

# Evaluación de un proceso de fotocatalisis del dióxido de titanio para la neutralización de óxidos de nitrógeno generados por la combustión de ACPM

David Normando Durango Moncayo

Juan José Galindez Gámez

Estudiantes Universidad Mariana

## Resumen

Para la minimización de los impactos causados por emisiones atmosféricas provenientes de la combustión del ACPM (NOx), se pretende diseñar e implementar un sistema fotocatalítico, capaz de reducir o remover dichos contaminantes. El catalizador utilizado para esta investigación fue el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), con el propósito de fijar los óxidos de nitrógeno y disminuir la concentración de salida, después de una reacción de oxidación llevada a cabo por el contacto de la luz UV y el catalizador. En el siguiente artículo se realiza un diseño experimental para diagnosticar el comportamiento de la remoción de NOx.

**Palabras clave:** dióxido de titanio, fotocatalisis, oxidación, óxidos de nitrógeno.

## Introducción

Desde la revolución industrial, las emisiones de gases que se derivan de las actividades humanas, han provocado cambios capaces de alterar los equilibrios que mantienen las propiedades y funciones de la atmósfera actual, ya sea modificando la proporción de sus componentes o mediante la introducción de elementos extraños a ésta, lo que conocemos en su conjunto como contaminación atmosférica (Gallego et al., 2012).

En Colombia se ha detectado según cifras de estudios realizados, que el 70% de las fuentes móviles utiliza aceite combustible para motores (ACPM) debido a que representa un mayor rendimiento a menor costo. Sin embargo, genera un impacto significativo o representativo en las condiciones atmosféricas, debido a que el ACPM no es completamente refinado como la gasolina, este presenta una mayor concentración de residuos minerales que pueden ser altamente contaminantes, que produce mayores cantidades de humo y contiene partículas residuales. Los vehículos que funcionan con ACPM consumen menos combustible que aquellos que utilizan gasolina, pero causan cuatro veces más contaminación atmosférica que el resto, pues emiten niveles muy superiores de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y partículas en suspensión, dos de los principales contaminantes del aire.

Es necesario dar a conocer que existen dos métodos utilizados para la remoción de los NOx, un método primario, consistente en disminuir su formación en el lugar de origen, alterando parámetros de combustión, como temperatura y concentración de oxígeno; un método secundario y más eficaz, llevado a cabo luego de la etapa de formación, consiste en utilizar técnicas de reducción, oxidación u oxidación foto catalítica (Huepe, 2014). Para el presente caso, se utilizara la técnica denominada oxidación foto catalítica, la cual se basa en una reacción catalítica en la que tiene lugar la absorción directa o indirecta de luz ultravioleta (UV), ya sea natural (proveniente del sol) o artificial (lámparas), fijado en un material sólido inorgánico llamado muselina, normalmente un semiconductor de banda ancha como el TiO<sub>2</sub>, para promover pares “hueco-electrón” con extraordinario potencial oxidante y reductor, y por lo tanto, capaz de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes (Ouzzine, 2014).

Debido a las propiedades del TiO<sub>2</sub> se evaluará la eficiencia que tiene este componente, en un proceso de combustión a escala de laboratorio de un motor de un equipo percutor, en el cual se realizará el control específico a los Nox; para ello, se realizará un diseño que permite las mediciones sin registrar pérdidas de concentración del contaminante, y que de igual manera propicia las condiciones adecuadas para la reacción del TiO<sub>2</sub>.

## Formulación del problema

Desde el descubrimiento del ACPM (aceite combustible para motor) en el mundo, se ha utilizado este combustible para la mayoría de procesos productivos o procesos que el hombre utiliza para el desarrollo de las sociedades, tales como: industrias, transporte y el accionar de maquinaria pesada, entre otros.

