivamente.

A8-0009_sizes: Bloc de notas			
Archivo Edición Formato Ver Ayuda			
	A	B	C
1	%name	pix/100nm dpo	
2	R-0002	177	56,000
3	R-0004	177	53,301
4	R-0006	177	48,200
5	R-0008	177	51,000

Figura 15. Resultados arrojados por el software de análisis de imágenes de PM.

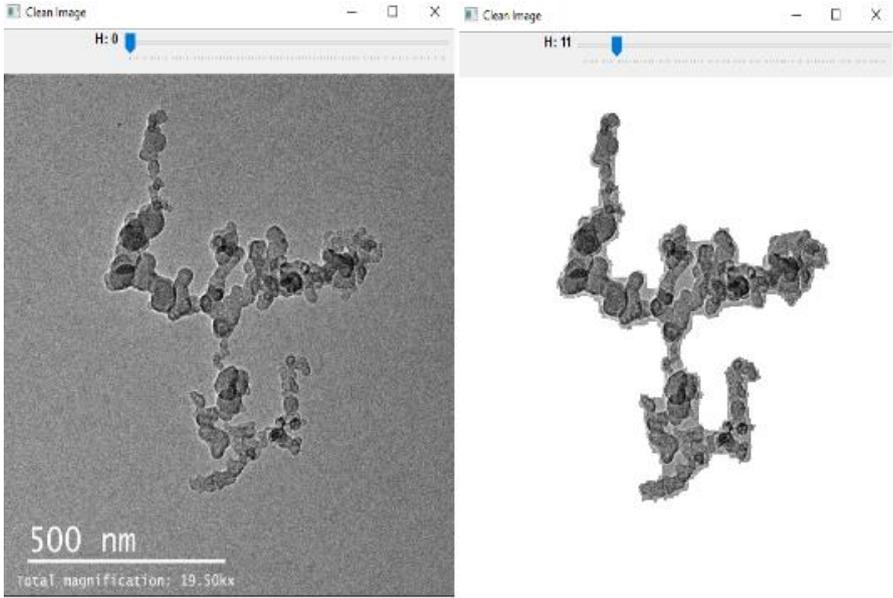


Figura 16. Imágenes software. Izquierda: Imagen original. Derecha: Imagen limpia. Selección del umbral manualmente para el filtrado mediante Trackbar H

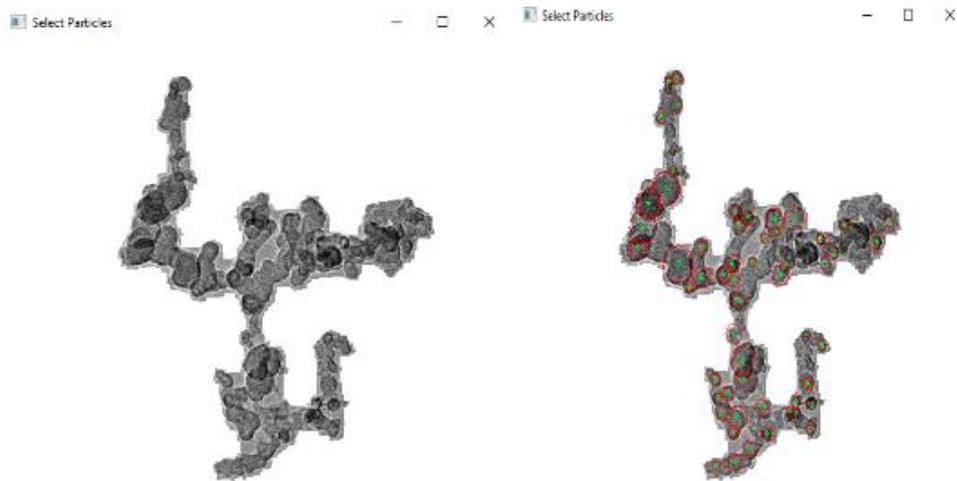


Figura 17. Selección de partículas software. Izquierda: Imagen limpia. Derecha: Selección de partículas individuales manualmente mediante regionprops (círculos)

