



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TULANCINGO  
Organismo Descentralizado de la Administración Pública Estatal

## ÁREA ELECTROMECAÁNICA INDUSTRIAL

---

# MEMORIA

**“RESULTADOS DE INCORPORAR UN GENERADOR  
HHO EN LAS EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO  
MEDIDOS EN RUTA Y DINAMÓMETRO DE UN  
VEHÍCULO ATTITUDE 2008 AUTOMÁTICO”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE TÉCNICO  
SUPERIOR UNIVERSITARIO EN :

**NANOTECNOLOGÍA  
ÁREA MATERIALES**

**P R E S E N T A**

*ESAUL ALEJANDRO ALFARO CANALES*

ASESOR EXTERNO:  
DR. JORGE ALFONSO GARCÍA MACEDO

ASESOR ACADÉMICO:  
DR. PEDRO ALBERTO RAMÍREZ ORTEGA

INSTITUCIÓN:  
INSTITUTO DE FÍSICA - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

GENERACIÓN

2019 – 2021

AGOSTO-2021



## LIBERACIÓN DE MEMORIA

Fecha: 10 de Septiembre de 2021

Los que suscriben asesores y director de carrera del (os) alumno (s):

**ESAUL ALEJANDRO ALFARO CANALES**

De la carrera de:

**TÉCNICO SUPERIOR UNIVERSITARIO EN NANOTECNOLOGÍA**

En la realización de la memoria con el proyecto denominado:

**RESULTADOS DE INCORPORAR UN GENERADOR HHO EN LAS EMISIONES DE ÓXIDOS DE  
NITRÓGENO MEDIDOS EN RUTA Y DINAMÓMETRO DE UN  
VEHÍCULO ATTITUDE 2008 AUTOMÁTICO**

En la institución:

**INSTITUTO DE FÍSICA - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Manifestamos con base en la revisión de la memoria y entrega de proyecto, nuestra conformidad con el contenido y funcionamiento, por lo que, no existe inconveniente para autorizar la impresión de la memoria y continuar con el proceso de recepción profesional.

Asesor Académico

Dr. Pedro Alberto Ramírez Ortega

Nombre y firma

Asesor Externo

Dr. Jorge Alfonso García Macedo

Nombre y firma

Director de Carrera

Dr. Luis García Lechuga

Nombre y firma

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a Dios, por darme la fortaleza de continuar con mis estudios a pesar de las circunstancias, por permitirme la diligencia de organizar mis tiempos de trabajo y principalmente por guiarme desde el inicio de la carrera y permitirme graduarme como técnico universitario.

Durante el transcurso de esta formación académica existieron diversos conflictos que no hubiera logrado superar sin mi familia, agradezco con toda la determinación de mi persona a mi padre, mi madre, mi hermana y D. Xoxo.

Agradezco a mis catedráticos, por todo el conocimiento transmitido, la experiencia que han compartido y por sus consejos que han hecho de mí una mejor persona tanto en el ámbito social como académico.

Agradezco a mi institución formativa la Universidad tecnológica de Tulancingo por toda la información brindada para nuestra formación académica y de igual manera agradezco al Instituto de Física de la UNAM por tan magnifico beneficio de permitirme hacer mis estadías bajo el cargo de la institución.

Agradezco a mi asesor y guía de estadía Doctor Jorge Alfonso García Macedo por haberme permitido llevar a cabo mis estadías técnicas bajo su diligencia. Le agradezco por su tiempo y por los conocimientos transmitidos.

Sin olvidarme, agradezco a todos y cada una de las personas quienes de alguna forma estuvieron involucrados en este proceso de formación para mis estudios de técnico, a mis compañeros y amigos, quienes me brindaron cariño, comprensión, apoyo y sobre todo su sincera y valiosa amistad y me hicieron ser una mejor persona.

## **RESUMEN**

Con un ámbito tecnológico y en busca de nuevas alternativas sustentables que optimicen el funcionamiento de un automóvil y sean amigables con el medio ambiente, así como también generen un menor costo en mantenimiento a largo plazo en el automóvil además de que al mismo tiempo se genere un menor impacto ambiental al reducir la contaminación por gases tóxicos se vio impulsada la investigación acerca del generador de hidrogeno y su efecto con los catalizadores de los automóviles. En el presente proyecto se redacta la información recopilada tras una investigación acerca de las ventajas, desventajas y mejoras que se ven implicadas en un automóvil al añadirsele un generador de gas HHO, se muestran detalladamente todas las pruebas experimentales y se comparan los resultados obtenidos.

## **SUMMARY**

With a technological scope and in searching of new sustainable alternatives that optimize the operation of a car that becomes environmentally friendly, it was driven the research about the hydrogen generator effect on a car together with the catalysts. This device generates also a lower cost in long-term maintenance in the car and at the same time it produces environmental impact by reducing pollution by toxic gases. In the present project the information gathered after an investigation about the advantages, disadvantages and improvements that are involved in a car when a HHO gas generator is added to it, all the experimental tests are shown in detail and the obtained results are compared.

## ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                     | I   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                      | II  |
| NOMENCLATURA.....  | III |
| INTRODUCCIÓN .....   | 1   |
| CAPITULO 1. ANTECEDENTES.....                              | 2   |
| 1.1.- Historia de la UNAM .....                            | 2   |
| 1.2.- Instituto de Física de la UNAM .....                 | 2   |
| 1.3- Misión y visión.....                                  | 2   |
| 1.4.- Trabajos previos.....                                | 3   |
| 1.5- Planteamiento del problema .....                      | 3   |
| 1.6.- Objetivo general .....                               | 4   |
| 1.7.- Objetivos específicos .....                          | 4   |
| 1.8.- Meta.....  | 4   |
| CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO. ....                            | 5   |
| 2.1 Nanotecnología.....                                    | 5   |
| 2.1.1 Antecedentes de la nanotecnología .....              | 5   |
| 2.1.2 Definición .....                                     | 6   |
| 2.1.3 Nanomateriales .....                                 | 6   |
| 2.2 Sistema de escape automotriz.....                      | 6   |
| 2.2.1 Estructura del sistema de escape automotriz.....     | 7   |
| 2.3 Convertidor catalítico automovilístico.....            | 7   |
| 2.3.1 Partes del catalizador .....                         | 8   |
| 2.3.2 Reacciones químicas .....                            | 9   |
| 2.4 Gases contaminantes emitidos por los automóviles ..... | 10  |
| 2.4.1 Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ).....          | 10  |
| 2.4.2 Monóxido de carbono (CO).....                        | 10  |
| 2.4.3 Hidrocarburos (HC) .....                             | 11  |
| 2.5 Norma regulatoria de emisiones automovilísticas .....  | 11  |
| 2.6 Generador de hidrogeno .....                           | 12  |
| 2.6.1 Gas hidroxu u oxihidrogeno HHO .....                 | 13  |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.6.2 Método de obtención.....  | 13        |
| 2.6.3 Mezcla aire-hidrogeno .....   | 13        |
| 2.7 Hidrogeno .....   | 14        |
| 2.7.1 Historia del hidrogeno .....  | 14        |
| 2.7.2 Características del hidrogeno.....  | 15        |
| 2.7.3 Propiedades del hidrógeno .....   | 15        |
| 2.7.4 Producción de hidrogeno.....  | 18        |
| 2.7.5 Ciclo del hidrogeno .....   | 18        |
| 2.8 Electrolisis .....  | 18        |
| 2.9 Descarbonización del motor .....  | 19        |
| <b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>   | <b>20</b> |
| 3.1 Cronograma de actividades.....  | 20        |
| 3.2 Estrategia experimental .....   | 21        |
| 3.3 Pruebas preliminares para el análisis del comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno en experimentos en ruta y dinamómetro sin generador de hidrogeno.....                                      | 23        |
| 3.3.1 Prueba dinámica preliminar con ambos catalizadores.....   | 23        |
| 3.3.2 Prueba estática preliminar con ambos catalizadores .....  | 24        |
| 3.4 Pruebas finales para el análisis del comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno en experimentos dinámicos y estáticos con y sin generador de hidrogeno y con ambos catalizadores añadidos. .... | 28        |
| 3.4.1 Prueba 1 dinámica de referencia con ambos catalizadores. ....   | 28        |
| 3.4.2 Prueba 2 dinámica con la implementación de HHO y sin HHO. ....  | 30        |
| 3.4.3 Prueba 3 semifinal en ruta con la implementación de HHO y sin HHO. ....   | 33        |
| 3.5 Prueba ralentí con la implementación de HHO y sin HHO. ....   | 35        |
| <b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS. ....</b>  | <b>37</b> |
| <b>Conclusiones.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>Referencias .....</b>  | <b>39</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| NUMERO DE<br>FIGURA | NOMBRE DE LA FIGURA   | PAGINA DE<br>LA FIGURA |
|---------------------|---|------------------------|
| <i>Figura 2.1</i>   | <i>Pintura "músicos y bailarines".</i>  | <i>Pág. 5</i>          |
| <i>Figura 2.2</i>   | <i>Diagrama de bloques de un sistema de escape.</i>   | <i>Pág. 7</i>          |
| <i>Figura 2.3</i>   | <i>Componentes principales de la cámara del catalizador.</i>  | <i>Pág. 8</i>          |
| <i>Figura 2.4</i>   | <i>Proceso químico interno del catalizador.</i>   | <i>Pág. 9</i>          |
| <i>Figura 2.5</i>   | <i>Ejemplo de generador.</i>  | <i>Pág. 13</i>         |
| <i>Figura 2.6</i>   | <i>Historia del hidrógeno.</i>  | <i>Pág. 15</i>         |
| <i>Figura 2.7</i>   | <i>Ciclo del hidrogeno.</i>   | <i>Pág. 18</i>         |
| <i>Figura 3.1</i>   | <i>Analizador de 5 gases con impresora.</i>   | <i>Pág. 21</i>         |
| <i>Figura 3.2</i>   | <i>Análisis dinámico de las emisiones de NOx sin catalizadores.</i>   | <i>Pág. 22</i>         |
| <i>Figura 3.3</i>   | <i>Análisis de las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas con ambos catalizadores añadidos.</i>                   | <i>Pág. 23</i>         |
| <i>Figura 3.4</i>   | <i>Análisis de las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas con ambos catalizadores añadidos en prueba estática</i> | <i>Pág. 24</i>         |
| <i>Figura 3.5</i>   | <i>Comparación preliminar de NOx en ruta con sensores del taller.</i>   | <i>Pág. 26</i>         |
| <i>Figura 3.6</i>   | <i>Comparación preliminar de NOx en ruta con sensores nuestros.</i>   | <i>Pág. 27</i>         |
| <i>Figura 3.7</i>   | <i>Resultados de referencia sin HHO</i>   | <i>Pág. 28</i>         |
| <i>Figura 3.8</i>   | <i>Resultados de referencia con HHO</i>   | <i>Pág. 29</i>         |
| <i>Figura 3.9</i>   | <i>Comparación de resultados sin HHO y con HHO.</i>   | <i>Pág. 30</i>         |
| <i>Figura 3.10</i>  | <i>Prueba semifinal para la comparación de NOx: Sin HHO.</i>  | <i>Pág. 31</i>         |
| <i>Figura 3.11</i>  | <i>Prueba semifinal para la comparación de NOx: Con HHO.</i>  | <i>Pág. 32</i>         |
| <i>Figura 3.12</i>  | <i>Prueba semifinal comparación de NOx: Con y Sin HHO</i>   | <i>Pág. 33</i>         |
| <i>Figura 3.13</i>  | <i>Análisis prueba tres sin HHO</i>   | <i>Pág. 34</i>         |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
| <i>Figura 3.14</i> | <i>Análisis prueba tres con HHO</i>                  | <i>Pág. 34</i> |
| <i>Figura 3.15</i> | <i>Comparación prueba tres de NOx con y sin HHO.</i> | <i>Pág. 35</i> |
| <i>Figura 3.16</i> | <i>Prueba de NOx en ralentí.</i>                     | <i>Pág. 36</i> |

