

Sistema electrónico para un prototipo de precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes

MsC. María C. Duque S

Esp. Carlos M. Clavijo P

MsC Oscar M Duque S

MsC. Jorge Leonardo Fuentes F

macduques@sena.edu.co

cmclavijo@sena.edu.co

omduque@unipamplona.edu.co

jlfuentes@sena.edu.co

Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS, Regional N.D.S, Tecnoparque Cúcuta, Tecnoacademia Cúcuta

Universidad de Pamplona, Grupo automatización y control, Cúcuta, Colombia

Resumen.

El objetivo de este proyecto es utilizar un sistema electrónico que genere campos eléctricos de alta tensión mediante placas de metales, los cuales atraparán las partículas contaminantes presentes en el aire. El dispositivo ha sido diseñado con componentes accesibles y utiliza un circuito que aumenta la tensión de la red local de 4 V a 2400 voltios utilizando un transformador conocido como flyback. Se trata de comprender cómo este tipo de dispositivo puede ser utilizado y adaptado para diferentes tipos de materiales, especialmente en relación con la temperatura que puede ser manejada por una tubería de expulsión de gases contaminantes.

Los resultados obtenidos hasta el momento han sido prometedores. El prototipo ha demostrado ser capaz de capturar partículas contaminantes de diferentes tamaños y formas, incluso a temperaturas elevadas. Sin embargo, aún se requieren más pruebas para determinar su eficiencia y durabilidad a largo plazo. El desarrollo de este prototipo representa un avance importante en el campo de la purificación del aire contaminado. Ofrece una solución efectiva y de bajo costo para la eliminación de partículas contaminantes, especialmente en entornos industriales.

Palabras Clave: Flyback, campo magnético, gases contaminantes, material particulado, precipitador electrostático.

Abstract

This article presents the development of a prototype of an electronic system for an electrostatic precipitator aimed at purifying emissions of contaminating gases. The primary objective of this project is to employ an

electronic system that generates high-voltage electric fields using metal plates, which will capture the contaminating particles present in the air. The device has been designed with accessible components and employs a circuit that increases the voltage from the local grid from 4 V to 2400 volts using a transformer known as a flyback. The main focus of the project revolves around understanding how this kind of device can be used and adapted for different materials, particularly concerning the temperature that can be managed by an exhaust pipe for contaminating gases.

The results obtained thus far have been promising. The prototype has shown the capability to capture contaminating particles of various sizes and shapes, even at elevated temperatures. Nevertheless, further testing is still required to determine its long-term efficiency and durability. The development of this prototype represents a significant advancement in the field of contaminated air purification. It offers an effective and cost-efficient solution for eliminating contaminating particles, especially in industrial settings.

Keywords: Flyback, magnetic field, polluting gases, particulate matter, electrostatic precipitator.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la gestión de emisiones de partículas contaminantes se ha convertido en una preocupación global de primera magnitud. La contaminación del aire, definida como la presencia de gases dañinos o partículas en la atmósfera en concentraciones perjudiciales para la salud humana, el bienestar de las personas, la flora, la fauna y la propiedad, demanda soluciones eficaces [1].



En este contexto, se desarrolla un modelo de sistema electrónico diseñado para un prototipo de precipitador electrostático destinado a purificar las emisiones de gases contaminantes. Utilizando la alta tensión de voltaje generada por placas metálicas en un campo eléctrico con el fin de atrapar las partículas contaminantes presentes en el aire, logrando, de este modo, la purificación del entorno [2].

Para alcanzar esta meta, se ha concebido un circuito que amplifica la tensión de la red local (4 V) hasta alcanzar los 2400 voltios necesarios, mediante el empleo de un transformador conocido como flyback. Asimismo, se ha hecho hincapié en el uso de componentes de fácil adquisición, lo que viabiliza que este prototipo pueda ser replicado y adaptado a diferentes materiales, especialmente en relación con la temperatura que puede soportar una tubería de expulsión de gases contaminantes [3].

La trascendencia de este proyecto radica en la necesidad imperante de hallar soluciones efectivas y de bajo costo para la purificación del aire contaminado. Se propone difundir los resultados y avances obtenidos en la construcción de este modelo de sistema electrónico para el prototipo de precipitador electrostático, ofreciendo así una contribución valiosa a la investigación y desarrollo en este ámbito.