Al ser un compuesto mucho menos refinado que la gasolina, el ACPM resulta también mucho más rendidor, es decir, presenta hasta dieciocho por ciento más energía que la gasolina, en cuanto a sus unidades de volumen. El ACPM constituye un combustible que puede durar hasta el doble de la gasolina, por esto, existe gran demanda en el mundo por este tipo de combustible; sin embargo, por el ahorro en los procesos de refinamiento, éste llega a producir afectaciones medioambientales importantes.

tes, debido a que se emite una mayor concentración de residuos minerales y gases tóxicos, en los que se encuentra en su mayoría dióxido de nitrógeno, el cual es el objetivo para el presente estudio, ya que estos causan efectos adversos y de muy diversa naturaleza sobre la salud humana, como inflamación de las vías aéreas, afecciones de órganos, como hígado o bazo, o de sistemas, como el sistema circulatorio o el inmunitario, que propician a su vez infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias; sobre el medio ambiente, como acidificación y eutrofización de ecosistemas, afecciones metabólicas y limitación del crecimiento vegetal.

Además, los procesos de acidificación pueden también afectar las edificaciones y otro tipo de materiales. Debido a lo anterior, se hace necesaria la implantación de nuevas tecnologías que puedan representar una reducción significativa para este tipo de emisiones y por ende, los efectos causados a los organismos vivos y al medio ambiente en general.

### Pregunta a resolver para el estudio de caso

¿Cuál es la eficiencia del Dióxido de Titanio como catalizador a partir de fotones en la neutralización de óxidos de nitrógeno generados por la combustión de ACPM?

### Objetivo general

Evaluar la eficiencia del Dióxido de Titanio como fotocatalizador para la oxidación de óxidos de nitrógeno, en un prototipo neutralizador a escala laboratorio para los gases generados en motor de un equipo percutor utilizado en la sede Alvernia de la Universidad Mariana.

### Objetivos específicos

1. Diseñar un prototipo fotocatalizador capaz de reducir las emisiones de Nox.
2. Diseñar mecanismo de transporte (emisión-prototipo) incluido el sistema de control para material particulado.
3. Construir e implementar el sistema fotocatalizador diseñado.
4. Determinar los beneficios del TiO<sub>2</sub> en cuanto a la neutralización de Nox.

### Hipótesis

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), generados por la combustión de ACPM en un motor de un equipo percutor pueden ser neutralizados hasta en un 60% por el prototipo fotocatalizador de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>).

### Descripción de proceso del sistema fotocatalítico

Para realizar el procedimiento, se tuvo en cuenta características, como la velocidad del flujo a la salida del motor de combustión de ACPM (escape) la cual se determinó con el anemómetro, arrojando una velocidad de 0.3 a 1.3 metros/segundo y una temperatura de 25 grados centígrados, la cual puede variar en el transcurso del tiempo de toma de muestras. (Ver Figura 1).