## ÍNDICE DE TABLAS

| NUMERO DE<br>LA TABLA | NOMBRE DE LA TABLA  | PAGINA DE<br>LA TABLA |
|-----------------------|---|-----------------------|
| <i>Tabla 2.1</i>      | <i>Límites máximos permisibles de emisiones de contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores que circulan año modelo 2006 y posteriores.</i> | <i>Pág. 12</i>        |
| <i>Tabla 2.2</i>      | <i>Propiedades físicas del hidrógeno.</i>   | <i>Pág. 15</i>        |
| <i>Tabla 2.3</i>      | <i>Propiedades químicas del hidrógeno.</i>  | <i>Pág. 17</i>        |
| <i>Tabla 3.1</i>      | <i>Cronograma de actividades.</i>   | <i>Pág. 20</i>        |
| <i>Tabla 3.2</i>      | <i>Promedios de pruebas de NOx para factores</i>  | <i>Pág. 25</i>        |
| <i>Tabla 3.3</i>      | <i>Promedios y factores de conversión entre sensores de taller y nuestros con ruta para NOx</i>   | <i>Pág. 25</i>        |
| <i>Tabla 4.1</i>      | <i>Comparación de resultados con generador de hidrogeno.</i>  | <i>Pág. 37</i>        |



## NOMENCLATURA

| ABREVIACIÓN     | SIGNIFICADO               |
|-----------------|---------------------------|
| CO              | Monóxido de carbono       |
| NO <sub>x</sub> | Óxidos de nitrógeno       |
| HC              | Hidrocarburos no quemados |
| IF              | Instituto de física       |
| nm              | Nanómetros                |
| Pt              | Platino                   |
| Pd              | Paladio                   |
| Rh              | Rodio                     |
| N <sub>2</sub>  | Nitrógeno                 |
| O <sub>2</sub>  | Oxígeno                   |
| Rxn             | Reacción                  |
| ppm             | Partes por millón         |
| μmol            | Micromoles                |
| Mol             | Moles                     |
| Cmol            | Centimol                  |
| HHO             | Gas hidroxí               |
| rpm             | Revoluciones por minuto   |

## INTRODUCCIÓN

Investigaciones anteriores evaluadas en laboratorio informan sobre el efecto de la adición de gas hidroxígeno (HHO) en las emisiones del motor de gasolina, resaltando entre los principales resultados que la implementación de un generador de hidrógeno resulta conveniente en la reducción de los NO<sub>x</sub>, CO y HO, ya que se ven reducidos en un 15%, 18% y 34%. [1].

Uno de los principales factores que repercuten en el medio ambiente son los gases contaminantes. En la actualidad el incremento en las autopistas y rutas automovilísticas a nivel mundial es impresionante, y por tal motivo la expansión de la industria automovilística resalta enormemente. [2]

La contaminación ambiental que producen los vehículos de motor esta principalmente originada por la emisión de gases como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos no quemados entre otros más. Uno de los principales métodos de reducción de emisiones está en la implementación de catalizadores en el sistema de escape automotriz además de la propuesta investigada en este documento que es la posibilidad de implementar un generador de hidrógeno para aumentar la combustión de la gasolina y producir un menor índice de emisiones contaminantes expulsados del vehículo.

En el presente trabajo se pretende justificar y demostrar la relevancia que puede tener el uso de un generador de hidrógeno adicionado al sistema de escape automotriz, también se identifican los cambios que puede generar el uso de un catalizador impregnado con nanopartículas de platino y rodio al 2% además de la comparación con un catalizador impregnado con nanopartículas de oro, todo con la intención de medir el comportamiento de los óxidos de nitrógeno esperando una reducción de estos.

## **CAPITULO 1. ANTECEDENTES.**

### **1.1.- Historia de la UNAM**

21 de septiembre de 1551, fecha en que se expide la Cedula de creación de la Real y Pontificia Universidad de México.

De primera instancia, el modelo académico fue organizado de manera similar a las universidades de Europa.

Actualmente el modelo moderno de la Universidad Nacional Autónoma de México son resultado del 11 de febrero de 1881, cuando fue presentado el proyecto de organización a cargo de Justo Sierra en la cámara de diputados.

Dicho proyecto incluía como partes integrantes de la institución a las escuelas de bellas artes, de comercio, de ciencias políticas, de ingeniería, de medicina y a la escuela normal.

No fue sino hasta el 30 de marzo de 1907 cuando el presidente aprobó el proyecto y se abrió la Universidad Nacional. [3]

### **1.2.- Instituto de Física de la UNAM**

El Instituto de Física de la UNAM fue creado en el año de 1938, fue evolucionando con el paso de los años hasta convertirse en una de las instituciones académicas más importantes de México.

Actualmente el Instituto de Física (IF) realiza una gran contribución a el área de investigación con más de 6100 artículos publicados, los cuales en su mayoría han sido comunicados por medio de revistas de circulación internacional. [4]

### **1.3- Misión y visión.**

Misión. Impartir educación superior para formar profesionistas, investigadores, profesores universitarios y técnicos útiles a la sociedad; organizar y realizar investigaciones, principalmente acerca de las condiciones y problemas nacionales, y extender con la mayor amplitud posible los beneficios de la cultura.

Visión. Mantener el liderazgo, la autonomía, el rigor académico, el carácter laico y la pluralidad, como la institución científica y cultural más importante del país. Reconocida en el mundo como una Universidad Nacional de excelencia que honra su pasado, responde al presente y mira el futuro como el proyecto cultural de mayor relevancia en México. [5]

#### **1.4.- Trabajos previos**

Para la siguiente investigación se consideraron fuentes en las cuales abarcaba información acerca de la innovación de los generadores de hidrogeno en los automóviles.

Los trabajos previos a este documento detallan la elaboración de catalizadores modificados, de pruebas dinámicas para la recolección de información sobre las emisiones de gases.

También se consideraron trabajos anteriores a este que específicamente involucren todas las mejoras, deficiencias o modificaciones que puede sufrir un automóvil al verse potenciado su sistema de escape automotriz con un generador de hidrogeno.

#### **1.5- Planteamiento del problema**

Hoy en día no es un secreto que la contaminación por emisiones de gases afecta directamente en nuestra atmosfera, siendo este un problema social que afecta en muchas medidas y relaciones a toda una comunidad.

El principal problema que se desea resolver con esta investigación es sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno que generan los automóviles y como se ven afectadas al incluirse un generador de hidrogeno en un auto.

También el consumo de gas combustible suele ser un problema en el ámbito económico y al verse estrechamente relacionado con el enfoque de la problemática de este proyecto se considera un problema más a mejorar.

### **1.6.- Objetivo general**

Determinar los cambios generados en un automóvil tras la adición de un generador de hidrogeno en su sistema de escape automotriz para la reducción de los gases contaminantes emitidos por los automóviles.

### **1.7.- Objetivos específicos**

- ❖ Identificar si existe un porcentaje en la disminución de óxidos de nitrógeno.
- ❖ Detectar las ventajas y desventajas que implica el uso de un generador de hidrogeno.
- ❖ Analizar los catalizadores involucrados (Mixto, comercial y sin catalizador).

### **1.8.- Meta**

Resaltar las principales ventajas y características generadas de la implementación de un generador de hidrogeno a un automóvil, logrando detectar los cambios en las emisiones de óxidos de nitrógeno.

## CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Nanotecnología

La tecnología avanza a pasos inmensos, y como las necesidades y niveles de exigencia cada vez son mayores han generado una nueva vertiente en el campo de la tecnología, un área en la cual los elementos ya no se comportan como se está acostumbrado a ellos, un área en la cual las posibilidades de innovación y optimización aumentaron, esa área es la nueva ciencia, la ciencia del ahora, la nanotecnología.

Esta nueva ciencia multidisciplinaria abre nuevos horizontes de investigación, ya que su enfoque puede ser explotado en la mayoría de las áreas. Esta nueva ciencia es la manipulación de la materia a niveles nanométricos. [6]

#### 2.1.1 Antecedentes de la nanotecnología

Aunque el término nanotecnología tiene un auge desde hace menos de 65 años, de manera inconsciente las culturas prehispánicas manipulaban la materia a niveles nanométricos, entre los casos más destacados del uso de la nanotecnología en la antigüedad está el del color azul maya, pigmento elaborado por las culturas mesopotámicas. [7]



*Figura 2.1. Pintura "músicos y bailarines".*

*Mural prehispánico de Bonampak  
perteneciente a la cultura maya. [7]*

Los datos más resaltantes de la iniciación de esta nueva ciencia se originaron cuando en 1959 el físico norteamericano Richard Feynmann dio a la comunidad de científicos una conferencia (actualmente cita obligada) titulada: *There's Plenty of Room at the Bottom*. Fue en esta conferencia cuando la extraordinaria idea de manipular a los materiales a nivel atómico y molecular deslumbró a toda una nueva comunidad científica.

### **2.1.2 Definición**

La nanotecnología es una ciencia multidisciplinar que involucra los fenómenos que ocurren en el intervalo de tamaño que van de los 100 nm a menos.

La primera vez que se utilizó el término “nanotecnología” fue cuando Norio Taniguchi lo menciono haciendo referencia a él como el término en el cual existe la capacidad de manipular a los materiales en un tamaño nanométrico. [8]

### **2.1.3 Nanomateriales**

Se le conoce como nanomaterial a una estructura contenedora de partículas cuyas dimensiones rondan del nanómetro ( $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) a 100 nanómetros.

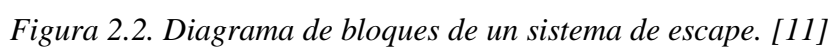
“La Comisión Europea adoptó en 2011 una recomendación sobre la definición de nanomaterial, entendiéndose como tal un material natural, accidental o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado, y en el que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más de las dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre un nanómetro y 100 nanómetros. En casos específicos y cuando se justifique por preocupaciones de medio ambiente, salud, seguridad o competitividad, el umbral de la granulometría numérica del 50 % puede sustituirse por un umbral comprendido entre el 1 % y el 50 %.” [9]

## **2.2 Sistema de escape automotriz**

Debido a la combustión generada por el motor, el automóvil genera ciertos gases que son necesarios de expulsar de los sistemas y para ello debe existir un mecanismo adecuada para el

El sistema de escape se encarga de la recolección de todos los gases contaminantes generados por el proceso de combustión, el principal objetivo de dicho sistema es evitar al máximo posible la expulsión de gases perjudiciales al entorno. [10]

Todo sistema de escape está conformado por un colector de escape conectado desde el motor hacia el exterior, de un tubo de escape acoplado a el tipo de automóvil. El tubo de escape está conformado por un catalizador y un silenciador en la parte final del sistema.



Un catalizador automovilístico cumple la función de acelerar las reacciones químicas generadas durante los procesos de combustión y descarbonización del automóvil.

