

Catalizadores de tres vías: historia, funcionamiento y ventajas ambientales

Three-way catalysts: history, performance and environmental advantages

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Sofía Navarro-Espinoza¹
Diana Meza-Figueroa²
Martín Pedroza-Montero³
Diego Soto-Puebla⁴

Recibido: 15 / 08 / 2022

Aceptado: 24 / 11 / 2022

Publicado: 08 / 12 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.240>

Autor de Correspondencia:
Sofía Navarro-Espinoza
Correo: sofia.navarro@unison.mx

Resumen

El catalizador de tres vías es una herramienta utilizada para reducir la emisión de gases contaminantes liberados por el motor de combustión interna de un automóvil. Este trabajo tiene como objetivo proporcionar una comprensión del funcionamiento e importancia de los catalizadores de tres vías. Se presenta una descripción general de la evolución histórica de su desarrollo, hasta llegar a la formulación y estructura de los catalizadores actuales. Además, se describe su funcionamiento a nivel molecular y las condiciones de operación que aseguran su eficiencia de conversión. Discutimos las ventajas al medio ambiente y a la salud humana que acompañan su uso adecuado. Por último, se remarca la importancia de su reemplazo oportuno.

Palabras clave: catalizadores, Contaminación atmosférica, Emisión de gases, Tráfico vehicular.

Abstract

Three-way catalyst is a tool used to reduce the emission of pollutant gases released by an automobile's internal combustion engine. This paper aims to provide an understanding of the operation and the importance of the three-way catalyst. A general description of the historical evolution of their development, up to the formulation and structure of current catalysts, is presented. In addition, their operation at the molecular level and the operating conditions that ensure their conversion efficiency are described. We discuss the advantages to the environment and human health that come along with their proper use. Finally, the importance of their timely replacement is highlighted.

Keywords: atmospheric pollution, Gas emissions, Vehicular traffic.

¹ Sofía Navarro-Espinoza, Departamento de Ciencia Químico-Biológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, sofia.navarro@unison.mx. 0000-0003-2727-2164

² Diana Meza-Figueroa, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, diana.meza@unison.mx. 0000-0002-8934-0321

³ Martín Pedroza-Montero, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, martin.pedroza@unison.mx. 0000-0003-4190-6477

⁴ Diego Soto-Puebla, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, diego.soto@unison.mx. 0000-0003-3604-1421.



INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los parámetros más importantes que afectan la calidad de vida y la salud de la población en comunidades urbanas. Con el objetivo de garantizar una buena calidad del aire, los gobiernos de todo el mundo han adoptado una serie de medidas cada vez más exigentes para frenar su contaminación [1]. En específico, se ha prestado especial atención a las emisiones de los vehículos de motor. Los automóviles funcionan con gasolina, la cual está compuesta por hidrocarburos. Cuando el combustible de hidrocarburo se quema con el oxígeno del aire, se libera una gran cantidad de energía. Sin embargo, debido a que la gasolina contiene alrededor de 150 compuestos químicos diferentes, genera más que solo energía: también produce contaminación (figura 1). Los principales contaminantes son gases como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha implementado normas que indican los requisitos de emisiones

gaseosas para vehículos y motores, con el fin de mejorar la calidad del aire. Los estándares de emisiones para vehículos livianos se establecieron por primera vez en 1988 y entraron en vigor en 1993 (NOM-042-ECOL-1993 y NOM-042-ECOL-1993). Posteriormente, se actualizaron con la publicación de la NOM-042-SEMARNAT-2003 que brinda una opción de cumplimiento con los estándares basados en el sistema regulatorio de los EE. UU. y el sistema europeo, pasando de los estándares Euro 3 y 4. Esta regulación está en vigor desde 2004 y actualmente establece los límites máximos permisibles de emisión CO, HC y NOx por vehículos de pasajeros (hasta 3,857 kilogramos), que usan gasolina, gas natural, gas licuado de petróleo o diésel (tabla 1) [2]. Se define como vehículo de pasajeros a cualquier automóvil con capacidad de hasta 10 personas. En la tabla 1 se muestra la clasificación en donde A: Vehículos año modelo 2004 y posteriores, B: Vehículos año modelo 2007 y posteriores, C: Vehículos al año calendario en el cual se apliquen los límites máximos permisibles.