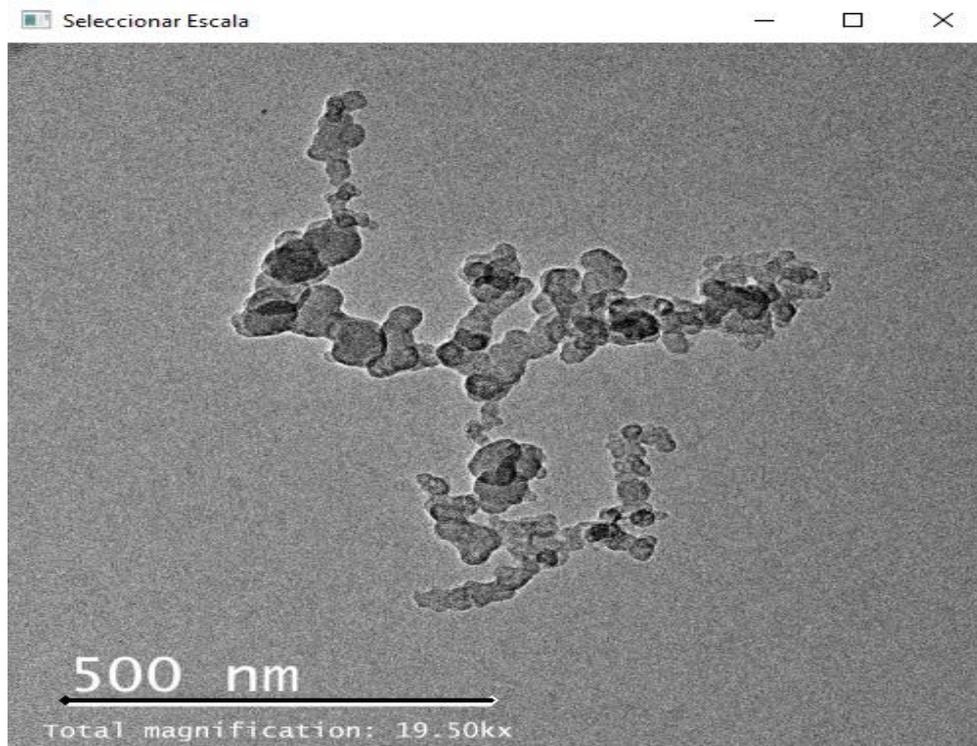


Figura 18. Marcación manual mediante regionprops (línea) para obtener la escala y convertir posteriormente píxeles a nanómetro

Conclusiones

- El diseño y construcción del muestreador termoforético de este trabajo de grado requirió de diversas etapas descritas en la metodología para lograr el objetivo principal: adquisición y filtrado de información, diseño y construcción de un prototipo, pruebas preliminares del prototipo y análisis en microscopio TEM posterior a la recolección con resultados positivos, diseño y construcción de la unidad de control, diseño y construcción del dispositivo final, pruebas definitivas del dispositivo final y análisis en microscopio TEM posterior a la recolección con resultados positivos. Durante la ejecución de cada una de estas etapas se logró un dispositivo final liviano, de fácil uso y de componentes de bajo costo que logra su objetivo principal y que permite al investigador hacer análisis de los resultados para evaluar las condiciones ambientales de un sector de alguna ciudad, en este caso, en los alrededores de la Universidad de Antioquia sede Medellín.
- La fabricación del prototipo del muestreador termoforético permitió la verificación del sistema y su gradiente de temperatura; además de la deposición de material particulado en la rejilla para microscopio TEM. Los ensayos del dispositivo consistieron en variar el gradiente de temperatura y las horas de funcionamiento necesaria para la recolección de material particulado, encontrando un gradiente óptimo de 70°C y 6 horas de funcionamiento. Por otro lado, se comprobó que no hubiera deformación del material con el que se diseñó la estructura del muestreador. Además, se mejoró la estructura para facilitar la manipulación de la rejilla recolectora de PM.
- En el caso de los sensores de temperatura, al hacer el acondicionamiento de sus señales se encuentran mediciones adecuadas que fueron verificadas con otros instrumentos como multímetros que permiten medir directamente la señal de un termopar. En una segunda prueba se usó un termopar adicional conectado al multímetro para comparar su medida con el termopar y el LM35 instalados en el sistema. Las diferencias de temperatura encontradas no fueron superiores a 1 grado centígrado.
- Para el caso del Controllino Mini, se encuentra que es un dispositivo de bajo costo que permite realizar implementaciones sencillas con elementos de mayor potencia evitando la fabricación adicional de tarjetas electrónicas. Aun así, se

