UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIEROS ELECTRÓNICOS

TEMA:
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA IONIZACIÓN DE PARTÍCULAS DE CO_2 EMITIDAS POR AUTOMOTORES A DIÉSEL, PARA SU EMPLEO EN EL DESARROLLO DE FILTROS ELECTROESTÁTICOS.

AUTORES:
VÍCTOR ALFONSO CHILIQUINGA TORO
JUAN GABRIEL RAMÓN CHÁVEZ

TUTOR:
WILLIAM MANUEL MONTALVO LÓPEZ

Quito, julio del 2016

Cesión de derechos de autor

Nosotros Víctor Alfonso Chiliquinga Toro y Juan Gabriel Ramón Chávez, con documento de identificación N° 1719584102 y 0503805525 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA IONIZACIÓN DE PARTÍCULAS DE CO_2 EMITIDAS POR AUTOMOTORES A DIÉSEL, PARA SU EMPLEO EN EL DESARROLLO DE FILTROS ELECTROESTÁTICOS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

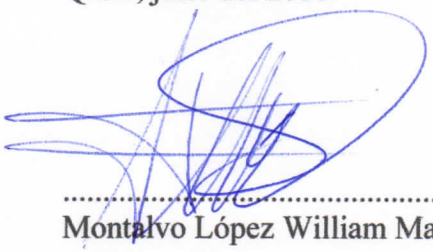
Quito, julio del 2016

.....	.....
Víctor Alfonso Chiliquinga Toro	Juan Gabriel Ramón Chávez
1719584102	0503805525

Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA IONIZACIÓN DE PARTÍCULAS DE CO_2 EMITIDAS POR AUTOMOTORES A DIÉSEL, PARA SU EMPLEO EN EL DESARROLLO DE FILTROS ELECTROESTÁTICOS realizado por Víctor Alfonso Chiliquinga Toro y Juan Gabriel Ramón Chávez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2016



.....

Montalvo López William Manuel

1712789989

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA IONIZACIÓN DE PARTÍCULAS DE CO_2 EMITIDAS POR AUTOMOTORES A DIÉSEL, PARA SU EMPLEO EN EL DESARROLLO DE FILTROS ELECTROSTÁTICOS.

Víctor Chiliquinga[1], Juan Ramón[1], William Montalvo[2]

Resumen

Este artículo presenta la investigación realizada acerca de los métodos de ionización de partículas de CO_2 y la técnica para su recolección y separación, con lo cual se planteó el diseño de un prototipo mediante un software de diseño especializado (AutoCAD), el cual cuenta con características físicas y electromagnéticas presentadas en gráficas y tablas, además estas características son calculadas y presentadas basándose en estudios similares que contienen demostraciones experimentales.

Palabras Clave: contaminación, filtro electrostático, ionizar, partículas, disociar.

Abstract

This paper presents the research on methods of ionization particles of CO_2 and technique for collection and separation, whereby the design of a prototype was raised by a specialized design software (AutoCAD), which has features physical and electromagnetic presented in graphs and tables, plus these features are calculated and presented based on similar studies even contain experimental demonstrations.

Keywords: contamination, electrostatic filter, ionize, particles, dissociate.

[1]Egresado de Pre-grado en Ingeniería Electrónica (Mención Sistemas Industriales)-Universidad Politécnica Salesiana.

[2]Magister en Automatización y Control Electrónico Industria, Ingeniero Electrónico en Control y Automatización, Docente-UPS, Autor para correspondencia: wmontalvo@ups.edu.ec.

1. Introducción

En los últimos años se ha observado una gran cantidad de medidas para combatir los altos niveles de contaminación medioambiental, como normas de emisiones y eficiencia para automotores. Además, existen precipitadores electrostáticos que es una tecnología que captura aproximadamente el 99,99% de partículas de gases contaminantes, esto se logra mediante la ionización y recolección de las mismas. En el ámbito automotor uno de los métodos más propagados es el de un filtro que utiliza reacciones químicas para atraer y recolectar partículas de CO_2, pero tiene como inconveniente una corta vida útil.