Existen diversos tipos de catalizadores, para fines de este proyecto se considerarán como catalizadores comerciales a todos aquellos que desde fábrica han sido instalados, y se

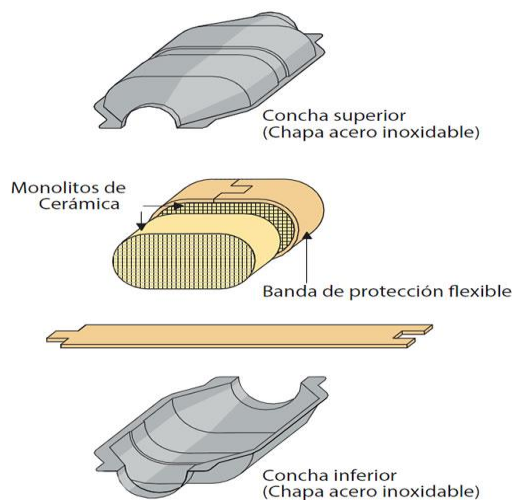


considerará como catalizador mixto al cual será modificada al impregnarle ciertas partículas. [12]

### 2.3.1 Partes del catalizador

La guía automotriz de costa rica describe las partes del catalizador de la siguiente manera [10] exteriormente el catalizador es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa-pantalla metálica antitérmica, igualmente inoxidable, que protege los bajos del vehículo de las altas temperaturas alcanzadas. En su interior contiene un soporte cerámico o monolito, de forma oval o cilíndrica, con una estructura de múltiples celdillas en forma de panal, con una densidad de éstas de aproximadamente 450 celdillas por cada pulgada cuadrada (unas 70 por centímetro cuadrado). Su superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos nobles metálicos, tales como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que permiten la función de oxidación, y Rodio (Rh), que interviene en la reducción.

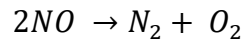
Estos metales preciosos actúan como elementos activos catalizadores; es decir, inician y aceleran las reacciones químicas entre otras sustancias con las cuales entran en contacto, sin participar ellos mismos en estas reacciones. Los gases de escape contaminantes generados por el motor, al entrar en contacto con la superficie activa del catalizador son transformados parcialmente en elementos inocuos no polucionantes. [12]



*Figura 2.3. Componentes principales de la cámara del catalizador. [10]*

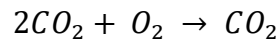
### 2.3.2 Reacciones químicas

Las reacciones químicas que se producen en el catalizador son de primera instancia la disociación por pares de los  $\text{NO}_x$ , estos pasan a ser nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ) en temperaturas por encima de  $500^\circ\text{C}$ , la reacción se muestra a continuación (Rxn.1).



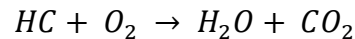
(Rxn.1)

Después de esta reacción el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), los hidrocarburos no quemados (HC), el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y el nitrógeno vuelven a reaccionar como se muestra en la reacción (Rxn.2)



(Rxn.2)

El oxígeno y el monóxido de carbono se convierten en dióxido de carbono (Rxn.3).



(Rxn.3)

Los hidrocarburos junto con el oxígeno se asocian en vapores de agua y dióxido de carbono.

El siguiente esquema muestra el proceso químico que se desarrolla dentro del catalizador.

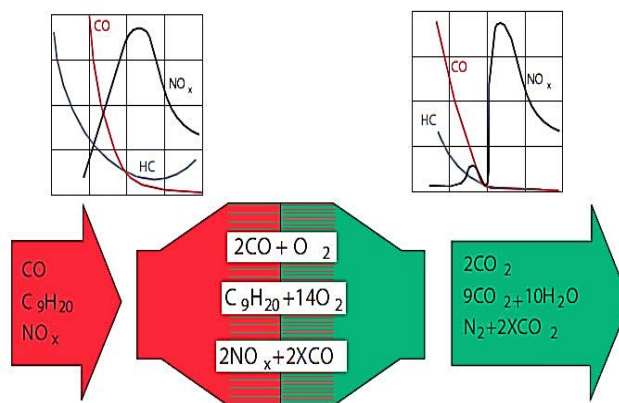


Figura 2.4. Proceso químico interno del catalizador. [10]

El catalizador contiene dos bloques de cerámica, cada bloque conformado de miles de micro conductos cuyos laterales están bañados de platino, rodio y paladio. Estos metales unidos tienen la capacidad de hacer reaccionar a los gases tóxicos y volver a combinarlos para crear gases inofensivos para la salud, todo esto sin oxidarse o alterarse en su composición.

## **2.4 Gases contaminantes emitidos por los automóviles**

Según Heywood [13], los gases de mayor concentración emitida durante los procesos de expulsión del sistema de escape automotriz son los óxidos de nitrógeno, algunos hidrocarburos que no alcanzaron el proceso de combustión y el monóxido de carbono.

### **2.4.1 Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Los óxidos de nitrógeno conforman un grupo de gases derivados del nitrógeno, se constituyen por los NO y los NO<sub>2</sub>. Por lo que cuando se hace referencia al término Óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, nos referimos a un grupo que engloba ambas sustancias.

El Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es por lo regular el contaminante principal de los NO<sub>x</sub> se da como subproducto de una combustión generada en el automóvil.

Según Pérez [14] los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) contribuyen a la formación de ozono y la lluvia ácida, además de afectar a la calidad del agua.

“La principal fuente emisora de óxidos de nitrógeno a la atmósfera urbana son los vehículos y en menor medida instalaciones de combustión como las calefacciones” [15]

### **2.4.2 Monóxido de carbono (CO)**

Este tipo de gas es considerado uno de los más contaminantes para la atmósfera, se manifiesta en forma de gas incoloro e inodoro que es generado tras la combustión incompleta de materia orgánica.

Actualmente se les considera como una de las mayores fuentes de contaminación por monóxidos de carbono a la industria automovilística esto a causa del tipo de combustible empleado.

Debido a las propiedades fisicoquímicas del monóxido de carbono, tiene como efecto la reducción de oxigenación en la sangre llegando a generar diversos problemas de salud en una sociedad. [16]

### **2.4.3 Hidrocarburos (HC)**

Actualmente los hidrocarburos corresponden a un gran porcentaje de contaminación ambiental. Los hidrocarburos como el metano, propano y butano son los más empleados para las estufas, y por otro lado son los productos resultantes de los hidrocarburos no quemados formados como subproducto de la combinación con los óxidos de nitrógeno al existir una presencia de luz.

Actualmente hay estudios en los cuales se demuestran que los HC generan ozono a nivel del suelo “Aunque no todos los hidrocarburos son tóxicos, existen evidencias de que algunos de ellos, como el benceno, provocan cáncer en las personas. Sin embargo, quizá su mayor papel en el ambiente es que producen sustancias carbonadas y exceso de ozono aumentando el efecto invernadero” [16].

## **2.5 Norma regulatoria de emisiones automovilísticas**

Las investigaciones realizadas durante el proceso de este proyecto se basan en el documento expedido el 5 de septiembre del 2017 emitido por la secretaria Oficial de la Federación (SEGOB) el cual se identifica como “Norma Oficial Mexicana NOM-167-2017”, documento del cual se basan todos los estándares de límites permisibles para emisiones contaminantes generadas por los vehículos automotores circulantes en las entidades de México.

Dicho documento se encarga de regular todas las emisiones generadas por los vehículos, entre ellas incluye las emisiones de:

- Hidrocarburos (HC)
- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Oxígeno

Y finalmente genera un estándar de adecuación aire/combustible “Lambda” para un mayor control de las emisiones

Para objeto de esta investigación solo se enfocará en los tres principales gases contaminantes que son los hidrocarburos no quemados, los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono. [17]

Dichos límites de los gases a considerar se encuentran en la siguiente tabla:

*TABLA 2.1 Límites máximos permisibles de emisiones de contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores que circulan año modelo 2006 y posteriores.*

| AÑO<br>MODELO       | Hidrocarburos<br>(HC) $\mu\text{mol/mol}$<br>(ppm) | Monóxido de<br>Carbono (MO)<br>$\text{cmol/mol}$ (%) | Óxidos de<br>nitrógeno<br>(NO <sub>2</sub> ) (1)<br>$\mu\text{mol/mol}$<br>(ppm) | Oxígeno<br>(O <sub>2</sub> )<br>$\text{cmol/mol}$<br>(%) | Factor<br>Lambda |
|---------------------|--|--|--|--|------------------|
|                     |  |  |  |  | 1.03             |
| 2006 y<br>posterior | 80   | 0.4  | 250  | 0.4  |                  |

**NOTA:** Tabla obtenida del diario oficial de la federación mexicana [17].

## 2.6 Generador de hidrogeno

Se le denomina un generador de hidrogeno a un sistema de inyección de gas HHO a un motor, generando en el motor una estimulación eficiente para el proceso de combustión que culmina en una mejoría energética, siendo capaz de reducir los gases contaminantes. [18]



*Figura 2.5 Ejemplo de generador  
de hidrógeno. [19]*

### **2.6.1 Gas hidroxi u oxihidrogeno HHO**

El gas HHO es una mezcla en partes 2:1 de hidrogeno diatómico y oxígeno. El gas HHO presenta la particularidad de ser un gas altamente inflamable además de tener una energía mínima de ignición, características que lo hacen apropiado para mejorar el proceso de combustión dentro del motor de un auto y generar una menor emisión de gases. [20]

### **2.6.2 Método de obtención**

El método de obtención parte del proceso de electrólisis del agua el proceso de electrólisis para la obtención del gas hidroxi se basa principalmente en la descomposición de las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno esta descomposición se da principalmente mediante la circulación de una corriente eléctrica dada en el agua. Para una mayor optimización en la producción del gas hidroxi es necesario contemplar una modificación en el pH del agua esto se da mediante la adición de un ácido o una base. [20]

### **2.6.3 Mezcla aire-hidrogeno**

Savaranan y colaboradores [21], [22] investigaron experimentalmente la mezcla de aire hidrógeno en los motores de diésel dándose cuenta de que el añadir hidrógeno al aire mejoraba

la eficiencia de rendimiento hasta en un 27,9% con una carga constante esto solamente implicando una adición de un 30% de hidrógeno.

## **2.7 Hidrogeno**

El hidrogeno viene del latín “hydrogenium”. “Hydrogenium” viene de dos vocablos griegos “hydor” que significa agua y “genos” que significa generador de agua.

Según Suárez [23] un poco después de la gran explosión “big bang” los protones y electrones se unieron y crearon, principalmente, átomos de hidrógeno.

Siendo el hidrogeno uno de los elementos más abundantes de la tierra, su inconveniente es la disponibilidad del elemento, ya que no lo encontramos de forma directa en el ambiente, aunque si le logra encontrar en forma molecular en su mayoría combinado con el agua.

El hidrogeno es un elemento químico encontrado y descrito por primera vez en 1766 por Henry Cavendish. Este elemento actualmente se encuentra representado en la tabla periódica por el símbolo H y con un numero atómico de 1.