Tabla 1: Límites máximos permisibles de emisión para vehículos de pasajeros que funcionan con gasolina o diésel establecidos en la NOM-042-SEMARNAT-2003.

Vehículo de pasajeros	Ejemplo	CO (g/km)		HC (g/km)		NO _x (g/km)	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
A	Nissan Sentra 2004	2.11		0.156		0.25	0.62
B	Volkswagen Jetta 2009	2.11		0.099		0.249	
C	SUV Toyota Rav4 2022	2.11		0.047		0.068	



Debido al incremento de la población y la cantidad de vehículos, las regulaciones son cada vez más exigentes. Por tal motivo, se han desarrollado tecnologías avanzadas de tratamiento de emisiones para vehículos de gasolina, lo que puede ayudar a reducir la contaminación asociada a tráfico vehicular a pesar del aumento de los viajes en automóvil. El uso del catalizador de tres vías (CTV) es una estrategia importante para disminuir los gases de escape como CO, HC y NOx [3]. A continuación, se profundiza en la formulación histórica y actual de los CTV y se investiga la química catalítica que tiene lugar a nivel molecular; así como las ventajas ambientales que ofrecen estos dispositivos.



Figura 1. Emisión de gases tóxicos por el tubo de escape de un vehículo de pasajeros en una zona urbana. Imagen obtenida de wired.com/story/think-ride-sharing-is-good-for-the-planet-not-so-fast/

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE LOS CATALIZADORES DE TRES VÍAS

Los catalizadores se introdujeron a inicios de los 70's para cumplir con la normativa de control de emisiones de vehículos con motor [4]. Los primeros catalizadores se conocían como convertidores catalíticos de dos vías, ya que oxidaban el CO y los HC transformándolos en CO₂ y vapor de agua (H₂O). La conversión de estos dos gases se abordó con el uso de platino y paladio, que demostraron ser muy activos y estables para la oxidación. Inicialmente, la reducción de NOx se llevó a cabo de forma no catalítica mediante un sistema mecánico denominado "recirculación de los gases de escape". Los gases ricos en H₂O, CO₂ y N₂, se reincorporaban a la primera fase del ciclo de combustión (etapa de admisión) para mezclarse con el aire de aspiración. Esto aumentaba la capacidad calorífica y disminuía la temperatura máxima alcanzada. De esta manera la cantidad de NO se reducía, ya que a mayor temperatura se generan más óxidos de nitrógeno [4]. Posteriormente, la investigación sobre materiales catalíticos condujo al descubrimiento del rodio (Rh) como un excelente catalizador reductor de NOx. En 1980, la introducción del Rh proporcionó al convertidor catalítico la capacidad de reducir también los NOx dando lugar al llamado catalizador de tres vías [5]. Estos elementos activos (Pt, Pd y Rh) se esparcieron en un soporte cuida-