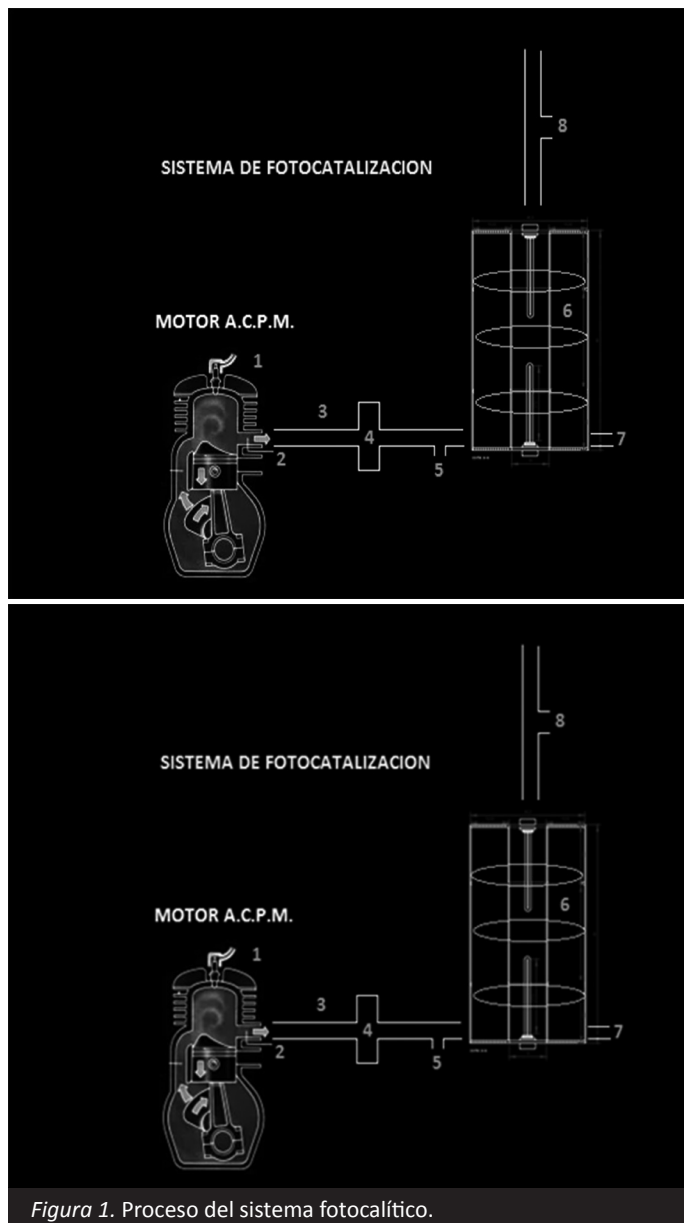


Figura 1. Proceso del sistema fotocatalítico.

### Descripción de procedimiento

1. Equipo perforador de suelo para simular la combustión de aceite combustible para motor (ACPM). Utilizado para tomar y extraer muestras de suelo, cuenta con una potencia de 7.2 Hp y 1800 RPM.
2. Exosto o escape del motor con un diámetro 1,¼´ pulgadas, del cual será el encargado de la emisión de diferentes compuestos como dióxidos de nitrógeno, monóxidos de nitrógeno y óxidos de nitrógeno. Estos últimos se producen al existir alta presión, temperatura y exceso de oxígeno durante la combustión dentro del motor. El estudio se enfocó en analizar detalladamente el dióxido de nitrógeno que se genera al entrar en contacto directo con el oxígeno presente en el aire.
3. Se realizará un acople por la parte interna del escape para evitar cualquier fuga que pueda existir, por ende, se tomó la decisión de acoplar una tubería de 1" de diámetro con un material de hierro galvanizado capaz de soportar altas temperaturas e impedir algún daño a la estructura.

4. Posteriormente, se encuentra una caja de filtro para partículas, el cual tendrá un volumen con una medida de 20x20x5 cm, capaz de retener material particulado proveniente de la combustión de ACPM. Se obtendrá una medida de peso de este material particulado, por medio de procesos de evaporación y calcinación dentro de un horno a alta temperatura para encontrar el peso neto del material particulado retenido. Se evitará también el paso de estas grandes partículas al sistema fotocatalítico y evitar averías o daños posteriores.

5. Se diseñó un niple de inspección de 30 cm de largo y un diámetro de 1" para tomar las muestras y obtener niveles de concentración, antes de que se exponga al tratamiento o control de la fotocatalisis. Esta medición se la realizará utilizando un beaker de 100 ml, el cual contendrá arsenito de sodio usado para fijar o retener el gas emitido, posteriormente será analizado y evaluado por medio de la metodología UV explicada detalladamente más adelante.

6. En esta parte se encuentra un sistema fotocatalítico como tal, con unas medidas de 62 cm de largo y 40 cm de diámetro, dentro de este cilindro se encuentran ubicados 3 discos del mismo diámetro del cilindro que irán sujetos por pestañas de 2 cm ubicadas en las paredes de manera inclinada. Estos discos tienen un marco rígido de alambre de aluminio encauchetado, el cual irá recubierto con una tela llamada etamina, encargada de fijar de manera directa el catalizador llamado dióxido de titanio. En la parte interna del cilindro también se encuentra ubicada una lámpara generadora de rayos UV con un largo de 61,5 cm, utilizada como fuente de energía para que realice la reacción de oxidación.

7. En la parte inferior derecha del sistema fotocatalítico se encuentra ubicada una pequeña salida de 2 cm de diámetro, capaz de canalizar y transportar el líquido producido después de la reacción del proceso, obteniendo ácido nítrico el cual será evaluado y analizado mediante la metodología de titulación para ver los productos que tiene el sistema una vez implementado.

Es importante destacar que para el análisis de las muestras de dióxido de nitrógeno en los puntos 5,8 se utilizará otra metodología para tener una segunda medida, aparte del equipo BACHARACH. (Ver Figuras 2 y 3).