A. Antecedentes

En 2017, se llevó a cabo el trabajo titulado "Diseño y prototipo de un precipitador electrostático". Este estudio resaltó las ventajas del prototipo en términos de los materiales utilizados en su construcción, los cuales son fácilmente accesibles y tienen un costo de mantenimiento casi nulo. Se optó por el modelo de placas planas debido a que su diseño era más sencillo de construir utilizando elementos fácilmente disponibles. Este prototipo fue concebido para la aplicación en la remoción de contaminantes como el humo y las cenizas producidas por la quema de carbón, papel, cigarrillos y madera.

En 2019, se llevó a cabo el trabajo titulado "Precipitador electrostático a escala piloto para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga". Este estudio permitió determinar las condiciones óptimas de diseño y las dimensiones adecuadas para un prototipo a escala de laboratorio. Se proyectó que este prototipo funcionara con un voltaje aproximado de 10.000 a 13.000 voltios, y se estableció la necesidad de conectar el cuerpo del precipitador a un polo a tierra para garantizar la seguridad de los usuarios y minimizar cualquier riesgo para la salud.

En 2020, se realizó el trabajo titulado "Filtro por precipitación electrostática para la remoción de material particulado en el escape de motores diésel". Esta investigación reveló que, para la implementación del filtro, es necesario utilizar el efecto corona, el cual es capaz de cargar eléctricamente partículas con tamaños inferiores a 40 micras, como el material particulado resultante de la combustión del diésel. Se determinó que la carga corona

debe ser negativa para dirigir las partículas hacia las cavidades del filtro, y se encontró que los electrodos presentan una mejor resistencia a esta carga. De esta manera, se logra cargar las partículas de material particulado con tamaños inferiores a 1 μm .

Estos antecedentes proporcionan una base sólida para la comprensión y el desarrollo de los precipitadores electrostáticos, así como para la aplicación de estos dispositivos en la remoción de material particulado en diferentes contextos y fuentes de contaminación.

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

A. Problema

El control de las emisiones de material particulado en las industrias ha adquirido una gran importancia en el siglo XX. Esto ha llevado a la implementación de sistemas eficientes de recolección de partículas con el objetivo de reducir dichas emisiones a niveles mínimos establecidos por organismos ambientales y de salud a nivel mundial. Este problema no solo afecta al personal que trabaja en estas industrias, sino también tiene repercusiones en el entorno circundante, la visibilidad, los espacios abiertos, la vida animal, la vegetación, los cultivos agrícolas, las máquinas, la infraestructura, los ambientes de trabajo y el medio ambiente en general.

En respuesta a las nuevas tendencias en salud, seguridad y control de procesos, así como a las regulaciones promulgadas anualmente para prevenir daños tanto a nivel personal como ambiental, las empresas se han comprometido a adoptar tecnologías innovadoras que permitan mejorar la eficiencia de sus equipos y reducir las emisiones. El objetivo es buscar soluciones que ofrezcan una adecuada relación inversión/beneficio para mitigar dichas emisiones.

En particular, en el caso de las industrias cementeras, se observa una alta demanda de control de emisiones de material particulado debido a que el proceso de producción del cemento involucra diversas etapas en las cuales se generan emisiones de material particulado, como el polvo. Estas emisiones son evidentes en áreas como la extracción, la trituración del material, el almacenamiento por derrames, el transporte entre máquinas y las operaciones de carga y descarga.

En este contexto, el objetivo de esta tesis es diseñar un prototipo a escala de un precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes. El propósito es lograr una reducción significativa de los niveles de material particulado de acuerdo con los estándares establecidos.

B. Justificación

Justificación Económica

La implementación de una máquina colectora de polución permite a las industrias aumentar su capacidad de



producción al recolectar y recircular el material particulado que se desprende durante los procesos. Esto resulta en una reducción de los costos de producción al evitar la pérdida de material y permitir su reutilización en la línea principal. Además, al reducir las emisiones de polución, se disminuyen los costos de mantenimiento en infraestructura y equipos, ya que la polución tiende a degradar las partes móviles mecánicas y eléctricas. Esto a su vez aumenta los períodos de mantenimiento programados, optimizando los recursos económicos de la empresa.

Justificación Social

La implementación de una máquina colectora de polución beneficia a múltiples aspectos sociales. En primer lugar, mejora la salud y el bienestar del personal de trabajo y de las comunidades cercanas, al reducir la exposición a la polución y sus efectos perjudiciales. Asimismo, al controlar las emisiones de material particulado de acuerdo con los estándares ambientales, las industrias pueden obtener reconocimientos y certificaciones que respalden su gestión ambiental responsable. Esto no solo mejora su reputación, sino que también contribuye al desarrollo sostenible y a la preservación del medio ambiente a nivel local e internacional.