dosamente fabricado con un material altamente capaz de almacenar oxígeno, para moderar los cambios rápidos de las estequiometrías de escape ricas o pobres en oxígeno. El componente de almacenamiento adsorbe el exceso de oxígeno presente y lo libera para la ejecución de las reacciones químicas. El primer material utilizado fue CeO₂, que presenta la característica de que cada átomo de O₂ libre crea un espacio y produce dos cationes Ce³⁺ mediante la distribución de electrones a dos cationes Ce⁴⁺ [6]. Sin embargo, a pesar de sus excelentes propiedades de almacenamiento de oxígeno, el uso de CeO₂ puro se descartó porque es poco termoestable y sufre sinterización a altas temperaturas, perdiendo así sus características cruciales de almacenamiento y liberación de este elemento [7]. En consecuencia, la actividad de investigación en los años 90's se centró en la mejora de la estabilidad de la superficie del soporte de CeO₂. Entre los diferentes sistemas estudiados, el ZrO₂ parecía ser el estabilizador térmico más eficaz, especialmente cuando forma un óxido mixto con CeO₂. Los primeros trabajos incorporaron ZrO₂ en la superficie de los CTV de forma descontrolada, principalmente por impregnación, obteniendo resultados poco favorecedores. Posteriormente, se encontró que la forma adecuada de añadir ZrO₂ es generando una solución sólida entre el CeO₂ y el ZrO₂ [8]. También, se investigó la estabilidad térmica de los óxidos mixtos CeO₂ ± ZrO₂ soportados sobre Al₂O₃ y se demostró que una mayor proporción de ZrO₂ puede evitar que el CeO₂ disperso reaccione con el Al₂O₃, mejorando así la estabilidad de los CTV [9]. Como puede observarse, los CTV han evolucionado tras años de investigación hasta su formulación actual para asegurar una mayor eficiencia. A continuación, se describen las características y el funcionamiento de los CTV de uso vigente.

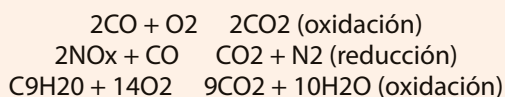
Principios de funcionamiento de los catalizadores de tres vías actuales

El diseño actual de estos dispositivos consiste en una carcasa de acero que protege dos monolitos de cordierita sintética (2MgO-2Al₂O₃-5SiO₂), material que exhibe una baja expansión térmica y resistencia al agrietamiento por choques térmicos durante cambios rápidos de tempera-





tura. La estructura interna de cerámica está organizada en un sistema de canales similar a un panal de abejas, resultando en una mayor superficie de interacción entre los gases tóxicos y la superficie catalítica [10]. La superficie del CTV está recubierta con platinoides (Pt, Pd y Rh) encargados de acelerar las reacciones de conversión (figura 2). Los platinoides ayudan a acelerar una reacción química, sin ser agotados u oxidados. Un catalizador actúa generando un estado de transición diferente y una menor energía de activación para la formación de productos. Por lo tanto, las colisiones moleculares tienen la energía necesaria para alcanzar el estado de transición. En consecuencia, los catalizadores permiten el transcurso de reacciones que de otro modo estarían bloqueadas o desaceleradas por una barrera cinética [11]. Los platinoides son colocados sobre una solución sólida de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_0.2\text{Zr}_0.8\text{O}_2$. Este compuesto se caracteriza por poseer la capacidad de liberar y almacenar oxígeno de forma reversible por la fluctuación de los estados de oxidación de los cationes. La alta capacidad de almacenar oxígeno es debido a la facilidad con la que los iones de Ce pueden reducirse de Ce^{4+} a Ce^{3+} tras la formación de vacantes de oxígeno. El catión Zr^{+4} aumenta la capacidad de almacenar oxígeno debido a la distorsión de la red cristalina. Una buena capacidad de almacenamiento de oxígeno es importante, ya que este elemento es esencial para que se lleven a cabo las siguientes reacciones redox de conversión.



El oxígeno necesario para formar la mezcla con combustible y que eventualmente alcanza el CTV se toma del aire atmosférico. El CTV es mucho más eficiente convirtiendo CO, HC y NOx cuando la relación de aire/combustible es estequiométrica (14.6/1). Además, esta proporción evita que el CTV se impregne de gasolina no quemada y se dañe. El aire se introduce a través del filtro en el colector de admisión y se dosifica mediante la válvula de mariposa. Por otro lado, llega el combustible, que dentro del colector de admisión se une al aire y esta mezcla es enviada al cilindro. El llenado de los cilindros se produce por aspiración mientras la válvula de admisión está abierta. Para lograr que el