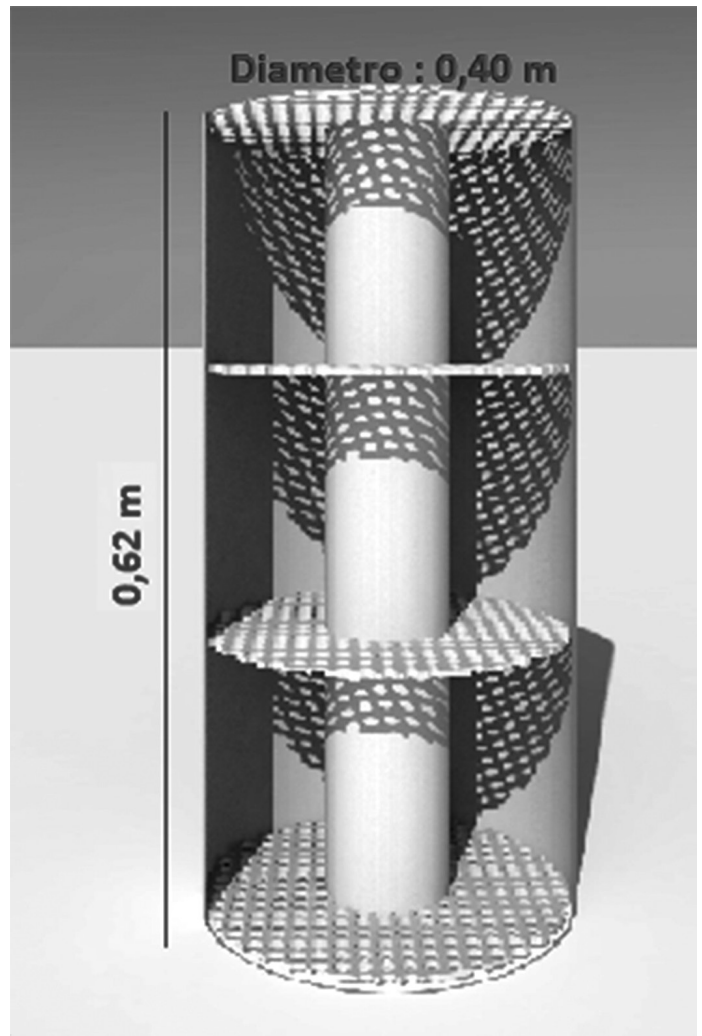


Figura 2. Diagrama de diseño, Sketchup (AutoCAD).

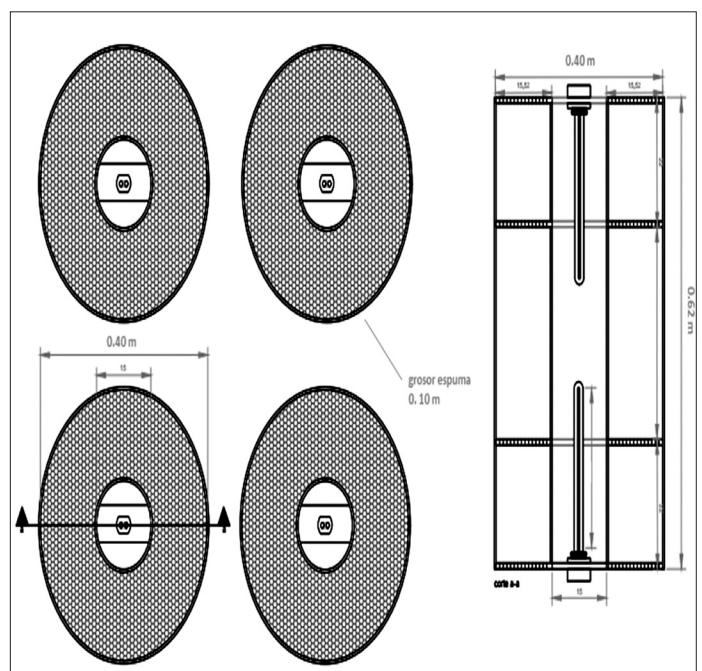


Figura 3. Diseño AutoCAD.