### **2.7.1 Historia del hidrogeno**

La historia del hidrogeno se remonta al año 1671 en donde el científico Robert Boyle empieza un par de experimentos en donde sin saberlo manipula el hidrogeno, posteriormente en 1766 es reconocido como un elemento químico por Henry Cavendish, dentro de los sucesos más importantes esta que en 1838 se llevaron experimentos que culminaron en la elaboración de la primer pila dando así el comienzo a toda una exuberante búsqueda de información relacionada con el hidrogeno, la figura (7) representa los acontecimientos más importantes en relación con el hidrogeno:

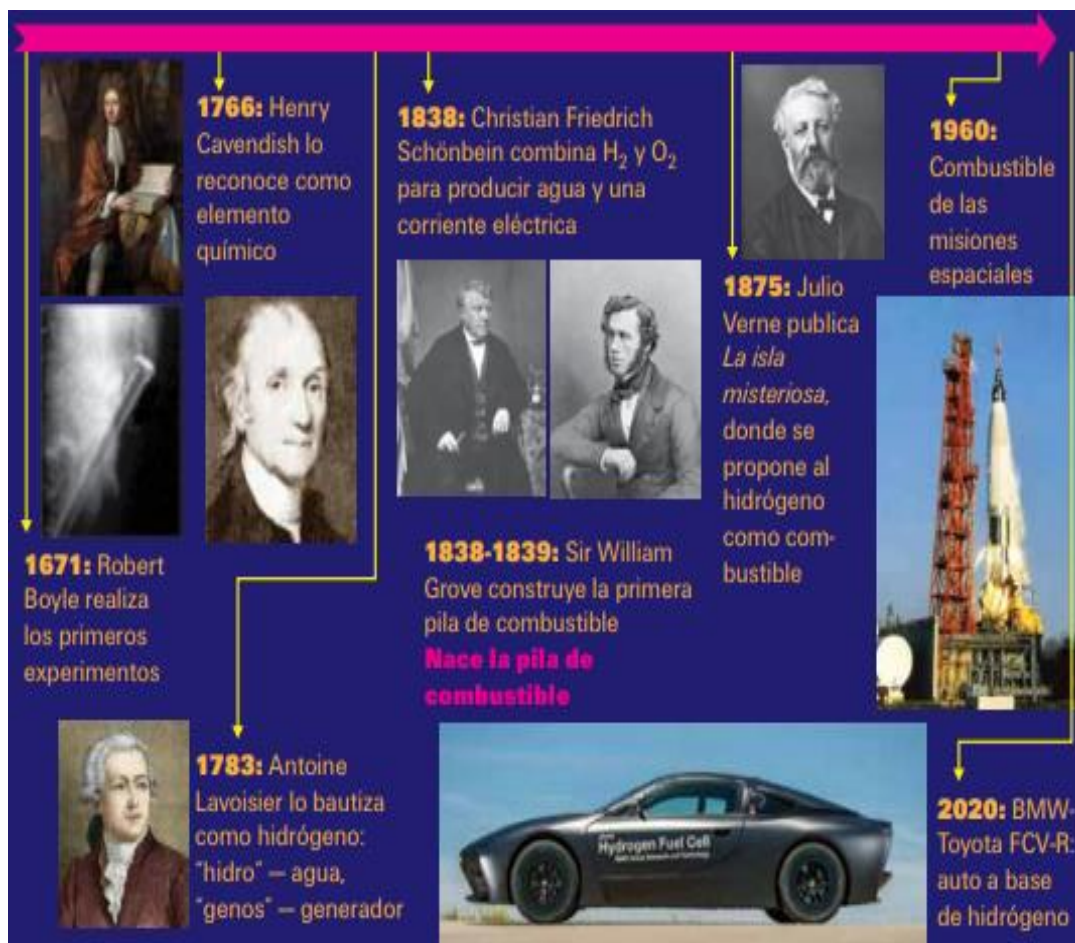


Figura 2.6 Historia del hidrógeno. [23]

### 2.7.2 Características del hidrogeno

En condiciones normales, el hidrogeno es un gas diatómico  $H_2$ , es incoloro, inodora, insípido, no metálico y sumamente inflamable.

“El hidrógeno puede formar enlaces iónicos o covalentes; puede formar compuestos simples o complejos; puede participar en reacciones químicas, electroquímicas, organometálicas, orgánicas, biológicas, ácido-base y un gran etcétera” [23].

### 2.7.3 Propiedades del hidrógeno

Dentro de las propiedades del hidrogeno, resaltadas por Gutiérrez [20] están:

Tabla 2.2 Propiedades físicas del hidrógeno. [20]



| Propiedad                                   | Valor                 | Unidades    |
|---|-----------------------|-------------|
| Inodoro, incoloro y sin sabor               |                       |             |
| Estado ordinario                            | Gas                   |             |
| Estructura cristalina                       | Hexagonal             |             |
| Es la molécula más pequeña conocida         |                       |             |
| Densidad en estado gaseoso( a 20°C y 1atm)  | 0,08376               | $kg/m^3$    |
| Densidad en estado Liquido                  | 0,0708                | $kg/m^3$    |
| Volumen específico del gas ( a 20°C y 1atm) | 11,9                  | $m^3/kg$    |
| Volumen específico liquido (-253°C Y 1atm)  | 0,014                 | $m^3/kg$    |
| Punto de fusión                             | 14,025                | $K$         |
| Punto de ebullición                         | 20,268                | $K$         |
| Temperatura crítica                         | - 239,8               | $^{\circ}C$ |
| Energía específica de combustión            | 120                   | $MJ/kg$     |
| Entalpía de vaporización                    | 0,44936               | $KJ/mol$    |
| Entalpía de fusión                          | 0,05868               | $KJ/mol$    |
| Presión critica                             | $1,293 \cdot 10^6$    | $Pa$        |
| Volumen molar                               | $22,42 \cdot 10^{-3}$ | $m^3/mol$   |
| Facilidad de efusión, como también difusión |                       |             |
| Optima conductividad calorífica             |                       |             |
| Relación de expansión                       | 1:848                 |             |

Y para las propiedades químicas tenemos:

Tabla 2.3 Propiedades químicas del hidrógeno. [20]

| Propiedad   | valor   | Unidades                           |
|---|---|------------------------------------|
| Peso atómico  | 100974  | uma                                |
| Posee un esta de oxidación  | +1, -1  |                                    |
| Solubilidad en agua   | a 0°C :2,1 en 100 partes<br>a 80°C : 0,8                      | cm <sup>3</sup><br>cm <sup>3</sup> |
| Isotopos abundancia   | H-1<br>99,985%<br>H-2(deuterio)<br>0,015%<br>H-3 (radiactivo) |                                    |
| Radio atómico (Radio de Bohr)   | 53  | pm                                 |
| Radio iónico  | 208   | pm                                 |
| Radio covalente   | 37  | pm                                 |
| Radio medio   | 25  | pm                                 |
| Configuración electrónica   | 1s <sup>1</sup>   |                                    |
| Completa su nivel de valencia con un electrón capturado, para así poder producir el anión h <sup>-</sup>      |   |                                    |
| Se combina con metales, a través de enlaces iónicos   | Alcalinos y<br>alcalinotérreos(aceptó<br>berilio y magnesio)  |                                    |
| Forma enlaces tipo covalentes   | Con los metales   |                                    |
| Forma enlaces metálicos   | Con los elementos de<br>transición                            |                                    |
| El hidrogeno, H <sup>+</sup> , siempre se encuentra asociado con otro elemento, aceptó los de estado gaseoso. |   |                                    |
| Posee una estructura cristalina hexagonal   |   |                                    |
| Reacciona con la gran mayoría de los elementos de la tabla periódica.   |   |                                    |

#### 2.7.4 Producción de hidrogeno

Como ya se ha mencionada el hidrogeno no se encuentra directamente en la naturaleza en su forma fundamental, lo encontramos en la mayoría de las veces como una combinación; es por lo que para la producción del hidrógeno son indispensables fuentes como el agua, gas natural y una implementación de energía. [24]

#### 2.7.5 Ciclo del hidrogeno

Para el análisis de las fuentes de producción del hidrogeno, es necesario identificar los distintos tipos de métodos, por ejemplo, el reformado del gas y la electrolisis del agua son en una mayor medida los métodos más convencionales, debido a la gran cantidad de agua que existe, el siguiente diagrama muestra el comportamiento del flujo del hidrogeno.

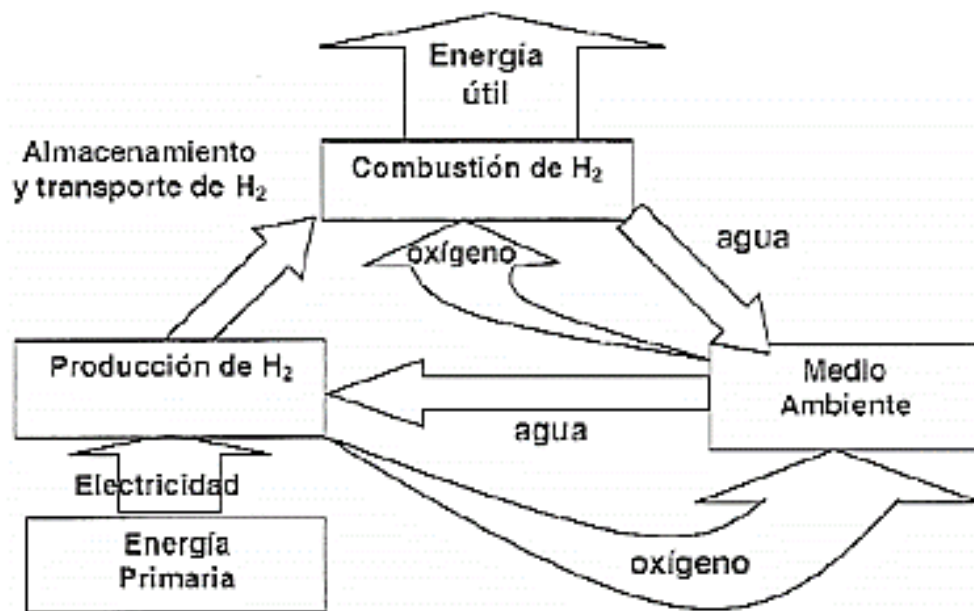


Figura 2.7 Ciclo del hidrogeno. [24].

#### 2.8 Electrolisis

El proceso de hidrolisis se basa en la descomposición electroquímica del agua, por medio de una corriente eléctrica que fluye entre dos electrodos. En ocasiones el proceso involucra la

implementación de un diafragma o separador que evita la recombinación del hidrogeno con el oxígeno. De esta forma la electrolisis del agua, resulta ser un excelente método directo para la obtención del hidrogeno gaseoso con una alta pureza. [20]

## **2.9 Descarbonización del motor**

Dentro de los principales factores por tomar en cuenta para el óptimo mantenimiento de una automóvil, es la descarbonización del motor.

Dentro del motor de gasolina se forman algunos residuos provenientes de la combustión de la gasolina, a estos se les conoce bajo el nombre de hollín o carbonilla.


La carbonilla se debe a el combustible que no es aprovechado por el motor, generando así un cumulo de residuos que no se aprovecharon, estos a su vez originan gases nocivos como lo son: monóxido de carbono, el óxido de nitrógeno entre otros más.

La descarbonización del motor no es más que el proceso por el cual se eliminan las impurezas y excesos de los residuos sólidos acumulados en zonas afectadas por el grupo propulsor del automóvil, para llevar a cabo este proceso de manera exitos y eficiente se suele emplear el uso del gas hidroxi (HHO).

El gas hidroxi permite limpiar cualquier motor que emplee gasolina como fuente de energía. [25]

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1 Cronograma de actividades

|   |  |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>Encabezado General</b><br> <b>ULANCINGO</b><br>UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TULANCINGO<br><small>Organismo Descentralizado de la Administración Pública Estatal</small> |  | <b>A. Nombre del Formato:</b><br>ACUERDO Y CRONOGRAMA DE PROYECTOS DE ESTADÍA |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>F-22-01-R1:210817</b>  |  | <b>B. Código/Revisión; Fecha:</b><br>F-05-09-R1;081118                        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Datos para los Registros (evidencia):</b>  |  | <b>C. Página</b><br>1 de 1  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>D. Fecha de elaboración:</b><br>1 de mayo del 2021   |  | <b>E. Periodo al que aplica:</b><br>Mayo- agosto 2021                         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

| No. | ACTIVIDADES  | TOTAL            | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----|--|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| 1   | Familiarización de temas de investigación para un mejor control y análisis de datos. Investigación bibliográfica.                                      | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| 2   | Primer análisis de datos recopilados por el investigador. (Graficacion en el software origin)  | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| 3   | Segundo análisis de datos recopilados por el investigador.   | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| 4   | Tercer análisis de los datos recopilados por el asesor, comparación de todas las gráficas y primer avance del marco teórico en el proyecto de estadía. | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| 5   | Investigación y lectura de artículos científicos enfocados en el tema de investigación, segundo avance del proyecto de estadía.                        | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| 6   | Trabajo sobre la memoria de estadía  | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| 7   |  | P (18)<br>E (19) |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 20. Firmas de seguimiento Asesor Académico |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 21. Calificación Parcial                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabla 3.1 Cronograma de actividades.