Si bien existen técnicas para capturar partículas contaminantes mediante electrostática, pero no hay ningún método que específicamente se encargue de capturar las partículas de los automotores a diésel. El empleo de precipitadores electrostáticos es el método más común en cuanto a la captura de partículas se refiere y generalmente las industrias son las principales entidades que los utilizan. Pero obviamente las partículas contaminantes que producen las industrias tienen propiedades diferentes en comparación con las de los automotores, por esa razón se busca encontrar una manera eficiente de ionizar y capturar las partículas de los automotores a diésel, siendo estos los que contaminan en promedio un 20% más que los automotores a gasolina. Entonces se puede decir que no hay ninguna técnica ni un mecanismo que capture partículas de CO_2 específicamente de automotores a diésel.

Por esa razón este artículo va enfocado en encontrar el mejor método que permita ionizar las partículas de CO_2 de los automotores a diésel para poder capturarlas. Además, se busca definir las características electromagnéticas que debería tener el prototipo de un filtro electrostático que ionice y capture las partículas de CO_2 de los automotores, en caso de que futuras investigaciones se busque construir el filtro.

2. Metodología

Para cumplir con el presente estudio de factibilidad se comienza presentando los métodos existentes para ionizar partículas, para posteriormente plasmar la técnica de ionización, separación y recolección de partículas escogida e investigada y finalmente se presenta un prototipo propuesto, con todas sus características físicas, electromagnéticas y demostración adecuada.

3. Desarrollo

3.1 Métodos de ionización de las partículas

Existe una gran variedad de métodos de ionización de partículas, dependiendo del campo de aplicación. “Por ejemplo en la espectrometría de masas se utilizan métodos como: impacto electrónico, ionización química, de campo, por electro-spray, entre otros” [1]. Mientras que en el campo industrial, en donde se busca eliminar partículas de polvo se emplean métodos como: por difusión, por efecto campo, por combinación difusión-campo, espacial y por efecto corona. A continuación se explica brevemente cada uno de ellos.

1) Difusión.- La ionización por difusión se da cuando la transferencia de carga proporcionada por los iones hacia las partículas es por efecto del choque entre estos y un movimiento térmico aleatorio. La carga de la partícula por este método es independiente del campo y se intensifica con el tiempo. [2]

2) Efecto campo.- A diferencia de la generación de iones por difusión, en

donde la causa de la transferencia de carga entre partículas se debe a un movimiento térmico aleatorio. En el efecto campo, las partículas transfieren una carga debido al tránsito de estas por las líneas del campo eléctrico, esto provoca que la carga de la partícula dependa directamente de la intensidad del campo.

3) Combinación difusión y efecto campo.- La ionización por efecto campo depende de la intensidad del campo eléctrico, pero existen partículas que no son estimuladas por dicho campo y necesitan ser ionizadas necesariamente por difusión, razón por la cual cuando se trata de un gas o polvo que contenga partículas con una gran variedad de radios o tamaños se debe emplear una combinación de métodos, tanto de difusión como de efecto campo.

4) Espacial.- La carga espacial se refiere a las partículas de un gas o polvo que se encuentran dispersas en el espacio y también se encuentran cargadas eléctricamente, todo esto dentro de un elemento de precipitación electrostática.

En sí, la carga espacial es el conjunto de partículas que van adquiriendo un potencial dentro de un determinado espacio.

5) Efecto Corona.- Fundamentalmente actúa por efecto del oxígeno, ya que contribuye con iones y electrones libres que se aceleran hacia las moléculas del gas tratado, ionizando las mismas y logrando que el colector capture y reúna las moléculas y partículas del gas tratado (ver figura 1).

Se debe tener en cuenta que el CO_2 al no tener afinidad electrónica se especularía que no es posible la separación, pero tiene una propiedad especial, se disocia fácilmente, y además facilita la corriente de descarga o efecto corona, siendo este efecto el encargado de cargar o ionizar las partículas.

Para la elección del mejor método de ionización, se debe tomar en cuenta principalmente el tamaño de la partícula a ionizar. Para este caso se toma como referencia un tamaño de 0.5 µm que es el tamaño aproximado de una partícula de CO_2 tal como se menciona en la sección de características electromagnéticas. La tabla 1 expresa las características encontradas de 3 métodos de ionización frente a las necesidades del estudio.