## Etapas de construcción

Para la primera fase de construcción del prototipo fotocatalítico de dióxido de titanio se inició con el diseño del prototipo en software AUTOCAD, una vez conforme con el diseño se realizó una discusión entre el grupo de trabajo para decidir los materiales más adecuados, por lo cual se optó por el acero inoxidable de calibre (18-1.25 mm) para el cuerpo del prototipo, el cual otorga rigidez y durabilidad, además de contribuir con la reflexión de los rayos UV de la lámpara que se decidió incluir dentro del prototipo, la cual está cubierta por un cilindro de acrílico transparente. La soldadura utilizada para el cuerpo del prototipo fue la MIC, el arco se produce mediante un electrodo formado por un hilo

continuo y las piezas a unir, quedando protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte como el argón. Posteriormente, se realizaron los discos de etamina, a base de algodón en los cuales va adherido el dióxido de titanio; para el sistema de transporte de la emisión se decidió utilizar tubería de acero inoxidable de medida 1 ¼. Una vez finalizado la construcción y consolidación de los distintos componentes se realizó una prueba en la sede Alvernia, la cual arrojó errores que posteriormente fueron subsanados, como fugas de la emisión en la tapa del prototipo, ésta se corrigió con refuerzos de acero más un empaque realizado en neumático. Para la corrección de los discos de etamina se decidió implementar discos de espuma de poliuretano con el fin de aumentar el área de contacto. (Ver Figura 4).



## Procedimiento para realizar el ensayo

Antes de poner en marcha el motor, se tuvo que añadir en los discos, tanto de espuma como de tela, una concentración equilibrada o igual de dióxido de titanio  $TiO_2$  (catalizador) a cada uno de ellos. Se utilizó como recomendación una relación de 2 g de  $TiO_2$  por cada 100 ml de agua destilada, en total se hizo una dilución de 6g de  $TiO_2$  en 300 ml de agua destilada. Se procedió a secar en un tiempo considerable los discos untados del catalizador para otorgarle una mayor fijación. Fueron 4 discos de espuma y 3 de tela los que se utilizaron para realizar el experimento, como se mencionó, a los discos se les aplicó fracciones iguales de  $TiO_2$  para que sufran la misma reacción o comportamiento en el momento de entrar en contacto con la emisión producida por ACPM.

Posteriormente, se acopló el prototipo fotocatalizador al exosto del equipo perforador, utilizando tiras de neumático junto a

trozos de cinta para ductos, ya que son materiales resistentes a las altas temperaturas.

Finalmente, se dio encendido al motor y se calibró el Bacharach durante un minuto para que la toma de datos de concentración de  $NO_2$  sea representativa y significativa. Los datos fueron tomados en un periodo de 2 minutos cada 10 segundos para ver el comportamiento que tiene el gas a estudiar. (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Características del motor

Características del motor utilizado	
RPM	1800
KW	7,35
HP	7,24
Cc	418

Se observó que, al transcurrir 2 minutos tiende a estabilizarse, ya que se tomó muestras al transcurrir 15 y 30 minutos una vez iniciado el proceso de combustión, éstas arrojaron datos estables (similares en t=2 min) de concentración de no2 antes y después del control. (Ver Tablas 2, 3 y 4).

Tabla 2. Concentraciones NO2 sin tratamiento (1)

Concentraciones NO2 sin tratamiento (1)			
Tiempo (s)	PPM	Mg/m <sup>3</sup>	Temperatura (°C)
0	0	0	77
10	5	9,40695297	77
20	7	13,1697342	77
30	11	20,6952965	77
40	15	28,2208589	77
50	18	33,8650307	77
60	20	37,6278119	77
70	20	37,6278119	77
80	21	39,5092025	77
90	23	43,2719836	77
100	24	45,1533742	77
110	24	45,1533742	77
120	24	45,1533742	77

Tabla 3. Concentraciones de NO2 con tratamiento después de 1 minuto (2)

Concentraciones de NO2 Con tratamiento despues de 1 minuto (2)			
Tiempo (s)	PPM	Mg/m <sup>3</sup>	Temperatura (°C)
0	0	0	30
10	5	9,40695297	30
20	7	13,1697342	29
30	7	13,1697342	30
40	10	18,8139059	29
50	11	20,6952965	29
60	11	20,6952965	29
70	11	20,6952965	29
80	13	24,4580777	29
90	13	24,4580777	30
100	14	26,3394683	29
110	14	26,3394683	29
120	14	26,3394683	29

Tabla 4. Concentraciones de NO2 con tratamiento después de 30 minutos (3)