Justificación Ingenieril

En la actualidad, se están desarrollando y avanzando tecnologías de ingeniería para disminuir y controlar la polución a nivel ambiental. En este sentido, la implementación de un precipitador electrostático representa un avance significativo, ya que se ha demostrado que es uno de los métodos más eficientes para controlar la contaminación en las industrias. Al optar por este tipo de tecnología, se fomenta la innovación y se incentiva la búsqueda de nuevos métodos de control de material particulado en el futuro. Esto impulsa el progreso científico y tecnológico en el campo de la ingeniería ambiental, generando soluciones más efectivas y sostenibles.

Justificación Ecológica

La implementación de una máquina colectora de polución tiene un impacto positivo en el medio ambiente, al reducir las emisiones de material particulado en las industrias. Esto conlleva a una disminución del impacto ambiental en las zonas cercanas, protegiendo tanto a la fauna y flora como a la salud de las personas. Al controlar y minimizar la polución a niveles mínimos, se contribuye a la preservación del entorno ecológico, promoviendo la conservación de los recursos naturales y la sostenibilidad a largo plazo.

II. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

A. Objetivo General

- Desarrollar un modelo de sistema electrónico para un prototipo de precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes.

B. Objetivos Específicos

- Definir los criterios de diseño, elementos de instrumentación, control, visualización, materiales y dimensiones para la generación del prototipo.
- Diseñar el sistema electrónico para un prototipo de precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes.
- Construir el sistema electrónico de validación para la purificación de emisiones de gases contaminantes.
- Demostrar el funcionamiento del sistema electrónico para un prototipo de precipitador electrostático para la purificación de emisiones de gases contaminantes.

C. Metodología

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo una metodología que abarcó los métodos utilizados para la construcción, diseño y estudio de la eficacia de un prototipo de precipitador electrostático, así como la creación de un modelo de sistema electrónico para la validación de emisiones de gases contaminantes. El enfoque metodológico se dividió en los siguientes pasos:

1. Definir los criterios de diseño, elementos de instrumentación, control, visualización, materiales y dimensiones necesarios para la creación del prototipo. Este paso implica una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada, así como el análisis de las normas y estándares aplicables para establecer los parámetros de diseño.
2. Realizar el diseño detallado del prototipo de precipitador electrostático destinado a la purificación de emisiones de gases contaminantes. En esta etapa, se considerarán los criterios definidos en el paso anterior y se utilizará software especializado para el modelado y simulación, asegurando así la precisión del diseño.
3. Construir el sistema electrónico de validación para la purificación de emisiones de gases contaminantes. Seleccionar los componentes electrónicos necesarios y llevar a cabo la construcción y ensamblaje del sistema electrónico, siguiendo rigurosamente las mejores prácticas de ingeniería y garantizando su correcto funcionamiento.
4. Evaluar el funcionamiento del sistema electrónico en consonancia con las variables de percepción, control y visualización. Esta etapa involucra la realización de pruebas y ensayos en el prototipo para evaluar su capacidad para captar variables relevantes, controlar el proceso de purificación y visualizar los resultados obtenidos. Se llevarán a cabo ajustes y mejoras necesarias para asegurar la eficacia y precisión del sistema.

La presente investigación siguió la metodología del Tecnoparque, la cual se basa en los niveles de madurez tecnológica TRL (Technology Readiness Levels). En este caso, el proyecto alcanzó el nivel TRL 6, ya que el éxito de la investigación radica en la posibilidad de implementarlo con tecnologías disponibles en el mercado. De lo contrario,



sería simplemente una propuesta teórica sin aplicabilidad práctica. Se tuvieron en cuenta los parámetros de diseño, funcionalidades, integración entre plataformas, disponibilidad en el mercado local y el valor presupuestal mínimo necesario para obtener la mayor cantidad de beneficios. Cabe destacar que se siguieron los principios éticos de la investigación científica, asegurando la integridad de los datos, el respeto a los derechos de propiedad intelectual y la confidencialidad de la información.