### 3.2 Estrategia experimental

El enfoque primordial de esta investigación radica en el análisis de los óxidos de nitrógeno y la relación aire/combustible (AFR).

Para todas las pruebas se utilizó el aparato medidor de 5 gases (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> y AFR) Snap-on. (HHGA5 + PRINTER).

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se empleará el uso de un el catalizador comercial que trae por defecto un automóvil y uno mixto desarrollado en el IFUNAM ambos se emplearan para las pruebas con y sin un generador de hidrogeno incorporado.



*Figura 3.1 Analizador de 5 gases con impresora. [26]*

Esta investigación involucra la medición de los óxidos de nitrógeno bajo condiciones no controladas (clima, temperatura, contaminación atmosférica), sin embargo, para un análisis más preciso se determinó una ruta específica “Ruta 1” en donde se llevó a cabo todas las lecturas de las emisiones de gases.

Las pruebas estáticas se llevaron a cabo con la ayuda de rodillos y dinamómetro para registrar los datos.

Se comienza la investigación con una prueba enfocada en identificar las emisiones generadas del automóvil sobre la “Ruta 1”, sin la adición de un catalizador al sistema de escape automotriz. Los resultados fueron los siguientes:

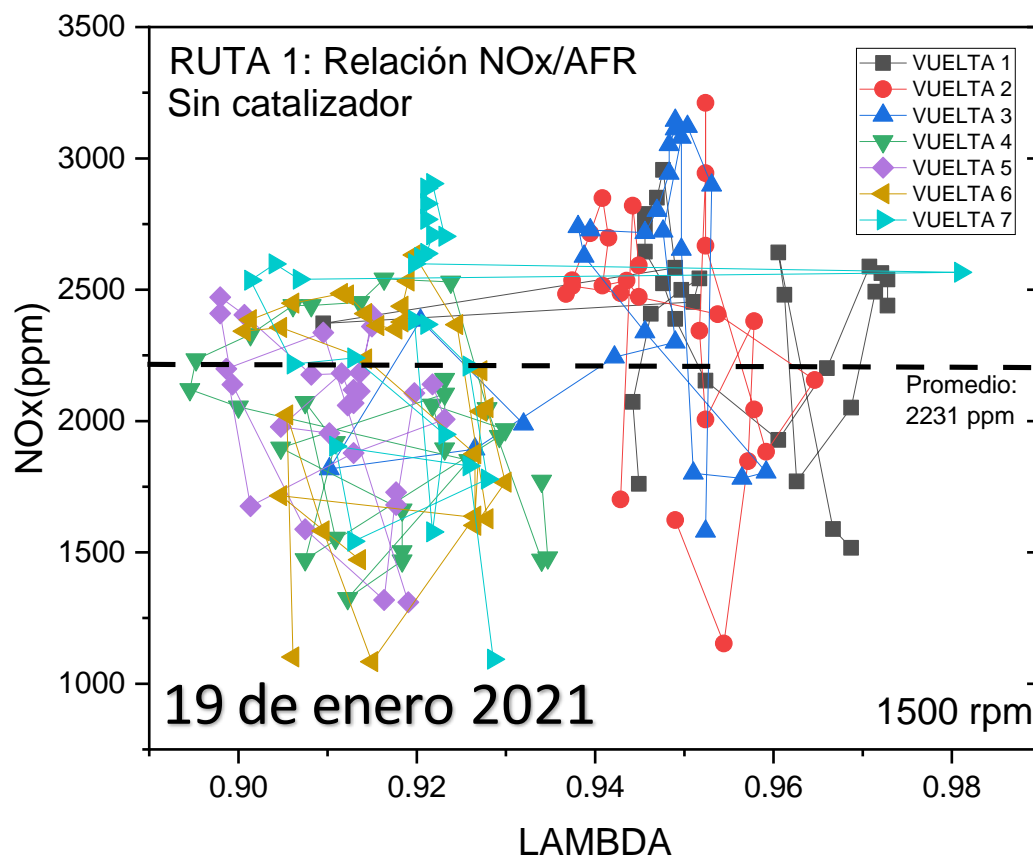


Figura 3.2 Análisis dinámico de las emisiones de NOx sin catalizadores.

Las emisiones que genera un automóvil son sumamente altas con un promedio de 2231 ppm, que resultan un 88% mayores que el límite permitido que es 250 ppm según la referencia [17].

Se realizaron pruebas con un catalizador comercial y uno mixto adicionados al automóvil, a diferencia de los resultados obtenidos en la figura 3.2, los resultados generados con la implementación de dichos catalizadores resultaron bastante efectivos, de modo en que serán empleados en las pruebas a desarrollar durante la investigación con la intención de mejorar aún más la eficacia de reducción en los NOx con la incorporación de un sistema de generación de gas HHO.

### 3.3 Pruebas preliminares para el análisis del comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno en experimentos en ruta y dinamómetro sin generador de hidrogeno.

En esta parte de la prueba experimental, se llevaron a cabo análisis de chequeo con la intención de poder determinar las condiciones en las que se encuentra el automóvil, así como también conocer las emisiones de óxidos de nitrógeno antes de ser sometido a las pruebas con el generador de hidrogeno, y poder ver los resultados finales determinador en esta investigación.

#### 3.3.1 Prueba dinámica preliminar con ambos catalizadores.

Para las pruebas se incluyeron ambos catalizadores al sistema de escape automotriz, las pruebas se realizaron en la “Ruta 1”, en total se hicieron cinco vueltas de análisis.

Los resultados son los siguientes:

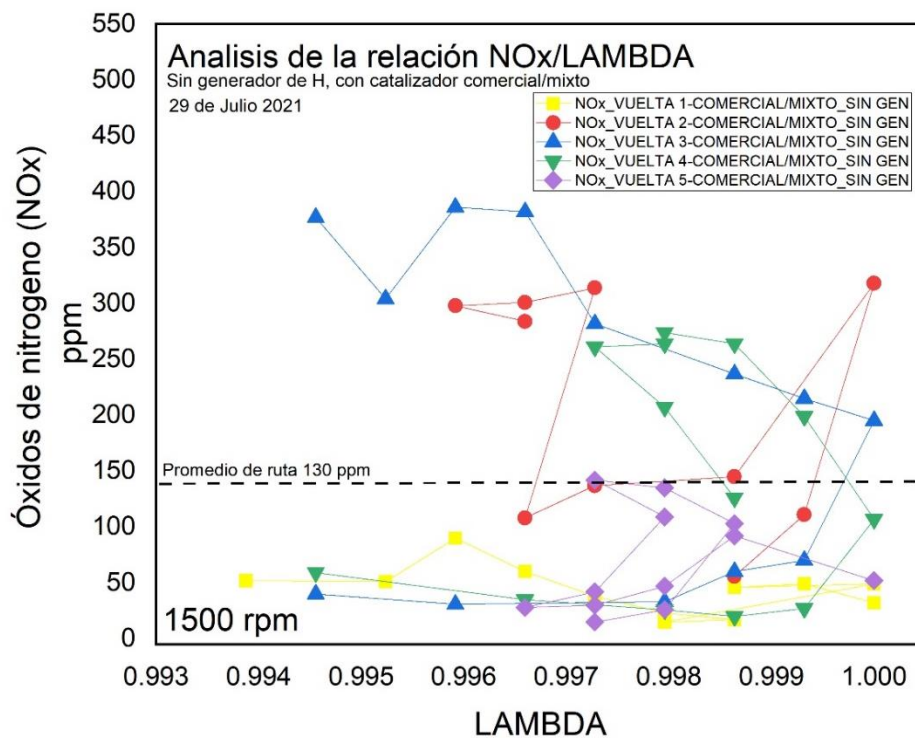


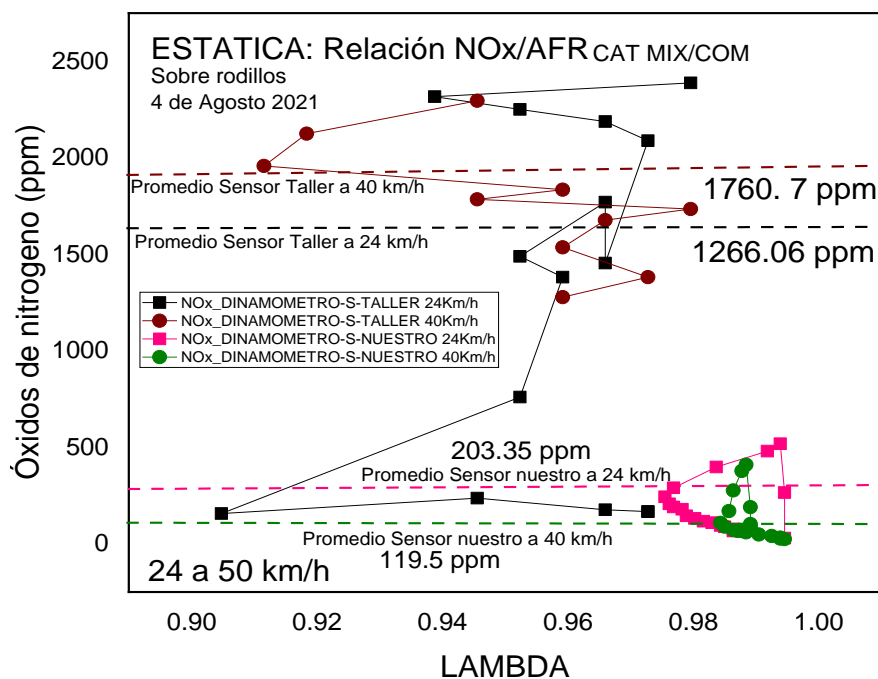
Figura 3.3 Análisis de las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas con ambos catalizadores añadidos.



El promedio obtenido para la emisión de NOx fue de 130ppm. Las variaciones entre las diferentes vueltas se deben a las distintas aceleraciones y desaceleraciones motivadas por el tráfico variable en la ruta.

### 3.3.2 Prueba estática preliminar con ambos catalizadores

Como complemento de los datos, se optó por una prueba estática para la comparación de las emisiones generadas. La prueba se dividió en dos etapas, la primera constó de una velocidad de 24 km/h y la segunda de 40 km/h en un dinamómetro de un taller. Los datos se compararon en cuanto a las mediciones generadas por analizador de gases del taller automotriz y el analizador de 5 gases nuestro. Los resultados fueron los siguientes:



*Figura 3.4 Análisis de las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas con ambos catalizadores añadidos en prueba estática*

La grafica muestra que existe una gran diferencia en las mediciones en el dinamómetro entre el sensor del taller y el nuestro. El sensor del taller automotriz determinó niveles de emisión para

los NO<sub>x</sub> de más de 500 ppm alcanzando valores de 2500 ppm. Inclusive para nuestro sensor (analizador de 5 gases) los datos mostrados son altos, en comparación con los generados en las cinco vueltas de la “Ruta 1”.

Estas variantes en las mediciones se atribuyen a que el rpm es altamente diferente en cuanto a las de la ruta, además no se descarta la posibilidad de que el sensor del taller se encuentre descalibrado por lo tanto se considera la siguiente tabla de factores de conversión para la interpretación de los datos del registro obtenidos por el sensor del taller.