motor funcione a una relación aire/combustible de 14.6/1 se utiliza un sensor que detecta la presencia de oxígeno (sonda lambda). De esta manera, si el sensor detecta una alta proporción de O, envía una señal al sistema de inyección para enriquecer la mezcla inyectando más combustible. Contrariamente, si la mezcla contiene mayor cantidad de combustible, el sensor detecta la ausencia de oxígeno y envía un orden al sistema de inyección para que reduzca la cantidad de combustible utilizado. Los gases de escape resultantes de la explosión de la mezcla en las cámaras de combustión se canalizan a través de colectores y pasan por tres fases antes de ser expulsados (figura 3). En la fase 1, ocurre la unión de los gases de cada cilindro en un único colector. La fase 2, consiste en la reorganización molecular de las especies gaseosas a través del CTV. Finalmente, en la fase 3 los gases resultantes pasan a través de un resonador y las ondas sonoras producidas con cada explosión se mitigan en un silenciador. El proceso de conversión por catálisis transcurre en la fase 2, cuando CO, NOx e HC atraviesan los canales del CTV e interactúan con su superficie. El primer bloque del CTV contiene mayor cantidad de Pt y Rh, por lo que las moléculas de NOx son las primeras en reaccionar, generando átomos libres de N que se combinan para formar N_2 . Las moléculas del gas pasan al segundo bloque con concentraciones mayores de Pt y Pd; así las moléculas de HC y CO se unen con O- para formar CO_2 y vapor de agua. Las tres reacciones químicas se llevan a cabo a altas temperaturas, lo que se traduce en una deficiencia importante en el diseño moderno del CTV, pues la conversión de gases es nula durante el arranque en frío (que se presenta en los minutos iniciales del viaje del vehículo) [10]. En ese sentido, los CTVs dependen de las temperaturas elevadas proporcionadas por el motor para cumplir su función de manera óptima. Así, a una temperatura de operación alta (hasta 800°C) y con la cantidad adecuada de oxígeno, el porcentaje de conversión de los gases de escape oscila entre el 90 y el 99.9 % [12].

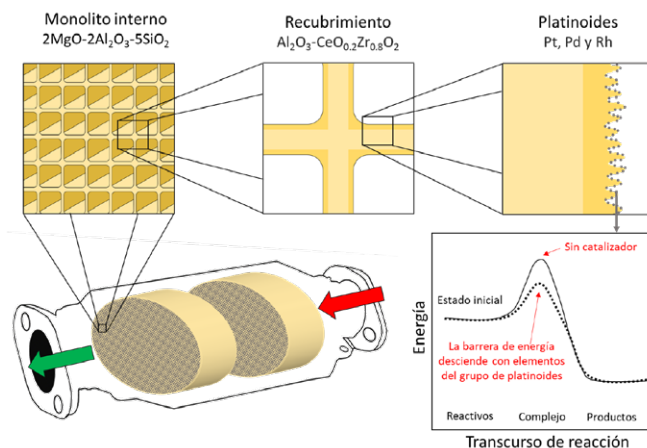


Figura 2. Estructura interna de un catalizador y gráfico de la participación de los platinoides en la disminución de energía de transición para la formación de productos durante el transcurso de una reacción (catálisis).