Concentraciones de NO2 Con tratamiento despues de 30 minutos (3)			
Tiempo (s)	PPM	Mg/m <sup>3</sup>	Temperatura (°C)
0	5	9,40695297	29
10	9	16,9325153	29
20	11	20,6952965	30
30	11	20,6952965	29
40	11	20,6952965	30
50	12	22,5766871	30
60	12	22,5766871	29
70	13	24,4580777	29
80	13	24,4580777	29
90	13	24,4580777	30
100	13	24,4580777	29
110	14	26,3394683	29
120	14	26,3394683	29

Posteriormente, se obtuvo la emisión de NO2, obteniendo como resultado las cargas de cada una de las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 5. Combustible ACPM

COMBUSTIBLE ACPM		
	Metros	Pulgadas
Diametro Exosto	0,03175	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> '
Radio del Exosto	0,015875	
Área transversal (m <sup>2</sup> )	0,000791732	
Velocidad del flujo (m/s)	1,4	
Caudal del flujo (m <sup>3</sup> /s)	0,001108425	

$q_i =$	mg/s
	0,050049138
CARGA EN LA ENTRADA(1)	
$q_i =$	mg/s
	0,02919533
CARGA EN LA SALIDA (2)	
$q_i =$	mg/s
	0,02919533
CARGA EN LA SALIDA(3)	

Figura 5. Formulas en la herramienta Excel.

Se ordenó, operó y obtuvo resultados, manejando la herramienta Excel que irá adjunto en la presentación para revisar y rectificar los valores generados en el experimento.

#### Validación de resultados

El porcentaje de remoción se pudo obtener con la siguiente ecuación teniendo en cuenta las cargas obtenidas.

$$\% \text{Remoción} = \frac{\text{Concentración Af} - \text{Concentración Ef}}{\text{Concentración Af}} * 100$$

Af : Afluente; Ef : Efluente

Se utilizó también la herramienta Excel para generar estos resultados de % de remoción. Es importante aclarar que el porcentaje de remoción se lo trabajó en el punto de estabilización.

% de remoción de NO2
41,6666667

A continuación, se encuentran los datos donde se verifican y corroboran los datos obtenidos en las prácticas realizadas. (Ver Figuras 6, 7 y 8).

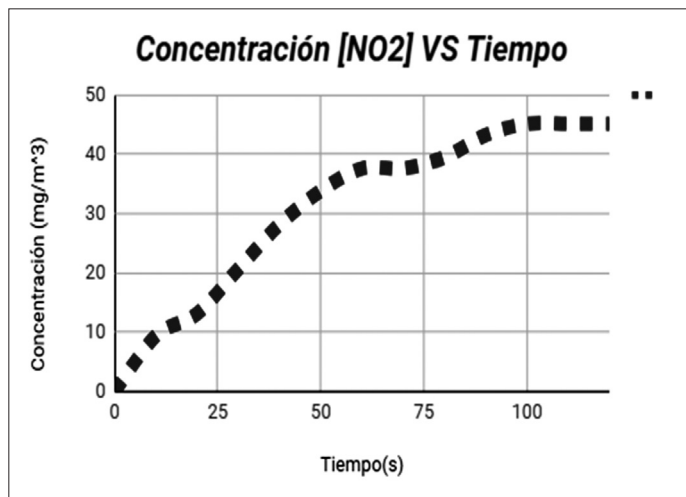


Figura 6. Datos sin tratamiento.

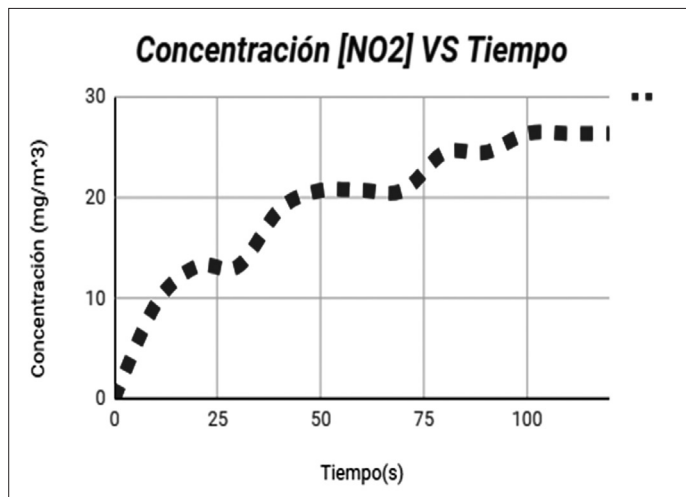


Figura 7. Datos después de 1 minuto, con tratamiento.