*Tabla 3.2. Promedios de pruebas de NO<sub>x</sub> para factores*

| TIPO                     | PROMEDIO    |
|--------------------------|-------------|
| Ruta (29/07/21)          | 130 ppm     |
| Sensor nuestro a 24 km/h | 203.35 ppm  |
| Sensor nuestro a 40 km/h | 119.5 ppm   |
| Sensor taller a 24 km/h  | 1266.06 ppm |
| Sensor taller a 40 km/h  | 1760.7 ppm  |

*Tabla 3.3. Promedios y factores de conversión entre sensores de taller y nuestros con ruta para NO<sub>x</sub>*

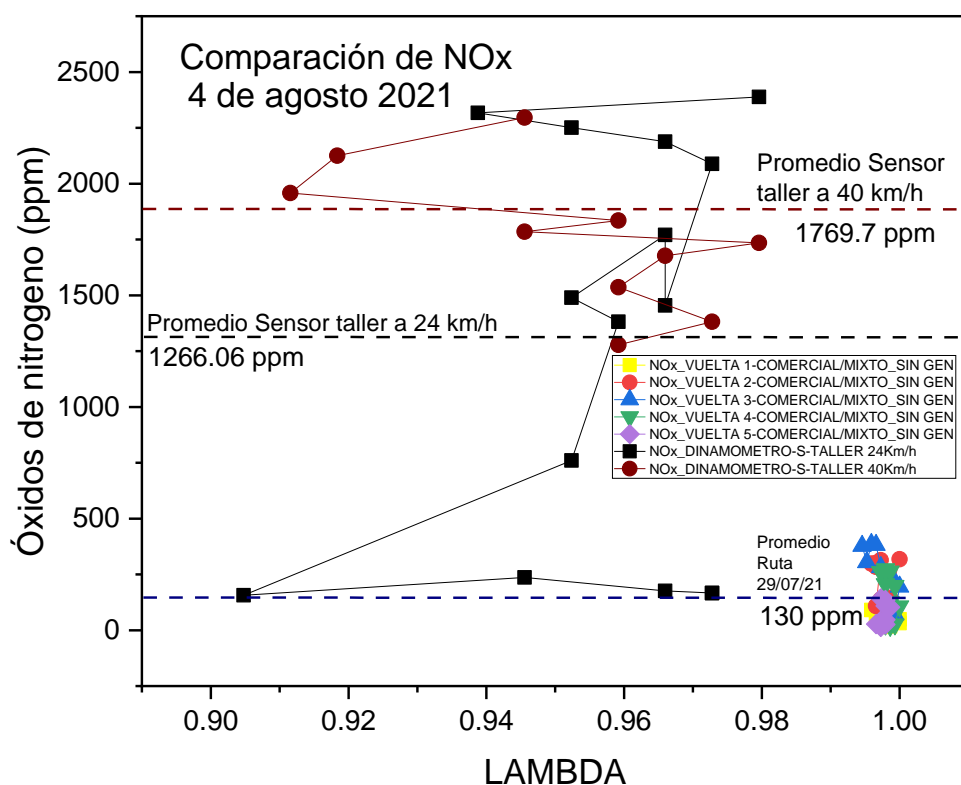
|   |           |
|---|-----------|
| Promedio de NO <sub>x</sub> constante en ruta a otras pruebas: 131.64 ppm | Factores  |
| Factor de conversión ruta (29/07/21) a sensor nuestro 24 km/h             | 1.53 ppm  |
| Factor de conversión ruta (29/07/21) a sensor nuestro 40 km/h             | .9009 ppm |
| Factor de conversión ruta (29/07/21) a sensor del taller a 24 km/h        | 9.54 ppm  |
| Factor de conversión ruta a (29/07/21) sensor del taller a 40 km/h        | 13.27 ppm |
| Factor de conversión sensor nuestro a 24 km/h a sensor taller de 24 km/h  | 6.23 ppm  |
| Factor de conversión sensor nuestro a 40 km/h a sensor taller de 40 km/h  | 14.72 ppm |

Los promedios mostrados en la tabla 3.2 se obtuvieron de la medición de los datos registrados cada 3 segundos en el sensor del taller y en el analizador de cinco gases.

La tabla 3.3 muestra los factores de conversión obtenidos de todas las pruebas comparadas con los sensores en cada nivel de velocidad, es notable el alto intervalo de diferencia que existe entre

los datos registrados por el sensor del taller si se comparan con los datos registrados con el analizador de 5 gases nuestro.

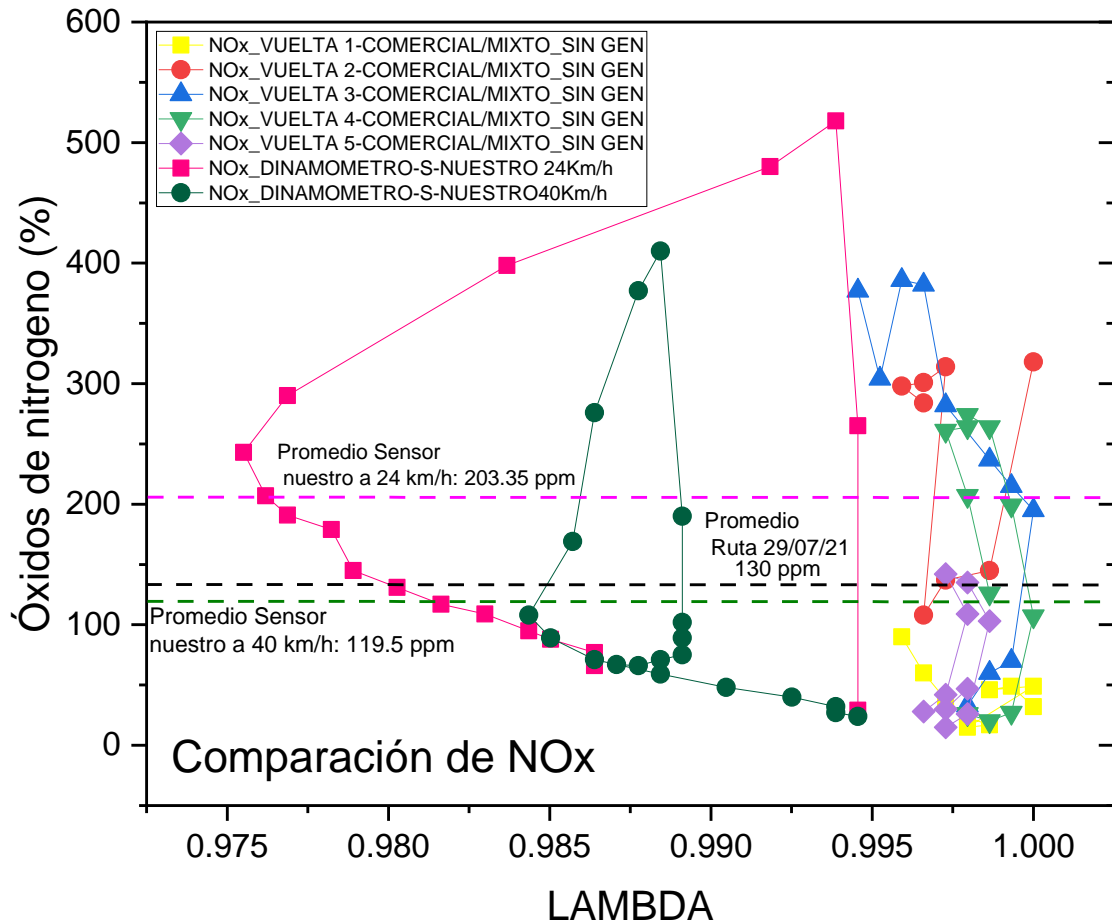
Para la comparación de las pruebas y su valoración de emisiones se muestran las siguientes figuras:



*Figura 3.5 Comparación preliminar de NOx en ruta con sensores del taller.*

Las mediciones de los NOx en ruta por parte del analizador de 5 gases es 13.7 veces menor a el promedio del sensor del taller a 40 km/h y 9.54 veces menor que el promedio del sensor del taller a 24 km/h.

Haciendo una comparación entre el sensor nuestro (el analizador de 5 gases) en las mediciones de ambas pruebas encontramos los siguientes resultados, plasmados en la figura a continuación:



*Figura 3.6 Comparación preliminar de NOx en ruta con sensores nuestros.*

En la figura 3.6 se puede identificar que los valores del analizador de gases en ruta y en el dinamómetro son comparables y además no superan el límite máximo permisible de 250 ppm. Y el promedio en Ruta 1 es intermedio a los resultados en el dinamómetro de 24Km/h y 40Km/h. Por lo tanto, se determina que la prueba en ruta si es representativa en cuanto a los datos obtenidos en el dinamómetro. Recordemos que las pruebas del dinamómetro son similares a las realizadas en los verificentros. Esto valida las pruebas en la Ruta 1, mostrando que son apropiadas y muestran el comportamiento real del vehículo en circulación.

### 3.4 Pruebas finales para el análisis del comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno en experimentos dinámicos y estáticos con y sin generador de hidrogeno y con ambos catalizadores añadidos.

En esta etapa del proyecto se llevarán a cabo las pruebas más importantes y significativas, que son las involucradas con las emisiones generadas tras la adición de un generador de hidrogeno acoplado en su sistema de escape automotriz, al igual tendrá añadidos ambos catalizadores empleados durante las pruebas.

#### 3.4.1 Prueba 1 dinámica de referencia con ambos catalizadores.

La primera prueba de esta etapa parte fue una medida de referencia para la comparación de las emisiones generadas en ruta con el generador de hidrogeno.

La referencia (CAT-MIX/COM\_SIN HHO), muestra los resultados de una prueba en ruta que no involucra aun el sistema de generación de gas HHO, Los resultados son los siguientes;