Tabla 1. Métodos de ionización de partículas dependiendo el diámetro de las mismas. [3]

Método	Tamaño de partículas ionizadas. [µm]	Tamaño de partícula de CO_2. [µm]
1. Difusión	< 0.2	0.5
2. Campo	> 1	0.5
3. Corona	0.2 – 1	0.5

Sin duda que el diámetro de las partículas de CO_2 será variable por lo tanto y *estrictamente para este caso, el mejor método de ionización es el de efecto corona*, debido a que trabaja con un rango de tamaños de partículas de 0.2 a 1 µm (ver tabla 1), por lo que su capacidad de ionización engloba sin problema a las partículas de CO_2.

3.2 Técnica de atracción y separación de partículas

La técnica o tecnología de precipitadores electrostáticos (PES) investigada y propuesta para la ionización, atracción, separación y recolección de partículas, fue escogida gracias al método de ionización presentado (Efecto corona) y las pocas técnicas encontradas que utilizan este método, como la pintura electrostática y los mencionados PES, el inconveniente de la primera técnica es que únicamente trabajan con pintura granulada o en polvo, y no se presentaban investigaciones acerca de

ionización de otros materiales como el CO_2, al contrario de los PES que existe mucha información y en concreto el trabajo de la disminución de emanaciones provocadas por la combustión de diésel [4] que aporto datos importantes al estudio.

Por lo tanto se presenta la información concerniente y relevante a la técnica propuesta e investigada, siendo la más apta para utilizarse en el desarrollo de filtros electrostáticos.

3.2.1 Precipitadores electrostáticos (PES)

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos de uso industrial para la separación y recolección de ciertas partículas sólidas o liquidas mediante un proceso electrostático, logrando ionizar partículas macro y microscópicas, ayudando así a mitigar la expulsión de ciertos gases o polvos nocivos para la salud de los seres vivos.

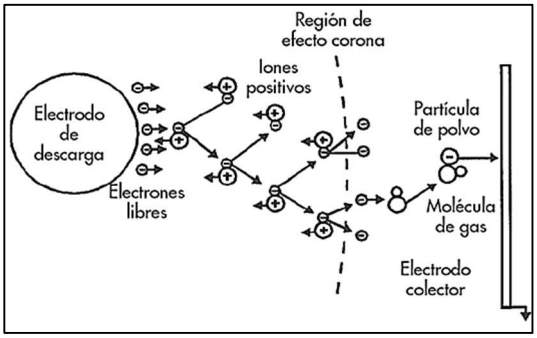


Figura 1. Efecto corona **[3]**.

Como ya se mencionó y presento información, el efecto corona realiza la atracción y separación de partículas del gas tratado, logrando así mitigar casi en su totalidad las emanaciones nocivas.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de PES. [5]& [6]

Ventajas	Desventajas
Alta Eficiencia de recolección	Alto costo inicial para tamaños grandes
Costos operativos y de mantenimiento bajos	Mas necesidad de espacio
Maneja grandes volúmenes de gas a altas temperaturas (<700°C)	Posibles riesgos de explosión.
Tiempo de tratamiento insignificante	Posible mezcla de gases.
Fácil limpieza	Se necesita tener conocimiento con alto voltaje
Operan a presiones altas (<1,030 kPa) o en vacío.	Mantenimiento alto en caso de electrodos de alambre.

4. Resultados y Discusión

Una vez definido que el efecto corona es el mejor método de ionización para el caso de partículas de CO_2 de automotores a diésel complementado con la técnica de precipitadores electrostáticos (PES), se presenta la siguiente curva de rendimiento realizada en Excel versión 2010 y tomada de "Tratamiento y Acondicionamiento de gases" [3].

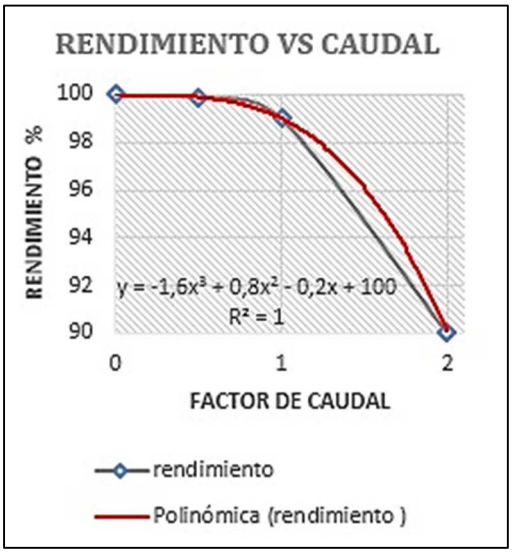


Figura 2. Grafica de eficacia basada en el caudal del gas. [3]

Mediante esta herramienta se logró encontrar la ecuación polinómica y así, con un caudal conocido ($Q = 0{,}243\ m^3/s$) [7], se encontró que la eficacia o rendimiento teórico de nuestro prototipo llega a ser de:

$$\eta_{\%} = 99{,}97$$

4.1 Factibilidad

Para encontrar la factibilidad del filtro electrostático propuesto se analiza el aspecto te técnico y de mercado.