observa que el dispositivo posee una limitante respecto a la capacidad de sus pulsos del PWM en los puertos de alta potencia que usan relé, ya que no es posible llegar hasta 0 voltios.

- Luego de realizar pruebas de recolección con el prototipo y verificar su funcionamiento, se le añadió la unidad de control de temperatura. El dispositivo de control logró mantener el gradiente de temperatura deseado con una desviación de temperatura menor a 2 grados centígrados, haciendo uso de un control ON/OFF, aumentando la temperatura a una menor velocidad haciendo uso de una señal pulsada para activar la resistencia y así evitar temperaturas muy elevadas que pudieran dañar el dispositivo.
- Las imágenes resultantes del análisis en el microscopio TEM fueron procesadas con el software desarrollado. Se logró limpiar la imagen y dejarla con fondo blanco para poder seleccionar las partículas de interés para calcular su diámetro primario.

Líneas futuras

- Mejorar el software para que el procesamiento de la imagen sea totalmente automático haciendo uso de algoritmos de inteligencia computacional como por ejemplo el K-Means para solucionar el problema de la umbralización [23] y redes convolucionales para la detección de partículas individuales.
- Con los resultados de diámetro primario de partícula, diámetros promedios y relación de escalas de píxeles a nanómetros, se podría enlazar con estudios morfológicos más detallados.
- Modificar algunas de las variables (flujo de aire, otros deltas de temperatura, temperaturas mínima y máxima) del sistema para determinar su influencia en el funcionamiento del dispositivo, haciéndolo además bajo diferentes condiciones ambientales (días lluviosos, despejados, etc) para también valorar su impacto en la recolección de PM.
- Lograr el uso de actuadores que consuman menos energía para hacerlo portátil, lo cual sería ideal para poder usarlo en lugares donde es complejo tener acceso a energía de la red eléctrica.

Referencias Bibliográficas

[1] CONDICIONES ESPECIALES DEL VALLE DE ABURRÁ. Factores que incrementan la contaminación en el valle. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad Pontificia Bolivariana. Página web. Publicado en: www.metropol.gov.co. Año de publicación: 2016. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>

[2] Ávila Cristian David, et al. An assessment on how different collection methods impact thermal properties, surface functional groups, nanostructure and morphology of diesel particulate matter, p. 83. En: Combustion and Flame: the journal of the combustion institute. Volumen 225 (marzo, 2021). P. 74-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.042>

[3] Leith David et al. Development of a Transfer Function for a Personal, Thermophoretic Nanoparticle Sampler. En: Aerosol Science and Technology. Volumen 48, entrega 1 (2014). P. 81-89. ISSN: 0278-6826. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2013.861593>

[4] Particulate Matter (PM) Basics. Página web. Publicado en la página web de United States Environmental Protection Agency (EPA). Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

[5] Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). Página web. Publicado en la página web de United States Environmental Protection Agency (EPA). Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

[6] Maynard Andrew. The Development of a New Thermophoretic Precipitator for Scanning Transmission Electron Microscope Analysis of Ultrafine Aerosol Particles. En: Aerosol Science and Technology. Volumen 23, entrega 4 (1995). P. 521-533. ISSN: 0278-6826. DOI: <https://doi.org/10.1080/02786829508965334>

[7] Salas Sirenia. Modelo Cinético para la Termoforesis. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Tesis de Maestría en Física. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Departamento de Física. (junio, 1998). P. 1. Disponible en: <http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=1647&docs=UAM1647.PDF>