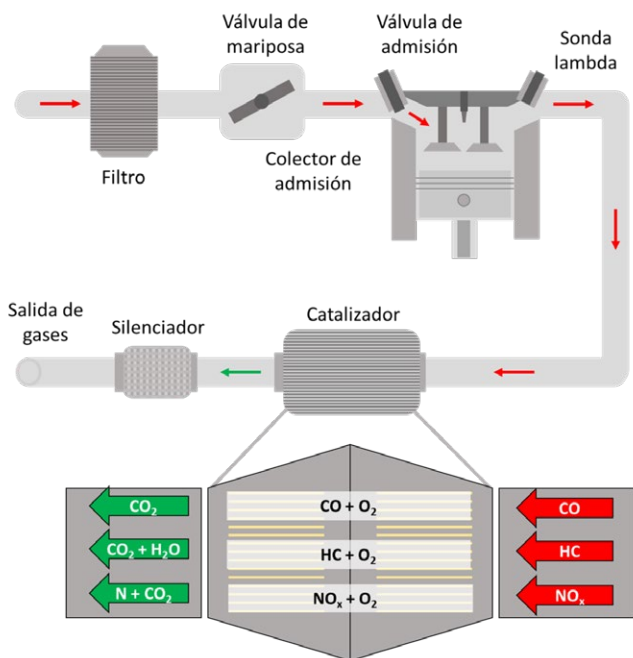


Figura 3. Diagrama esquemático del recorrido de gases en el sistema de escape.

BENEFICIOS PARA EL MEDIO AMBIENTE Y LA SALUD HUMANA

Sin el uso de los catalizadores de tres vías los gases de escape de los vehículos se liberarían directamente a la atmósfera. Como se mencionó previamente, en los motores de gasolina el proceso de combustión genera tres contaminantes principales: CO, HC y NO_x. Estos gases tienen un impacto grave e irreversible tanto en la salud humana como en los ecosistemas [12]. El monóxido de carbono, generado por el calor del motor durante el trabajo realizado, es un gas altamente venenoso, insípido, inodoro e incoloro. La exposición a este gas afecta el suministro de oxígeno a órganos y tejidos del cuerpo, lo que puede provocar la

muerte. El envenenamiento por CO causa dolor de cabeza, dolor en el pecho, debilidad, náuseas, vómitos, y altera el estado mental [13]. Por otro lado, los hidrocarburos no quemados son residuos de la gasolina y su incorporación a la atmósfera genera nubes dañinas de smog fotoquímico; además, algunos compuestos de HC producen irritación en los ojos, daño pulmonar y asma [14]. Por último, el óxido de nitrógeno se forma al combinar oxígeno y nitrógeno a altas temperaturas. Este gas es responsable de generar smog fotoquímico y lluvia ácida. En humanos, se vincula a una amplia gama de problemas respiratorios, como por ejemplo tos y dolor de garganta [15].

La emisión de estos tres gases se minimiza sustancialmente mediante el uso de convertidores catalíticos [3]. Se ha demostrado que la intensidad de las emisiones de los vehículos ha disminuido en factores de 2 a 100 durante las últimas décadas para cumplir con los estándares regulatorios. Los vehículos con CTV operando con la proporción de aire y combustible cercana a la estequiométrica y a una temperatura adecuada emiten una menor cantidad de estos tres gases, en comparación con los vehículos de gasolina sin convertidor catalítico (tabla 2) [12].

Tabla 2. Emisiones de CO, NO_x y HC provenientes de un automóvil sin y con catalizador de tres vías (modificada de [12]).

Gas de escape	Sin catalizador de tres vías (g/km)	Con catalizador de tres vías (g/km)
CO ₂	1.8	0.3
NO _x	0.00346	0.00068
HC	1.56	0.22

Los beneficios del uso del catalizador son claros. Sin embargo, el diseño del proceso de combustión en es-





tos vehículos genera un envejecimiento y, por tanto, una pérdida de eficiencia [16]. Además, su sobreuso produce niveles elevados de emisión de materia particulada como platinoides y óxido de zirconia [16, 17], por lo que se recomienda su reemplazo oportuno.