Aspecto técnico: El filtro electrostático propuesto tiene un volumen aproximado de entrada de 5972.9 cm^3, este volumen contiene varios gases de los cuales el 15% es de CO_2. Entonces conociendo el total de entrada de partículas de CO_2 (895.9 cm^3) y una eficacia teórica de 99.97% para el filtro electrostático, se proyecta una reducción de 895.6 cm^3 de CO_2.

Aspecto de mercado: Hasta la fecha existen dos métodos similares a la propuesta de filtro electrostático que no son completamente difundidos en el mercado automotriz, por lo tanto, se presenta una opción alternativa que podría ocupar mayor mercado.

- *Filtro químico:* está diseñado para colocarlo en el escape de los automóviles (livianos a gasolina) y captura partículas de CO_2 mediante reacciones químicas. Su desventaja es la vida útil que es aproximadamente 2 meses.

- *Filtro con recubrimiento catalítico*: está diseñado para colocarlo cerca del motor en el sistema de escape actuando como filtro y catalizador al mismo tiempo. La captura de partículas se hace mediante paredes filtrantes de distintos tipos de conductores. Su mayor desventaja es que influye directamente en la presión de gases del motor por lo que se hace necesario un sistema de monitoreo constante a través de sensores de presión y temperatura.

Tomando en cuenta el análisis realizado se plantea el siguiente sistema en el que se explica cómo los elementos trabajarían entre sí, para luego proponer el diseño de un filtro electrostático.

4.2 Sistema propuesto

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se presenta un diagrama de bloques con cada uno de los componentes que tendrá el sistema a ser instalado y su respectiva conexión en la siguiente figura.

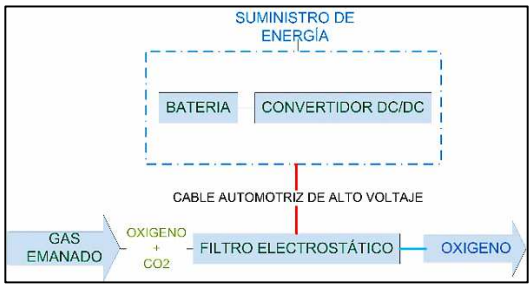


Figura 3. Diagrama de bloques.

El filtro deberá trabajar con voltajes del orden de los kilovoltios para eso se presenta la posibilidad de generar dicho voltaje, gracias a un convertidor DC/DC tipo flyback, que cumple la función de elevador, y simplemente incrementará los 12 V que el automotor maneja a valores en el orden deseado, esto dependiendo el diseño del mismo.

4.3 Propuesta de Filtro Electrostático

Mediante el software Autodesk AutoCAD versión 20.0 se plantea una propuesta de filtro para ser acoplado al escape del automotor (autobús), se toma como base un precipitador tubular de una sola cámara como se puede apreciar en la demostración del MIT [8]. En las siguientes figuras se muestra el mismo,

y se detalla sus posibles partes en caso de una futura fabricación.

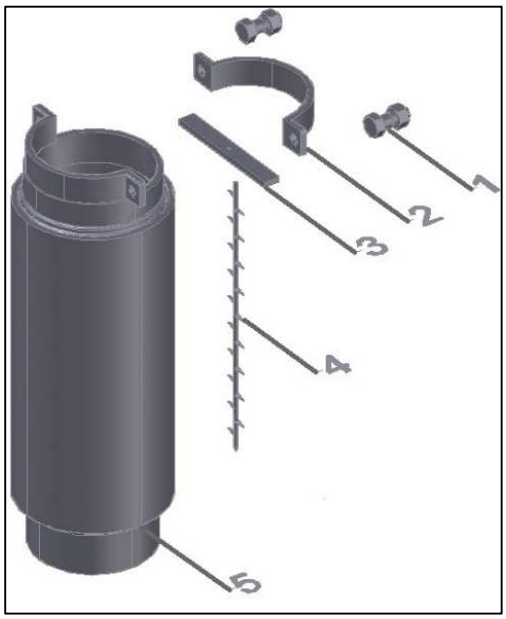


Figura 4. Prototipo propuesto y sus partes.