D. Selección de componentes de Hardware.

La selección de los componentes se realizó siguiendo un enfoque de prototipo de bajo costo, teniendo en cuenta el rango de funcionamiento, el costo, rangos de funcionamientos y la compatibilidad con Arduino. Se utilizó una matriz de selección para elegir los componentes, evaluando estos parámetros. Se seleccionaron los siguientes componentes:

- Flyback: es un transformador convertidor reductor-elevador con el inductor dividido para formar un transformador, de modo que las relaciones de voltaje se multiplican con una ventaja adicional de aislamiento, como se muestra en la Fig. 1.

Figura 1. Flyback odelo 154-375D RDX 020-130



Fuente Autores

- Placas conductoras de cobre: Baquelas de fibra de vidrio con cobre, como se visualizan en la Fig. 2.

Figura 2. Placas conductoras de cobre



Fuente Autores

- Arduino Mega ADK: es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560. Dispone de una interfaz de host USB para la conexión con teléfonos con sistemas

operativos Android, y utiliza el IC MAX3421e para lograr esta conexión. En la Fig. 3, se ilustra la tarjeta que, además, cuenta con 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 15 pueden utilizarse como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos seriales de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio.

•

Figura 3. Arduino Mega ADK.



Fuente Autores

- Sensor de Calidad de aire MQ-135: Usado en equipos controladores de calidad de aire en edificios/oficinas, ideal para detectar NH₃, NO, alcohol, benceno, humo, CO₂, etc. Rápida respuesta y alta sensibilidad. La tarjeta lleva integrado un LM393. Posee dos terminales de salida: Analógico y Digital (TTL), como se establece en la Fig. 4.

Figura 4. Sensor de Calidad de aire MQ-135.



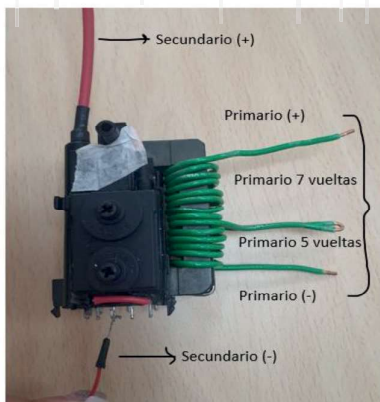
Fuente Autores

E. Diseño del sistema electrónico y estructural.

Es esencial realizar una caracterización exhaustiva del transformador Flyback, ya que se requiere generar un campo magnético mediante las placas de cobre. Por esta razón, es necesario contar con un alto voltaje en corriente continua (DC). Antes de diseñar el circuito electrónico para su alimentación, es imperativo identificar la función de cada cable y pin del Flyback. El cable de menor calibre que se desprende de la parte superior del Flyback corresponde a la salida de alto voltaje positivo. En la parte inferior, donde se encuentran 10 pines, se identifica la salida de alto voltaje negativo. Para determinar el pin correspondiente a la salida negativa, se realizaron 7 vueltas en el primario y 5 vueltas en el secundario alrededor del núcleo exterior del Flyback. El número de vueltas influye en la cantidad de voltaje de salida, como se muestra en la Fig. 5.



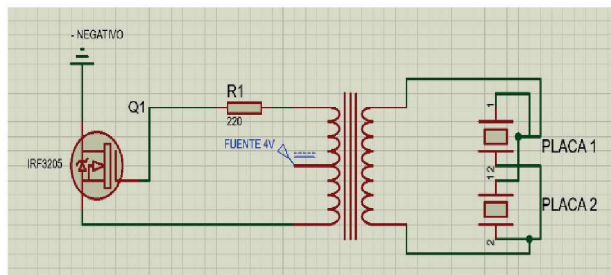
Figura 5. Caracterización de salidas y entradas del Flyback



Fuente Autores

Posteriormente, se procedió a caracterizar el comportamiento del transformador Flyback siguiendo el esquema representado en la Fig. 6. Utilizando el software de simulación con licencia Proteus Design Suite 8.10 ©, se diseñó el circuito electrónico para alimentar el Flyback. Esta caracterización inicial proporcionó las mediciones detalladas en la Tabla 1.

Figura 6. Circuito electrónico para la alimentación del Flyback.