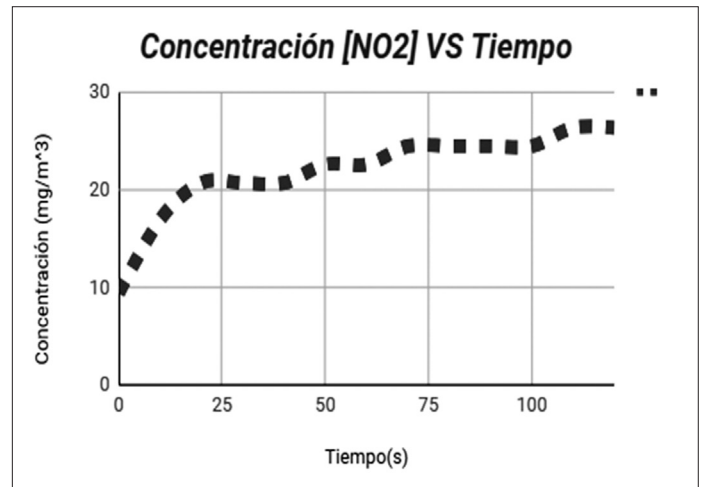


Figura 8. Datos después de 30 minutos, con tratamiento.

Luego de observar y analizar las Figuras anteriores, es evidente que los 3 casos tienen un comportamiento similar, ya que al inicio hay una mayor fluctuación o cambio y finalmente llega un punto de estabilización, donde el resultado de concentración ya no presenta variaciones o son mínimas. Se logra detallar en las gráficas la reducción casi de un 50% en la concentración de dióxidos de nitrógeno, garantizando el buen funcionamiento y rendimiento del equipo fotocatalítico.

#### Análisis de resultados

Se realizaron varias repeticiones para obtener las medidas más representativas y significativas con la ayuda del equipo Bacharach, al final se definieron 3 medidas; la primera es la concentración de dióxido de nitrógeno sin ningún tratamiento, la segunda consiste en tomar las concentraciones después de un minuto de funcionamiento del motor, con el filtro fotocatalítico instalado y la última medición se la llevó a cabo después de 30 minutos de funcionamiento del motor y con el filtro fotocatalítico también implementado.

Se observa que al transcurrir los primeros 30 segundos antes y después del control, no se encuentra una diferencia significativa en los datos de concentración, esto puede ser causado por la fase de calentamiento del motor gracias a que no se hace una combustión adecuada o no se hace una mezcla de sus componentes dentro del motor.

Al transcurrir 60 segundos se empieza a marcar la diferencia en cuanto a la remoción de óxidos de nitrógeno, en los cuales hasta llegar a un tiempo de media hora permanecen constantes, lo cual indica que la reacción fotocatalítica se realiza adecuadamente en este periodo de tiempo y que el dióxido de titanio suministrado en el control es suficiente para reducir las cargas contaminantes que se generan durante media hora en un porcentaje cercano al 50%.

Se pretende obtener un dato a escala real sobre la emisión que posiblemente se puede llegar a producir en este equipo perforador, teniendo en cuenta el tiempo que lo utilizan normalmente y recolectando datos cada segundo para realizar una acumulación

de las concentraciones obtenidas, para poder decir a escala real que reducción de contaminante ofrece el sistema fotocatalítico.

### Discusión y conclusión

Al finalizar el experimento se logró concluir con el equipo de trabajo, que la reacción de oxidación catalítica de dióxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) se logró satisfactoriamente en un 41.1% de remoción, evidenciando que los óxidos de nitrógeno llegaron a convertirse en nitritos y nitratos en fases sólidas y líquidas, llegando a tener un mejor manejo de estos residuos como es el ácido nítrico, que más adelante será analizado para dar un tratamiento adecuado.