Mediante el corte transversal se aprecia a detalle cual es la disposición de las partes dentro del mismo.

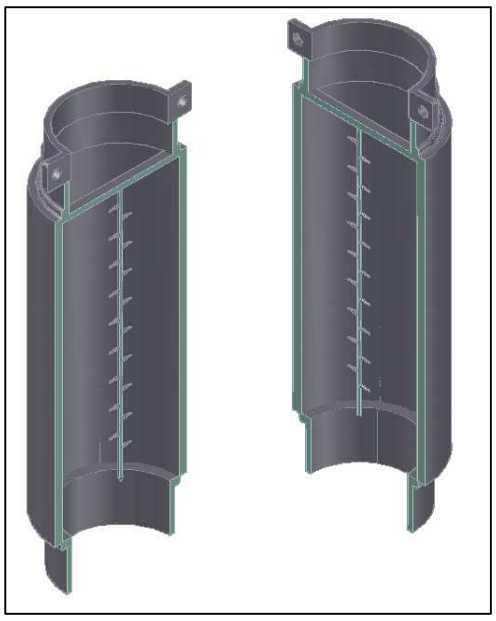


Figura 5. Corte transversal del prototipo.

En la tabla 3 se detalla las características que deberían tener cada una de las partes (ver figura 4) del filtro.

Tabla 3. Partes del prototipo físico, su función y posible material constructivo.

Parte	Características
(1) Tornillos y tuercas de sujeción	Los tornillos y tuercas sirven para el ajuste de la brida de sujeción. Dado las dimensiones del filtro se recomiendan utilizar un tornillo de 10mm.
(2) Brida de sujeción	La brida de sujeción cumple con 2 propósitos: - Aislar el filtro del tubo de escape - Proporcionar agarre del filtro al tubo de escape. Para la sujeción se diseñó a la brida con 2 acoples en donde se pueda colocar tuercas de acero.
(3) Pieza de agarre	La pieza de agarre se encuentra colocada a través del cilindro y será la que soporte al electrodo de descarga.
(4) Electrodo de descarga	El electrodo es la pieza que se encarga de realizar la descarga en corona e ionizar las partículas. El electrodo necesita estar alimentado con el negativo del convertidor dc-dc.
(5) Cilindro colector	El cilindro cumplirá el papel de colector de las partículas ionizadas por consiguiente necesita ser conexionado al positivo del convertidor dc-dc.

Se presentan posibles materiales a ser utilizados para una futura implementación, en caso de ser implementado se recomienda verificar precios, tanto de fabricación de piezas, como de materiales a ser utilizados para la correcta elección.

La temperatura con la que salen los gases por el escape de un automotor a diésel es de alrededor de 100 ºC, por lo que los materiales para el electrodo de descarga y para el cilindro colector deben presentar propiedades refractarias y anticorrosivas. Para las partes mencionadas y partes faltantes, se sugiere los siguientes materiales:

Tornillos y tuercas de sujeción: Cualquier tipo de acero.

Brida de sujeción: Se recomienda construir la brida en fibra de vidrio por su bajo costo y por las propiedades aislantes que presenta.

Pieza de agarre: Al igual que la brida de sujeción es necesario construirla de un material aislante por ello se recomienda utilizar cerámica por sus propiedades térmicas y aislantes.

Electrodo de descarga o emisor: El material a utilizar debe tener principalmente alta resistencia a descargas eléctricas y a la corrosión como superaleaciones de acero inoxidable.

Cilindro o electrodo colector: Se lo puede construir con acero galvanizado para que resista a la corrosión y al calor que se produce en el escape del automotor.

4.4 Dimensionamiento físico

El área de recolección depende del caudal [7] y velocidad de salida del gas [4] que emana un automotor a diésel, ya conocidos estos valores, se calculó la misma con la siguiente ecuación.

$$A = \frac{Q}{v} \qquad (1)$$

$$A = 0{,}18692\ m^2$$

Esta área calculada junto con el diámetro investigado del escape de un autobús son puntos importantes para un buen dimensionamiento que se apreciara en las siguientes figuras.