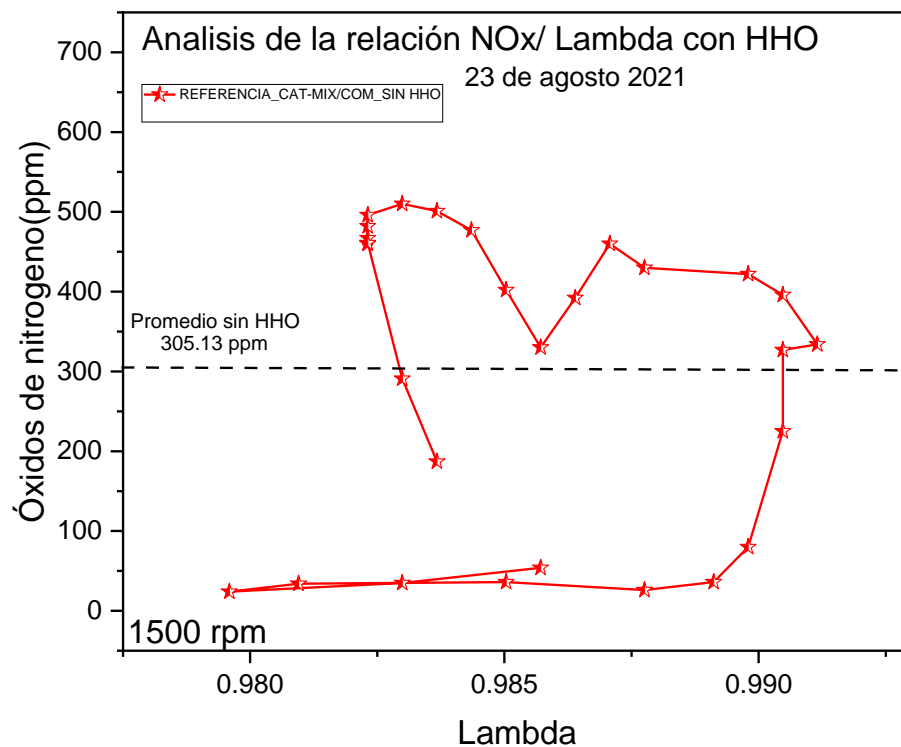
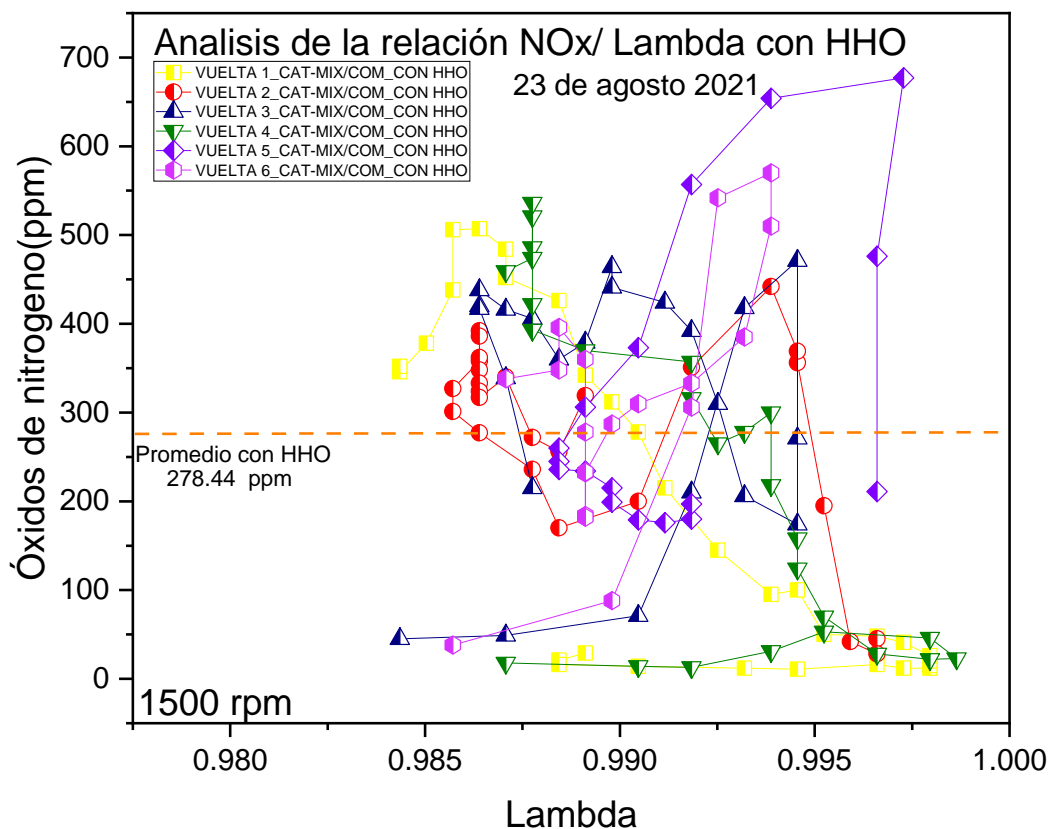


Figura 3.7 Resultados de referencia sin HHO

Para esta prueba los resultados exceden considerablemente las emisiones permitidas de NO<sub>x</sub>.

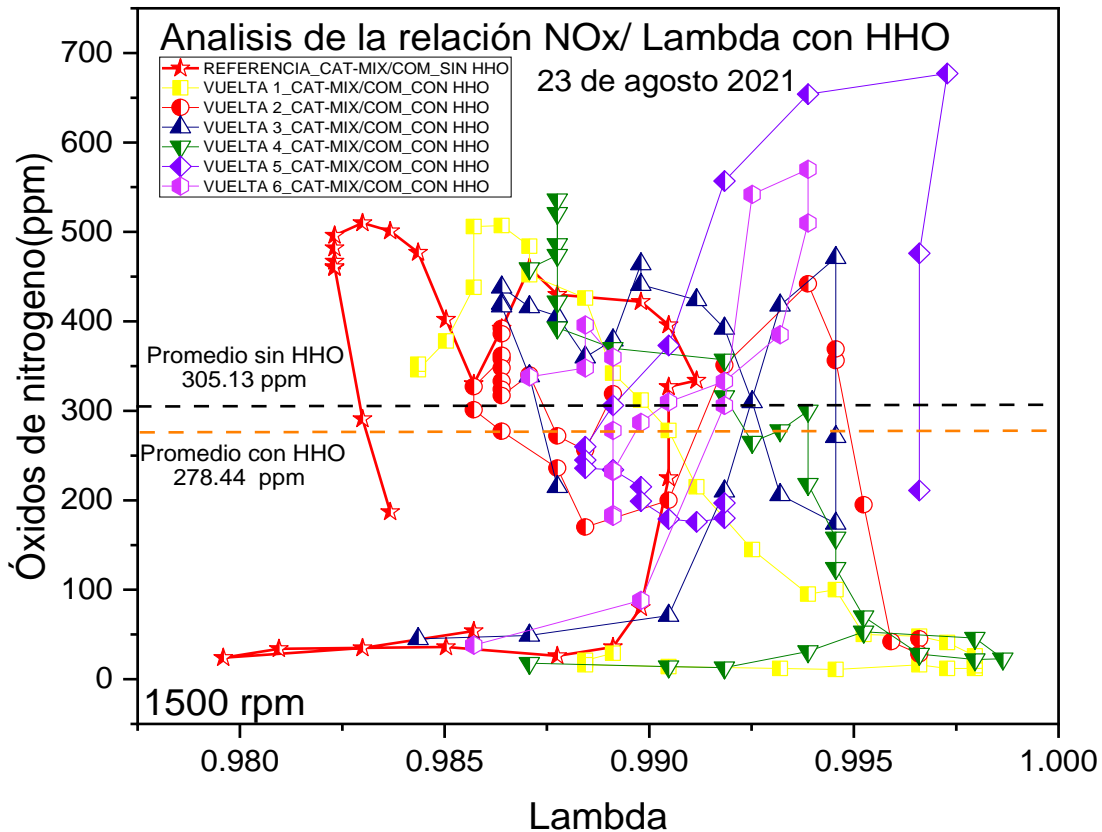
Posteriormente se realizó bajo las mismas condiciones una prueba en la cual esta vez se implementó el generador HHO.



*Figura 3.8 Resultados de referencia con HHO*

A diferencia de la prueba sin la implementación de gas HHO, en esta prueba se puede notar una mejoría en la reducción de los óxidos de nitrógeno, para una mejor comparación se muestran a continuación los resultados reunidos en una misma grafica.

Los resultados de ambas pruebas se expresan en la siguiente gráfica:



*Figura 3.9 Comparación de resultados sin HHO y con HHO.*

Para esta prueba la referencia muestra un comportamiento similar a las primeras vueltas que involucran la implementación del generador de hidrogeno. Estos resultados indican una disminución del 8.74%.

### **3.4.2 Prueba 2 dinámica con la implementación de HHO y sin HHO.**

Después de un ajuste en el sistema del generador de hidrogeno y corrigiendo el porcentaje de electrolito indispensable se logró un burbujeo uniforme en el sistema, lo cual indica un óptimo trabajo por parte del generador de hidrogeno, una vez considerados todos los ajustes mencionados se realizó otra prueba con HHO y sin HHO esperando una mejora en los resultados de emisión de NOx, la gráfica 3.8 muestra los datos recolectados durante esta prueba.

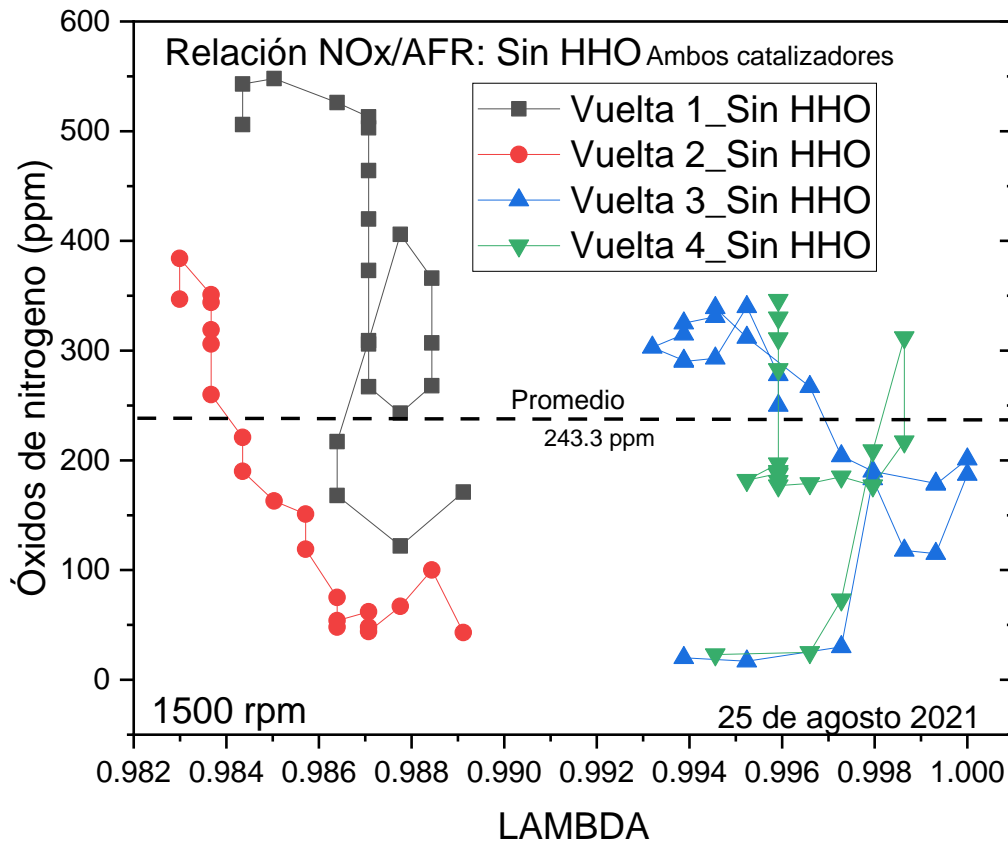
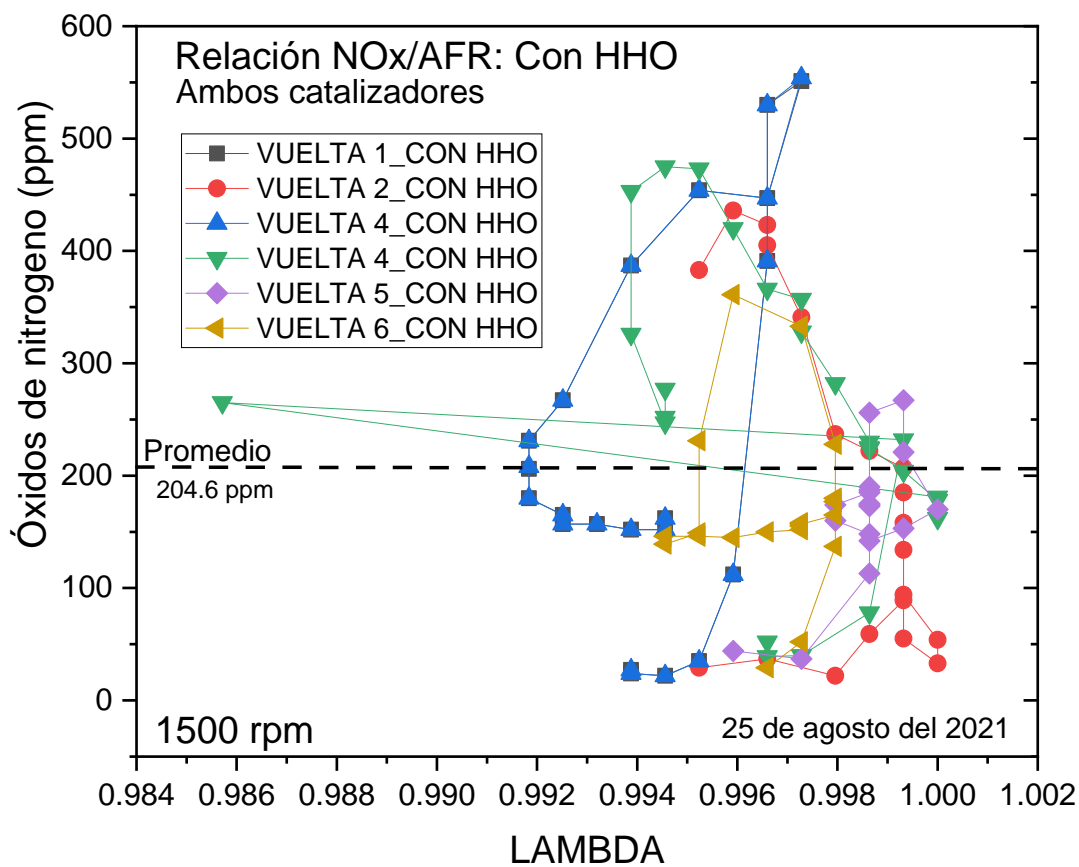


Figura 3.10 Prueba semifinal para la comparación de NOx: Sin HHO.