Fuente Autores

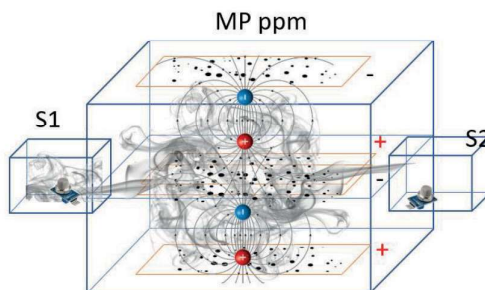
Tabla 1. Caracterización de mediciones del flyback

SET POINT (V)	MEDIDAS DIRECTAS (V)			INDIRECTA (V)
	V1 (V)	I1 (A)	V2 (V)	I2 (A)
4	4.00	1.07	2340	1.83E-03
4	4.00	1.01	2389	1.69E-03
4	3.70	0.80	2037	1.45E-03
4	3.50	0.60	1912	1.10E-03
4	3.00	0.40	1488	8.06E-04
4	2.70	0.20	1060	5.09E-04
4	2.70	0.10	675	4.00E-04

Fuente Autores

En la caracterización realizada, se logró obtener un voltaje máximo de salida de 2389 V utilizando una entrada de 4 V DC/DC. Para el diseño estructural del prototipo a nivel de laboratorio, se optó por utilizar material acrílico transparente, lo cual permitió observar el efecto magnético en la captura del material particulado, como se muestra en la Fig. 7. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, para escalar este prototipo a un entorno real, será necesario modificar el material utilizado, ya que deberá ser capaz de soportar altas temperaturas de hasta 130°C.

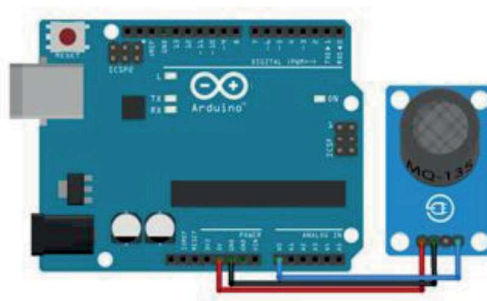
Figura 7. Diseño del diagrama estructural del precipitador electrostático.



Fuente Autores

Se colocaron dos sensores de calidad de aire MQ-135 que tiene como pines VCC (alimentación), GND (Tierra) y S (Señal) en el sistema precipitador electrostático, uno en la entrada y otro en la salida de este. Estos sensores fueron conectados a la tarjeta de desarrollo Arduino en los pines de 5V (alimentación), GND y A0(Entrada analógica de la señal del sensor), tal como se ilustra en la Fig. 8.

Figura 8. Conexión entre Arduino y el módulo de sensor MQ-135.



Fuente Autores

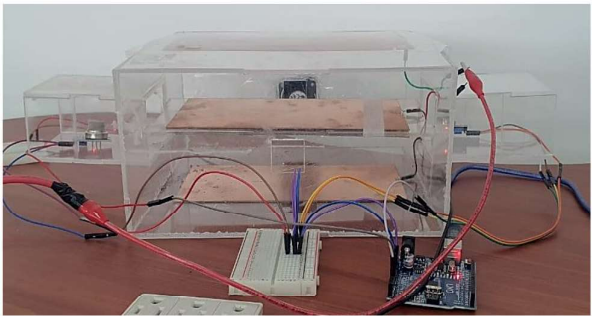
Es imperativo llevar a cabo una caracterización de los sensores de calidad de aire MQ-135. Para esto, se mantuvieron conectados durante 24 horas para un período de precalentamiento, ya que se requiere calentar internamente sus componentes para lograr una señal de medición estable y precisa. Durante un lapso de 30 minutos, se registraron lecturas de las mediciones de los

sensores, y se calculó el promedio de los valores obtenidos. Estas mediciones se efectuaron tanto en condiciones con presencia de humo como en condiciones sin humo, con el propósito de comparar y obtener niveles de PPM consistentes entre los sensores. Tras el análisis realizado, se determinaron factores de corrección de -2.7 PPM para el sensor 1 y -4.3 PPM para el sensor 2.

F. Construcción del precipitador electrostático

El precipitador electrostático se construyó utilizando acrílico transparente, lo que permitió observar claramente el efecto magnético en la captura de material particulado. Se dispusieron placas de cobre en cada compartimento del precipitador, mientras que el sistema de elevación de voltaje, o Flyback, se ubicó en el exterior. Adicionalmente, se incorporó un ventilador en el centro del sistema para lograr la recirculación del humo que ingresa en todo el precipitador, asegurando, de esta manera, una distribución uniforme y estable del humo y del material particulado en toda la estructura, como se ilustra en la Fig. 9.

Figura 9. Prototipo de precipitador electrostático.