Se escogió un escape de autobús para realizar un diseño específico, y que estos automotores son más utilizados dentro de la circulación diaria, pero en caso de ser necesario la implementación en otro tipo de automotores la única pieza a ser cambiada y redimensionada es la brida de sujeción.

A continuación se presenta un posible prototipo con sus respectivas dimensiones para un autobús.

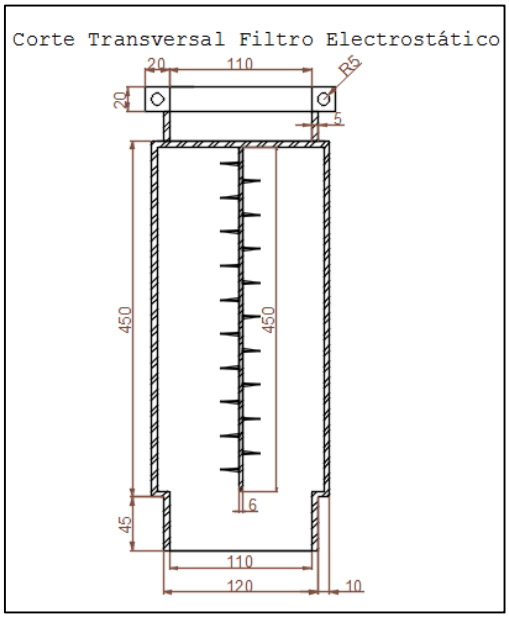


Figura 6. Corte transversal del prototipo con sus respectivas dimensiones en milímetros.

El prototipo presentado se basa principalmente en una dimensión de tubo de escape que se encuentra validado en el estudio de "Influencia de la disposición del conducto de escape en el índice de contaminación de buses de transporte masivo" [7], una longitud del filtro y electrodo tomada de "Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator" [4] y un área calculada para dar como resultado la figura 6.

4.5 Características Electromagnéticas

En cuanto a las especificaciones eléctricas y magnéticas se logró acercar a un diseño presentado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) [8], el cual cumple con el objetivo

principal del estudio mediante demostraciones experimentales.

Por lo tanto, los valores que a continuación se presentan son producto de dicha experimentación, con los cuales se logra un adecuado diseño para el estudio actual.

Para determinar las características de funcionamiento del filtro electrostático se partió de la ecuación 2 que expresa la fuerza de Lorentz, y es la fuerza que actúa sobre partículas cargadas en movimiento bajo la influencia de un campo magnético.

$$f = q(E + v\ x\ \mu_o H) \qquad (2)$$

Donde: q Carga de la partícula.
E Campo eléctrico.
v Velocidad de las partículas.
$\mu_o H$ Campo magnético.

Para el caso de partículas de polvo o humo en el aire, la velocidad es muy baja por lo que la contribución que hace el campo magnético $(u_o H)$ es despreciable. En el aire la inercia de partículas es casi despreciable por lo que la ecuación 2 se la balancea con una fuerza de fricción o arrastre (drag force) descrita por la ley de Stokes, que detalla la fuerza a la que se expone una partícula dentro de un fluido.

Al realizar el balance mencionado lo que resulta es la ecuación 3.

$$6\pi\eta R v = qE \qquad (3)$$

Donde: η Viscosidad del fluido (aire).
R Radio de la partícula.

En la expresión anterior se puede apreciar que la velocidad de la partícula es proporcional al campo eléctrico aplicado. El mismo principio es aplicado en la ecuación 4.

$$v = \mu E \qquad (4)$$

El coeficiente que relaciona la velocidad de las partículas con la intensidad de campo eléctrico se la conoce como movilidad (μ) y esta descrita por la ecuación 5 que expresa el fenómeno de electroforesis. La electroforesis se refiere a la separación de moléculas que se encuentren bajo influencia de un campo eléctrico.

$$\mu = \frac{q}{6\pi\eta R} \qquad (5)$$

Otra expresión necesaria para describir el comportamiento de las partículas es la densidad de corriente que es el producto de la velocidad de las partículas (v), con la densidad de carga eléctrica (ρ) y viene descrita por la ecuación 6.

$$J = \mu\rho E \qquad (6)$$

Donde: $\mu\rho$ Conductividad efectiva.