Además, se debe tener en cuenta que la velocidad del fluido disminuye cuando llega al filtro fotocatalítico debido a que aumenta el área transversal o de contacto considerablemente, el cual permite un mayor tiempo de recepción y permanencia del contaminante, asegurando que la reacción se lleve a cabo durante el paso de NO<sub>2</sub>.

Se logró cumplir el objetivo de remover el NO<sub>2</sub> en un 41.1% como se mencionó anteriormente, pero no se logró aún cumplir la hipótesis planteada al inicio del experimento, ya que esta era de un 60%. Para ello, se pretende aplicar posteriormente una mayor concentración de TiO<sub>2</sub> y una mayor cantidad de discos, jugando de esta manera con estas dos variables que podrían llegar a generar un mayor % de remoción, garantizando una emisión con menor impacto ambiental a la atmósfera.

Es importante realizar la discusión pertinente sobre el diseño y materiales a utilizar en cualquier fase de diseño y construcción del prototipo ya que puede anticipar inconvenientes que luego se traducen en tiempo y materiales perdidos, generando resultados erróneos para la investigación.

Se puede observar el amplio espectro que tiene el dióxido de titanio en la disminución de agentes contaminantes atmosféricos, en los cuales se identifica que el dióxido de titanio presenta mayor eficiencia en óxidos de nitrógeno; es importante resaltar que en esos estudios la forma de aplicación de la fotocatalisis es en recubrimiento en bloques de concreto en los cuales se realizaron variaciones en los tiempos de contacto que para los NO<sub>x</sub> fueron más prolongados y arrojando las mejores disminuciones, estos métodos van encaminados a ser utilizados en grandes superficies, por ejemplo, fachadas de edificios y demás construcciones urbanas (Technopark Kralupi, 2016).

Es importante destacar que en el presente estudio “filtro fotocatalizador” la forma de atacar los contaminantes puede llegar a ser muy efectiva debido a que se controla la emisión en el ducto, es decir, antes de ser liberado a la atmósfera, lo cual asegura que todo el flujo tenga contacto dentro del prototipo, llegando a una disminución aproximada de 41% por unidad emisora (motor de ACPM).

Si se logra aplicar este dispositivo en el parque automotor de servicio público se reduciría una carga importante de contami-

nantes al día. De esta forma, una hipótesis válida frente a los estudios analizados y tenidos en cuenta para esta investigación, sería afirmar que al utilizar este método o prototipo se asegura en cierta medida que el flujo de la emisión tenga mayor contacto haciendo más eficiente la reducción de los contaminantes, ya que en los otros estudios no se asegura que los gases tengan contacto con las superficies a pesar de cubrir grandes áreas.

Es necesario realizar estudios más específicos en la forma de atacar los contaminantes y crear asociaciones que apoyen ese fin, para lograr la reducción significativa de la contaminación en el medio ambiente; además de apoyarse en asociaciones, como la Asociación Iberoamericana de fotocatalisis la cual adelanta estudios muy importantes en temas de calidad del aire y reducción de contaminantes

También se realizaron algunas modificaciones después de una actividad de retroalimentación, donde se hicieron unas mejoras en la parte superior de la tapa llevándola hasta una forma cónica (tolva) para evitar acumulaciones o formaciones de vórtices por sobrepresión en el flujo, que puedan llegar a colmar el filtro fotocatalítico; así mismo se realizaron modificaciones en la parte inferior del filtro, formando una especie de falso fondo para garantizar que el flujo proveniente del motor pueda expandirse y forzar contacto directo y uniforme en el volumen total del prototipo para que los discos con catalizador realicen su función de manera correcta.

### Referencias

- Gallego, A., Gonzáles, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcicuño, R., Bravo, J., ... Durand, J. (2012). *Contaminación atmosférica*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Huepe, J. (2014). *Desarrollo y evaluación de una pintura fotocatalítica para disminuir nox presentes en el aire* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Ouzzine, M. (2014). *Materiales basados en nanopartículas de tio2 para la oxidación fotocatalítica de propeno en fase gas a baja concentración* (tesis doctoral). Universidad de Alicante, España.
- Technopark Kralupi. (2016). *Comprobación de la actividad fotocatalítica del recubrimiento FNNANO FN2® según los métodos y estándares ISO*. Recuperado de <http://www.fotocatalisis.org/assets/pruebas-technopark-092016.pdf>