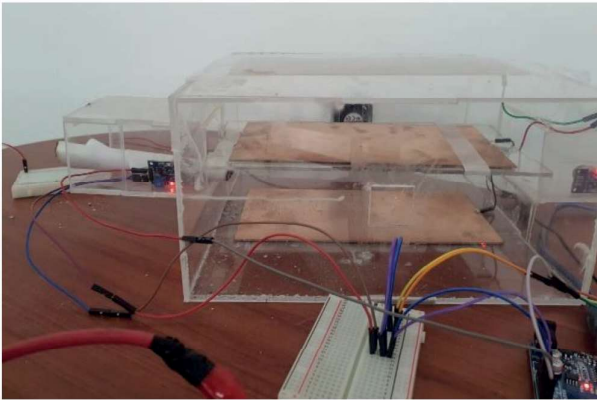


Fuente Autores

III. RESULTADOS

Para llevar a cabo la prueba de funcionamiento del sistema de precipitación electrostática en un entorno de laboratorio, se suministró energía al Flyback con una tensión de 4 V, y se replicaron las condiciones de un entorno real controlado, análogo a una chimenea que introduce un flujo de humo. Con este propósito, se sometió el sistema a una prueba en la que se utilizó un papel encendido para simular la entrada de humo y material particulado al sistema, como se puede apreciar en la Fig. 10 y Fig. 11.

Figura 11. Prueba de funcionamiento del precipitador electrostático con humo.



Fuente Autores

Se llevaron a cabo mediciones utilizando los sensores en dos etapas: en primer lugar, sin exposición a material particulado (PPM), y luego, con exposición al humo. El sensor 1 se colocó en la entrada del sistema, mientras que el sensor 2 se posicionó en la salida. A partir de estas mediciones, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 2, donde se muestran los valores obtenidos en ausencia de humo o PPM. Además, se ilustró gráficamente el comportamiento de las mediciones en la Fig. 12.

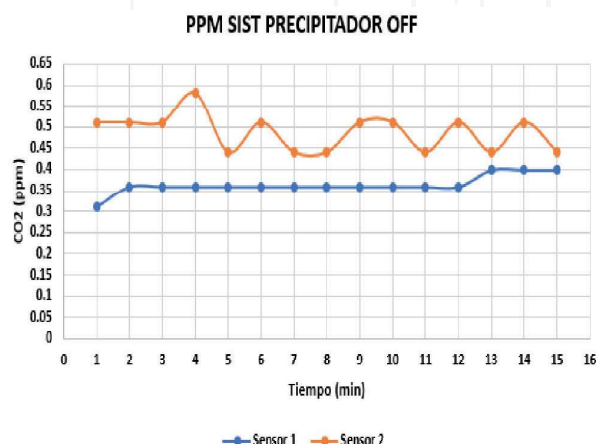
Tabla 2. Sistema Sin Exposición A La PPM

SIN EXPOSICIÓN AL PPM			
Tempo (min)	SENSOR 1	SENSOR 2	DIFERENCIA
1	0.31	0.51	-0.2
2	0.36	0.51	-0.15
3	0.36	0.51	-0.15
4	0.36	0.58	-0.22
5	0.36	0.44	-0.08
6	0.36	0.51	-0.15
7	0.36	0.44	-0.08
8	0.36	0.44	-0.08
9	0.36	0.51	-0.15
10	0.36	0.51	-0.15
11	0.36	0.44	-0.08
12	0.36	0.51	-0.15
13	0.4	0.44	-0.04
14	0.4	0.51	-0.11
15	0.4	0.44	-0.04

Fuente Autores



Figura 12. Prueba de funcionamiento del precipitador electrostático sin PPM.



Fuente Autores

Se efectuaron mediciones con los sensores bajo dos condiciones: en primer lugar, sin exposición al material particulado (PPM), y posteriormente, con exposición al humo. A partir de estas mediciones, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3, donde se muestran los valores obtenidos en ausencia de humo o PPM. Además, se ilustró gráficamente el comportamiento de las mediciones en la Fig. 13.