IMPORTANCIA DE SU USO Y REEMPLAZO

Un convertidor catalítico es uno de los dispositivos de tratamiento de gases de escape más efectivos. Sin embargo, al igual que cualquier otra pieza automotriz, puede dañarse o volverse menos eficiente. Las razones de la pérdida de eficiencia de conversión pueden incluir mezclas de aire/combustible no adecuadas, bujías y sensores de oxígeno defectuosos, y sincronización incorrecta del motor. Los CTV también pueden obstruirse total o parcialmente debido a fugas de anticongelante y aceite causadas por sellos de válvulas dañados, juntas defectuosas y pistones desgastados. Adicionalmente, algunos elementos químicos presentes en los aditivos de las gasolinas se pueden incorporar a la superficie catalítica [18]. En algunos casos, las unidades convertidoras se sobrecalientan derritiendo la estructura interna de panal [19]. Por otra parte, el empuje a alta presión del flujo de gases y el golpeteo generado por el mal estado de calles y carreteras puede producir su desintegración, liberando la capa catalizadora a la atmósfera [16]. En ese sentido, el sobreuso de un catalizador más allá de su vida útil producirá no solo la emisión de gases tóxicos, sino también de material particulado que igualmente tiene un efecto negativo sobre la salud y el medio ambiente [16, 19]. Los vehículos con un CTV dañado consumen

más gasolina, expulsan humo con mal olor por el escape y pueden tener fallas mecánicas en el motor, generando un impacto económico. El motor depende del flujo eficiente de los gases de escape para funcionar a un nivel óptimo. Los bloqueos en el convertidor catalítico pueden restringir el flujo de gases, afectando su rendimiento. Finalmente, la acción más eficaz para solucionar los problemas relacionados con los convertidores catalíticos es reemplazar las unidades más antiguas por otras nuevas. La vida útil de este componente varía entre los diferentes fabricantes y el uso, aunque suele estar entre 100.000 y 120.000 kilómetros. Para alargar la vida útil de los catalizadores al máximo se recomienda mantener en buen estado diversos elementos del motor como las bujías, el filtro de aire y el sensor de oxígeno.

CONCLUSIONES

Los convertidores catalíticos de tres vías son esenciales para reducir la emisión de gases de los vehículos con motor de gasolina a niveles reglamentarios. Su función es importante en términos ambientales ya que disminuyen hasta un 99% las emisiones de CO, HC y NOx. Su formulación y diseño actuales influyen en su rendimiento y eficiencia de conversión de gases. Sin embargo, su uso prolongado genera transformaciones en la composición original, causando la pérdida de sus propiedades catalíticas. Sumado a esto, el sobreuso de los CTVs conlleva al desgaste estructural y la posterior liberación de partículas sólidas. Por lo tanto, se recomienda su reemplazo oportuno para evitar la emisión de gases tóxicos y de material particulado a la