Las expresiones presentadas de la velocidad de partículas y de la densidad de corriente serán útiles para describir a las partículas microscópicas e iones.

Los siguientes valores fueron tomados del MIT como se dijo anteriormente, con los cuales se presentara las posibles características electromagnéticas del filtro.

- $Voltaje = 12\ x\ 10^3\ [V]$
- $Corriente = 10\ x\ 10^{-6}\ [A]$
- $Diametro\ de\ la\ particula \rightarrow 10\ nm \leq D \leq 10000\ nm$, este rango se tomó de "Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator" [4], ya que es un estudio más acertado acerca de precipitadores electrostáticos que mitigan los efectos del diésel.

El cálculo de la corriente total se la realiza mediante la ecuación 7.

$$i = J\,A = \mu\rho EA \qquad (7)$$

De la ecuación anterior se puede despejar la conductividad efectiva y se obtiene la ecuación 8.

$$\mu\rho = \frac{i}{EA} \qquad (8)$$

Para obtener la conductividad efectiva es necesario obtener los valores del campo eléctrico y del área del filtro.

$$E = \frac{V}{L}$$

$$E = 1{,}846 \times 10^5 \frac{V}{m}$$

$A = 0{,}183783\ \mathrm{m}^2$ (Ver Punto 4.4)

Los datos de radio y altura del filtro se los obtiene de la figura de medidas del prototipo de filtro electrostático.

El valor del campo eléctrico se obtuvo de la división entre el voltaje aplicado y el radio del filtro debido a que se trata de un campo eléctrico uniforme. Con estos valores y con la ecuación 8 se puede calcular la conductividad efectiva que a continuación se presenta:

$$\mu\rho = 2.95\ \times 10^{-10}\ [S/m]$$

Mediante el valor del campo eléctrico calculado y la movilidad de iones que se asume para partículas de oxígeno, se obtiene la velocidad de los iones.

$$\mu \sim 1\ \times\ 10^{-4}\ \frac{m^2}{Vs}$$

$$v_{ion} = \mu E$$

$$v_{ion=}\ 18.46\ [m/s]$$

Con este valor se puede calcular el tiempo que le toma al ion recorrer la distancia equivalente al radio del filtro, desde el electrodo hacia la pared del cilindro, dicho valor se lo calcula mediante la ecuación 9.

$$ion\ transit\ time = \frac{Radio\ del\ filtro}{\mu E} \qquad (9)$$

$$ion\ transit\ time = 3.5\ [ms]$$

Éste es el tiempo en el cual el ion llega a la pared del electrodo recolector.

Ahora se procede con el cálculo de τ que es el parámetro que describe la velocidad a la que se carga la partícula y que además depende de la conductividad efectiva. El cálculo se lo realiza utilizando la ecuación 10.

$$\tau = \frac{4\epsilon_o}{\mu\rho} \qquad (10)$$

$$\tau = 0.12\ [s]$$

Donde: ϵ_o Permisividad del aire.

Luego se procede con la obtención de la carga crítica o de saturación de las partículas mediante la siguiente ecuación, se debe tener en cuenta que en este caso se cambia la ecuación por valores promedio de campo eléctrico, ya que son experimentales por tal motivo se obtiene la siguiente expresión, en la que involucra el radio de la partícula:

$$q_c = 12\pi\epsilon_o R^2 E_a$$

Para un valor de $R = 0.5\ \times\ 10^{-6}\ m$ [8], ya que se encuentra en el rango de diámetro presentado anteriormente:

$$q_c = 1.5\ \times\ 10^{-17}\ [C] \approx 95\ e$$

Donde:
- R Radio aproximado de la partícula.
- E_a Campo promedio (average).
- q_c Carga crítica de la partícula

Se obtiene la carga crítica para calcular la velocidad aproximada de migración de las partículas del gas tratado. Tanto, partículas de gran y pequeño diámetro pueden ser ionizadas.

Caculos para la movilidad y la velocidad de iones, de humo de CO_2:

$$\mu = \frac{q}{6\pi\eta R}$$

$$\mu = 8 \times 10^{-8}\ [m^2/Vs]$$

Para este caso, la viscosidad del fluido (η) se utiliza la del aire.

$$v = \mu E$$

$$v = 1.4\ [cm/s]$$

Como se mencionó anteriormente esta demostración es realizada por el MIT [8] en un video de aprendizaje libre en el cual se observa como un precipitador electrostático tubular demostrativo realiza la ionización de partículas de humo.