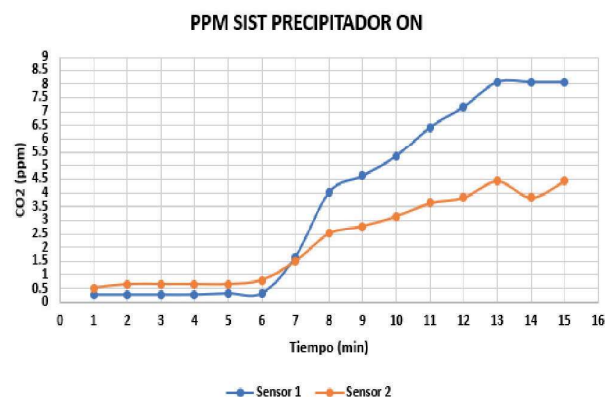
La diferencia en las mediciones entre el sensor 1 y el sensor 2, tanto antes como después de la exposición al material particulado, se debe a las características inherentes de cada sensor y al proceso de calibración realizado. Cada sensor tiene su propia caracterización de medición, y esta diferencia se mantiene constante y se corrige de acuerdo con su factor de corrección hallado durante la calibración. Antes de la exposición al material particulado, esta diferencia en la medición se refleja en que el sensor 1 muestra lecturas más bajas que el sensor 2, lo que corresponde a su estado natural del sistema sin exposición al CO₂. Después de someter el sistema al humo y al material particulado, ambos sensores continúan operando con sus respectivos factores de corrección.

Tabla 3. Sistema Con Exposición Al PPM

EXPUESTO AL PPM			
Tiempo (min)	SENSOR 1	SENSOR 2	DIFERENCIA
1	0.26	0.51	-0.25
2	0.26	0.65	-0.39
3	0.26	0.65	-0.39
4	0.26	0.65	-0.39
5	0.31	0.65	-0.34
6	0.31	0.8	-0.49
7	1.65	1.49	0.16
8	4.02	2.51	1.51
9	4.62	2.78	1.84
10	5.35	3.15	2.2
11	6.43	3.63	2.8
12	7.17	3.83	3.34
13	8.07	4.44	3.63
14	8.07	3.83	4.24
15	8.07	4.44	3.63

Fuente Autores

Figura 13. Prueba de funcionamiento del precipitador electrostático con PPM



Fuente Autores

La diferencia en las mediciones entre el sensor 1 y el sensor 2, en ausencia de material particulado, se debe a la ubicación estratégica de ambos sensores en el sistema. El sensor 1 se encuentra en la entrada del sistema, donde recibe una exposición directa al material particulado que ingresa. En contraste, el sensor 2 se ubica en la salida del sistema, lo que le permite monitorear el PPM que sale del precipitador. Esta diferencia en ubicación y exposición resulta en una lectura menor de PPM en el sensor 2.

La razón subyacente detrás de esta disparidad radica en el campo eléctrico generado entre las placas de cobre del precipitador electrostático. Este campo eléctrico es eficaz para capturar las partículas contaminantes, lo que se traduce

en una disminución significativa del PPM que sale del sistema. Por lo tanto, la lectura más baja en el sensor 2 en condiciones de ausencia de material particulado demuestra la efectividad del sistema en la reducción del PPM que ingresa al precipitador.

En resumen, la diferencia en las mediciones entre el sensor 1 y el sensor 2 se debe a las características individuales de cada sensor y su ubicación estratégica en el sistema. Esta diferencia se mantiene y se tiene en cuenta en ambos sensores, y se establece como el estado natural del sistema sin exposición al CO₂. Posteriormente, durante las mediciones con exposición al humo, cada sensor continúa operando de acorde con su factor de corrección, lo que da lugar a la diferencia en las mediciones de acuerdo con su ubicación y el efecto del sistema precipitador.

IV. CONCLUSIONES

Las mediciones realizadas con los sensores demostraron ser estables y consistentes tanto en la etapa sin exposición al material particulado (PPM) como en la etapa con exposición al humo. La diferencia de medición entre los sensores 1 y 2 (Figuras 11 y 12) en ausencia de PPM fue mínima, aproximadamente 0.12 ppm, lo que indica una excelente precisión y confiabilidad de los sensores. Al someter el sistema de precipitación electrostático y el sistema de instrumentación al material particulado, se observó una diferencia significativa de aproximadamente 4 ppm entre el sensor 1, ubicado en la entrada del sistema, y el sensor 2, situado en la salida. Esto demuestra que el sistema de precipitación electrostático es capaz de capturar eficazmente el material particulado presente en el humo de entrada, permitiendo que el humo expulsado tenga una concentración significativamente reducida de material particulado en comparación con el humo entrante. Este efecto es altamente beneficioso tanto para el medio ambiente como para la salud pública.