atmósfera. Finalmente, este trabajo es una guía útil para obtener una mejor comprensión del funcionamiento de los convertidores catalíticos como dispositivos esenciales para la disminución de la contaminación ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TransportPolicy.net. "Topics: Emissions standards." (Revisado el 14 de agosto del 2022).
- [2] A. M. D. L. I. AUTOMOTRIZ, A. G. D. D. FEDERAL, G. D. E. DE MEXICO, and P. F. D. P. AL AMBIENTE, "NOM-042-SEMARNAT-2003: Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Emisión de Hidrocarburos Totales o no Metano, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno y Partículas Provenientes del Escape de los Vehículos Automotores Nuevos Cuyo Peso Bruto Vehicular no Exceda los 3,857."
- [3] S. Dey and N. S. Mehta, "Automobile pollution control using catalysis," *Res Environ Sustain*, vol. 2, p. 100006, 2020/12/01/2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100006>.
- [4] R. J. Farrauto, M. Deeba, and S. Alerasool, "Gasoline automobile catalysis and its historical journey to cleaner air," *Nature Catalysis*, vol. 2, no. 7, pp. 603-613, 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0312-9>.
- [5] L. Hegedus and J. C. Summers, "Platinum-rhodium catalyst for automotive emission control," ed: Google Patents, 1978.
- [6] S. Dey and G. C. Dhal, "Cerium catalysts applications in carbon monoxide oxidations," *Mat Sci Energy Technol*, vol. 3, pp. 6-24, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.09.003>.
- [7] B. M. Reddy, A. Khan, P. Lakshmanan, M. Aouine, S. Loridant, and J.-C. Volta, "Structural characterization of nanosized CeO₂-SiO₂, CeO₂-TiO₂, and CeO₂-ZrO₂ catalysts by XRD, Raman, and HREM techniques," *J Phys Chem B* vol. 109, no. 8, pp. 3355-3363, 2005, doi: <https://doi.org/10.1021/jp045193h>.
- [8] T. Montini, M. Melchionna, M. Monai, and P. Fornasiero, "Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials," *Chem Rev*, vol. 116, no. 10, pp. 5987-6041, 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00603>.
- [9] M. Yao, R. Baird, F. Kunz, and T. Hoost, "An XRD and TEM investigation of the structure of alumina-supported ceria-zirconia," *J Catal* vol. 166, no. 1, pp. 67-74, 1997, doi: <https://doi.org/10.1006/jcat.1997.1504>.
- [10] V. Gupta, K. Chaturvedi, M. Dubey, and N. M. Rao, "Catalytic converters for treatment of exhaust gas emission in automobiles: a review," *Int J Scient Eng Res*, vol. 8, no. 2, pp. 95-99, 2017.
- [11] R. Zanella, "Aplicación de los nanomateriales en catálisis," *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, vol. 7, no. 12, pp. 66-82, 2014.
- [12] E. Kritsanaviparkporn, F. M. Baena-Moreno, and T. R. Reina, "Catalytic converters for vehicle exhaust: fundamental aspects and technology overview for newcomers to the field," *Chemistry*, vol. 3, no. 2, pp. 630-646, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/chemistry3020044>.
- [13] C. Mattiuzzi and G. Lippi, "Worldwide epidemiology of carbon monoxide poisoning," *Hum Exp Toxicol*, vol. 39, no. 4, pp. 387-392, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0960327119891214>.
- [14] K. Sun, Y. Song, F. He, M. Jing, J. Tang, and R. Liu, "A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics," *Sci Total Environ*, vol. 773, p. 145403, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403>.
- [15] B. P. Barrick, U. Jain, and M. M. Herr, "Environmental and health impacts of nitrous oxide in current medical practice," *ASA Monitor*, vol. 84, no. 4, pp. 22-25, 2020.
- [16] D. Meza-Figueroa, M. Pedroza-Montero, M. Barboza-Flores, S. Navarro-Espinoza, R. Ruiz-Torres, A. Robles-Morúa, F. Romero, B. Schiavo, B. González-Grijalva, and M. Acosta-Elias, "Identification of refractory zirconia from catalytic converters in dust: An emerging pollutant in urban environments," *Sci Total Environ*, vol. 760, p. 143384, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143384>.
- [17] M. Omrani, M. Goriaux, Y. Liu, S. Martinet, L. Jean-Soro, and V. Ruban, "Platinum group elements study in automobile catalysts and exhaust gas samples," *Environ Poll*, vol. 257, p. 113477, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113477>.
- [18] S. Y. Christou, S. García-Rodríguez, J. L. G. Fierro, and A. M. Efstathiou, "Deactivation of Pd/CeO₂/ZrO₂ model three-way catalyst by P, Ca and Zn deposition," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 111, pp. 233-245, 2012.
- [19] S. Navarro-Espinoza, D. Meza-Figueroa, R. Guzmán, A. Duarte-Moller, H. Esparza-Ponce, F. Paz-Moreno, B. González-Grijalva, O. Álvarez-Bajo, B. Schiavo, D. Soto-Puebla, and M. Pedroza-Montero, "Release of Nanoparticles in the Environment and Catalytic Converters Ageing," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 12, p. 3406, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/nano11123406>.

Cómo citar este artículo:

Navarro Espinoza, S., Meza Figueroa, D. M., Pedroza Montero, M. R., & Soto-Puebla, D. (2022). Catalizadores de tres vías: historia, funcionamiento y ventajas ambientales. *EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.240>