[8] ¿Qué es el microscopio electrónico de transmisión? Página web. Publicado en página web de INECOL - Instituto de Ecología, México. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1044-que-es-el-microscopio-electronico-de-transmision>

[9] Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X. Página web. Publicado en la página web de Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI), Universidad de Málaga - España. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.scai.uma.es/areas/micr/tem/tem.html>

[10] Campa Fernández Víctor (2017). Análisis de Imágenes de Microscopía con ImageJ. Primera edición. Editor: Víctor Campa. Año de publicación: 2017. Páginas: 128. ISBN: 978-1542671309. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Victor-Campa/publication/313768335_Analisis_de_Imagenes_de_Microscopia_con_ImageJ/links/5b2ba17c45851505d4c25300/Analisis-de-Imagenes-de-Microscopia-con-ImageJ.pdf

[11] Bang John J. et al. Utilization of Selected Area Electron Diffraction Patterns for Characterization of Air Submicron Particulate Matter Collected by a Thermophoretic Precipitator. En: Journal of the Air & Waste Management Association. Volumen 53, entrega 2, (febrero, 2012). P. 227-236. ISSN: 1096-2247. DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466133>

[12] Datasheet Controllino Mini. Documento PDF. Publicado en la página web de Controllino. Año de publicación: 2016. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2017/03/MINI_DATASHEET-19-04-20161.pdf

[13] Instruction Manual Controllino Mini, Maxi and Mega. Documento PDF. Publicado en la página web de Controllino. Año de publicación: 2017 Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2017/03/CONTROLLINO-Instruction-Manual.pdf>

[14] AN1636 Application Note. Understanding and minimising adc conversion errors. Documento PDF. Publicado en la página web de ST Microelectronics. Editor: Microcontroller Division Applications. Año de publicación: 2003. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00004444-understanding-and-minimising-adc-conversion-errors-stmicroelectronics.pdf

[15] AN-360 Application Note. Thermocouple Signal Conditioning Using the AD594/AD595. Documento PDF. Publicado en la página web de Analog Devices. Editor: Joe Marcin. Año de publicación: 2016. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-369.pdf>

[16] Problem with AD595. Foro de preguntas y respuestas. Publicado en la página web de Analog Devices. Fecha de publicación: agosto de 2012. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://ez.analog.com/amplifiers/instrumentation-amplifiers/f/q-a/16643/problem-with-ad595>

[17] Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation AD594/AD595. Documento PDF. Publicado en la página web de All datasheet. Editor: Analog Devices. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48077/AD/AD595.html>

[18] LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Documento PDF. Publicado en la página web de All datasheet. Editor: TGS Tiger Electronic Co. LTD. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1188696/TGS/LM35.html>

[19] LCD Keypad shield Schematic. Documento PDF. Publicado en la página web de DF Robot. Fecha de publicación: 22 de julio de 2010. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://image.dfrobot.com/image/data/DFR0009/LCDKeypad%20Shield%20V1.0%20SCH.pdf>

[20] LCD Keypad Shield for Arduino. Página web. Publicado en la página web de DF Robot. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: https://wiki.dfrobot.com/LCD_KeyPad_Shield_For_Arduino_SKU__DFR0009

[21] Controllino Mini Pinout. Documento PDF. Publicado en la página web de Controllino. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: <https://www.controllino.com/wp-content/uploads/2017/05/CONTROLLINO-MINI-Pinout.pdf>

[22] Open Source Computer Vision. Página oficial de documentación de la librería. Fecha de la cita: 30 de mayo de 2022. Disponible en: https://docs.opencv.org/4.x/d1/d79/group__photo__denoise.html#ga4c6b0031f56ea3f98f768881279ffe93

[23] Dongju Liu; Jian Yu. Otsu method and K-means. En: 2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems. 22 de septiembre, 2009. ISBN: 978-0-7695-3745-0. DOI: <https://doi.org/10.1109/HIS.2009.74>