Teniendo en cuenta esta demostración y datos recolectados de "Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo JET PULSE y precipitador electrostático" [9] y "Estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de precipitadores electrostáticos, en la planta de generación Arizona" [5] se tiene los siguientes valores:

Tabla 4. Valores electromagnéticos y físicos aproximados para una futura implementación.

Especificación	Valor Aproximado
Voltaje	12 kV
Corriente	10 µA
Campo Eléctrico	1,846 x 10^{-5} V/m
Electrodo Emisor	Tipo Multipeak o similar 6 mm de diámetro 450 mm de longitud
Diámetro del colector tubular	110 mm 5 mm de espesor
Longitud del colector	450 mm
Carga de partículas	≥ 95e
Temperatura	<700°C
Presión	<1,030 kPa

5. Conclusiones

Los métodos de ionización de partículas analizados en este estudio guardan una relación directa con la intensidad de campo eléctrico, y adicionalmente se cuenta con un parámetro variable que es el tamaño de las partículas a ionizar, siendo este el factor principal para escoger el mejor método de ionización.

La mejor técnica de atracción e ionización de partículas es la de precipitadores electrostáticos (PES), pues trabaja con el método de efecto corona que reduce la emanación de varios gases industriales y además garantiza una captura mayor al 90% de dichos gases, debido a que su rango de ionización comprende tamaños de partículas desde 0.2µm hasta 1µm, rango en el cual se encuentran las partículas de CO_2.

La propuesta de filtro electrostático se plantea tomando en cuenta factores eléctricos como, voltaje de 12 kV y corriente máxima de 10 µA que generan un campo eléctrico de 1,846 x 10^{-5} V/m, logrando así plasmar las características electromagnéticas necesarias para la ionización de partículas de CO_2, las mismas que son similares a las obtenidas por el MIT (Massachusetts Institute of Technology), para un precipitador electrostático experimental de forma (tubular de una sola cámara) y función similar a la propuesta de filtro electrostático.

El diseño propuesto de filtro electrostático garantiza una reducción teórica de aproximadamente 99.9% de CO_2 resultando factible la ionización de partículas de CO_2 para una etapa posterior de implementación de la propuesta de filtro electrostático presentada.

6. Referencias

[1] G. P. Villa, «Instituto de Biotecnología,» 06 2003. [En línea]. Available: http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/Spec_Masas.pdf. [Último acceso: 20 01 2016].

[2] I. Prieto, «Academia,» 08 2000. [En línea]. Available: http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1006/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT08_Precipitador_electrostatico.pdf. [Último acceso: 20 01 2016].

[3] L. V. Cremades y E. X. Castells, «Separación por electricidad (Electrofiltros),» de *Tratamiento y Acondicionamiento de gases*, Ediciones Díaz de Santos, 2012, pp. 911-920.

[4] H. k. M. Y. Akinori Zukeran, «Diesel Exhaust Particle Reduction using Electrostatic Precipitator,» *IEEE,* pp. 1-6.

[5] H. J. S. Morales, «Estudio ambiental, técnico y económico de la utilización y aprovechamiento de precipitadores electrostáticos, en la planta de generación Arizona.,» Guatemala, 2008.

[6] P. B. M. IIT Roorke, «NPTEL,» 12 11 2013. [En línea]. Available: http://nptel.ac.in/courses/103107084/16.

[7] J. A. Pozo Palacios, «Influencia de la disposición del conducto de escape en el índice de contaminación de buses de transporte masivo.,» Cuenca, 2010.

[8] H. A. Haus y J. R. Melcher, «Electromagnetic Fields and Energy. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare),» 2008. [En línea]. Available: http://ocw.mit.edu. [Último acceso: 20 10 2015].

[9] E. Fernández Sandoval, «Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo JET PULSE y precipitador electrostático,» Piura, 2008.

[10] L. Fernández, «Diseño de un Precipitador Electrostático,» Universidad Autonoma Juan Misael, Tarija, 2015.

[11] P. L. T. Y. D. C. James Turner, Controles de Materia Particulada, 1999.

[12] L. Theodore, Air Pollution Control Equipment Calculations, Wiley-Interscience, 2008, p. 586.