El sistema de precipitación electrostático ha demostrado un funcionamiento satisfactorio en condiciones controladas de laboratorio, alcanzando un nivel de madurez tecnológica TRL6. Sin embargo, se sugiere reforzar la estructura del sistema utilizando materiales capaces de soportar temperaturas superiores a 150 °C. Esta recomendación se basa en la consideración de las temperaturas a las que estará expuesto el sistema en su aplicación real. La adaptación de los materiales permitirá obtener un sistema más adecuado y robusto, capaz de enfrentar las condiciones térmicas requeridas en su entorno de funcionamiento. Esta mejora contribuirá a garantizar un rendimiento óptimo y la durabilidad del sistema en su implementación práctica.

En resumen, el sistema de precipitación electrostático desarrollado en este proyecto demuestra un impacto positivo en la reducción del material particulado en el humo de emisiones contaminantes. Estos resultados respaldan la viabilidad y eficacia del sistema, y sugieren su implementación en entornos reales con las mejoras

recomendadas para garantizar un rendimiento óptimo. La combinación de la captura efectiva de material particulado y la estabilidad de las mediciones de los sensores lo convierte en una solución prometedora para abordar problemas de contaminación del aire y mejorar la calidad del ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fernández, B. &. (2008). Diagnóstico de la Industria del Cemento en Colombia y Evaluación de Alternativas Tecnológicas para el cumplimiento de la Norma de Emisión de Fuentes Fijas. Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle.
- [2] Sagástegui, A. (2012). Propuesta para reducir las Emisiones de polvo fugitivo en el Proceso Productivo de una Empresa Cementera. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- [3] Saravia, H. (2018). Estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de precipitadores electrostáticos en planta de generación de Arizona. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
- [4] Grupo Velasco. (2022). FLYBACK 154-375C - FLY-154-375C, Recuperado de: <http://www.velasco.com.ec/velasco/producto.php?id=1518>.
- [5] Electrónica Gabriel S.A.S. (2022). Baquelita virgen. Recuperado de: <https://electronicagabriel.com/producto/baquelita-virgen-cortada/>
- [6] Arduino CC. (2022). Arduino Mega ADK Rev3. Recuperado de: <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-mega-adk-rev3>
- [7] Sigma electrónica. (2022). MQ-135. Recuperado de: <https://www.sigmaelectronica.net/producto/mq-135/>
- [8] Ambiental, A. d. (2012). Manual de costos de control de contaminación del aire de la EPA. Estados Unidos.
- [9] Carrillo, H. (2011). Diseño y cálculo de un sistema de extracción localizada de humos y gases provenientes del proceso de soldadura. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [10] De Meira, C. (2016). Desempeño de un precipitador electrostático operando en la remoción de nanopartículas de aerosoles. Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle.
- [11] Gómez, E. (2016). Conversión de un precipitador electrostático a filtro de mangas pulse-jet en la planta de molienda de carbon en la cementera Unacem-Atocongo. Lima, Perú: Universidad Tecnológica de Perú.
- [12] Jiménez, F. (2015). Selección de un sistema de despolvo en área de trituración en la industria cementera. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [13] Mamani Revilla, J. A. (2019). Diseño e implementación de un prototipo a escala de un precipitador electrostático para el control de polución en una industria cementera. Arequipa, Perú: Universidad Católica de Santa María.
- [14] Orrala, A. (2010). Diseño de un sistema de extracción de material particulado de una planta de arena. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- [15] Young, F., & Sears, Z. (2009). Física universitaria (Vol. 2). México: Pearson Education.
- [16] He, Z., & Dass, E. T. M. (2018). Correlation of design parameters with performance for electrostatic Precipitator. Part I. 3D model development and validation. *Applied Mathematical Modelling*, 57, 633–655. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.05.042>
- [17] Lee, G. H., Hwang, S. Y., Cheon, T. W., Kim, H. J., Han, B., & Yook, S. J. (2021). Optimization of pipe-and-spike discharge electrode shape for improving electrostatic precipitator collection efficiency. *Powder Technology*, 379, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.044>
- [18] Zhang, S., Pan, W., Zhang, H., Long, Z., & Yu, T. (2020). High-efficient removal of airborne oil mist in a wire-plate electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 108(October), 103516. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103516>
- [19] Zhang, X., & Bo, T. (2021). The effectiveness of electrostatic haze removal scheme and the optimization of electrostatic precipitator based on the charged properties of airborne haze particles: Experiment and simulation. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125096. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125096>