La prueba en ruta se derivó del análisis de cuatro vueltas sin el generador de hidrogeno y con ambos catalizadores, el promedio de óxidos de nitrógeno fue de 243.3 ppm.

Respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas al incluir el generador de HHO, los resultados se muestran en la siguiente gráfica.





*Figura 3.11 Prueba semifinal para la comparación de NOx: Con HHO.*

La prueba en ruta se derivó del análisis de seis vueltas con el generador de hidrogeno y con ambos catalizadores, el promedio de óxidos de nitrógeno fue de 204.6 ppm.

Ambas graficas sometidas a una comparación nos muestran los resultados plasmados en la figura 3.12.

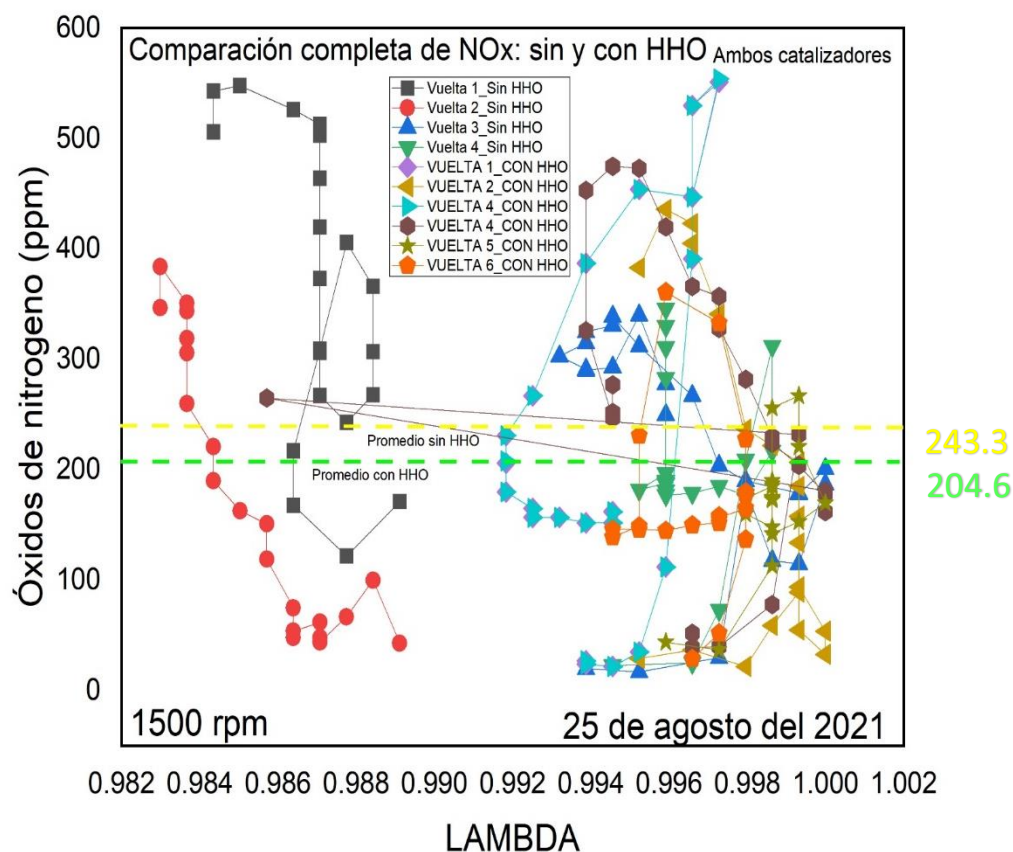


Figura 3.12 Prueba semifinal comparación de NOx: Con y Sin HHO

Las emisiones de óxidos de nitrógeno se ven reducidas tras la implementación del generador de gas HHO, la reducción si se logró dando como resultado una mejoría del 16%.

### 3.4.3 Prueba 3 semifinal en ruta con la implementación de HHO y sin HHO.

Considerando algunos ajustes extras como la cantidad más precisa del electrolito, el reajuste del equipo de gas HHO y un burbujeo constante y uniforme del sistema, se consideró la siguiente prueba como una determinante en el comportamiento de las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Esta prueba se basó en 3 vueltas en ruta 1 sin la operación del generador de gas HHO y 4 con la operación de éste.

Los resultados sin la operación del generador de gas HHO se expresan en la siguiente gráfica:

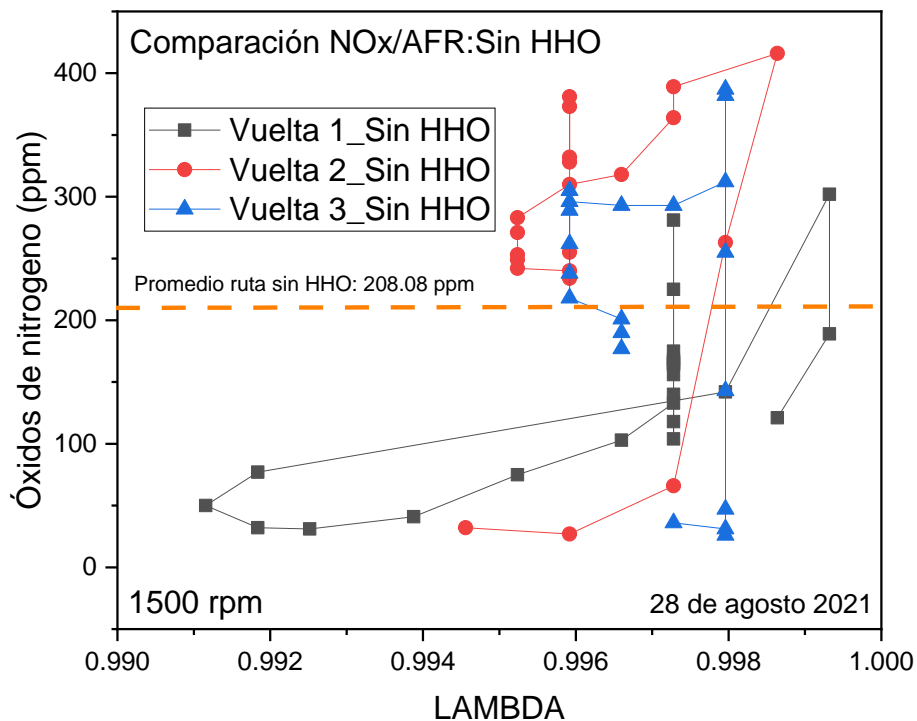


Figura 3.13 Análisis prueba tres sin HHO

En la figura 3.13 se determinó que el promedio fue de 208.1 ppm.

En la siguiente grafica se expresan los resultados obtenidos con la adición del generador HHO:

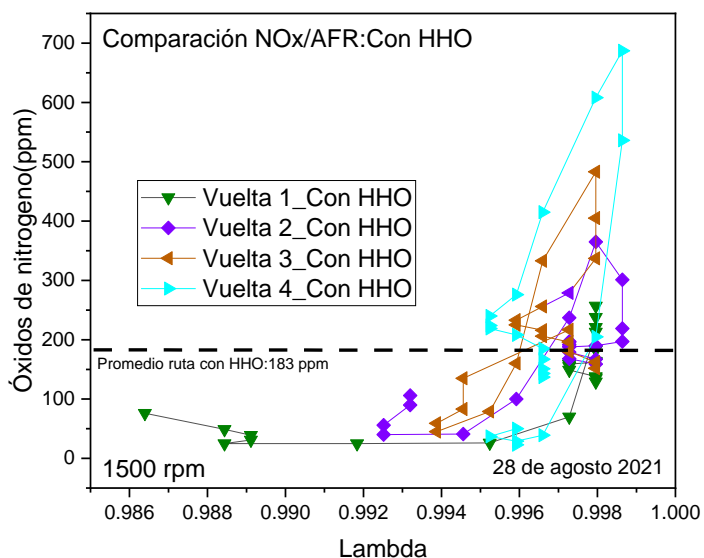
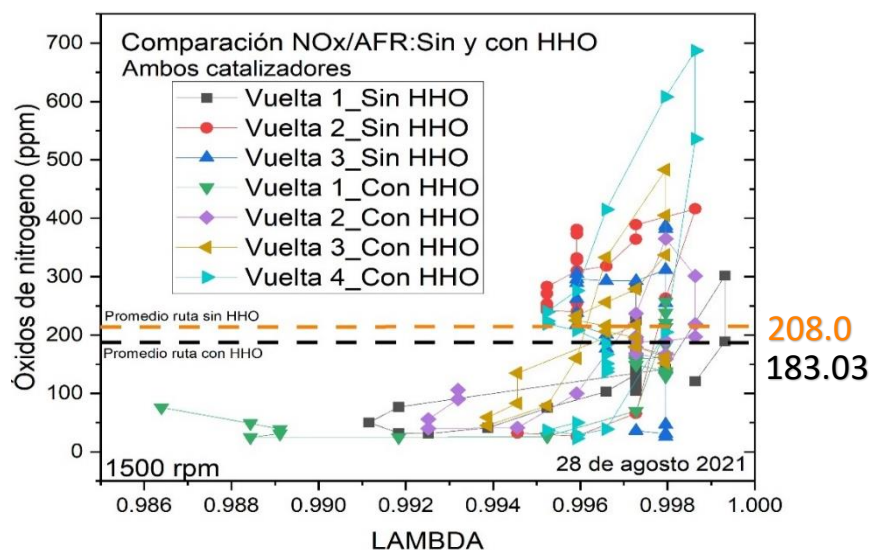


Figura 3.14 Análisis prueba tres con HHO

Como se mencionó con anterioridad, en esta prueba se esperaba que los intervalos de NOx se vieran reducidos en relación con la figura 3.13, el promedio de emisiones registrado durante esta prueba fue de 183 ppm identificando que si existió una disminución de las emisiones.

Se compararon los resultados en la siguiente gráfica.



*Figura 3.15 Comparación prueba tres de NOx con y sin HHO.*

En esta prueba se logra apreciar que existe una mejora de un 12% en las emisiones de NOx del promedio de ruta con HHO.

### **3.5 Prueba ralenti con la implementación de HHO y sin HHO.**

El modo ralenti se refiere a el régimen mínimo empleado para que el motor del automóvil esté funcionando sin avance del automóvil.

La prueba se derivó del análisis de dos mediciones en ralenti una con el generador de hidrogeno y otra sin generador de hidrogeno ambas pruebas con ambos catalizadores.

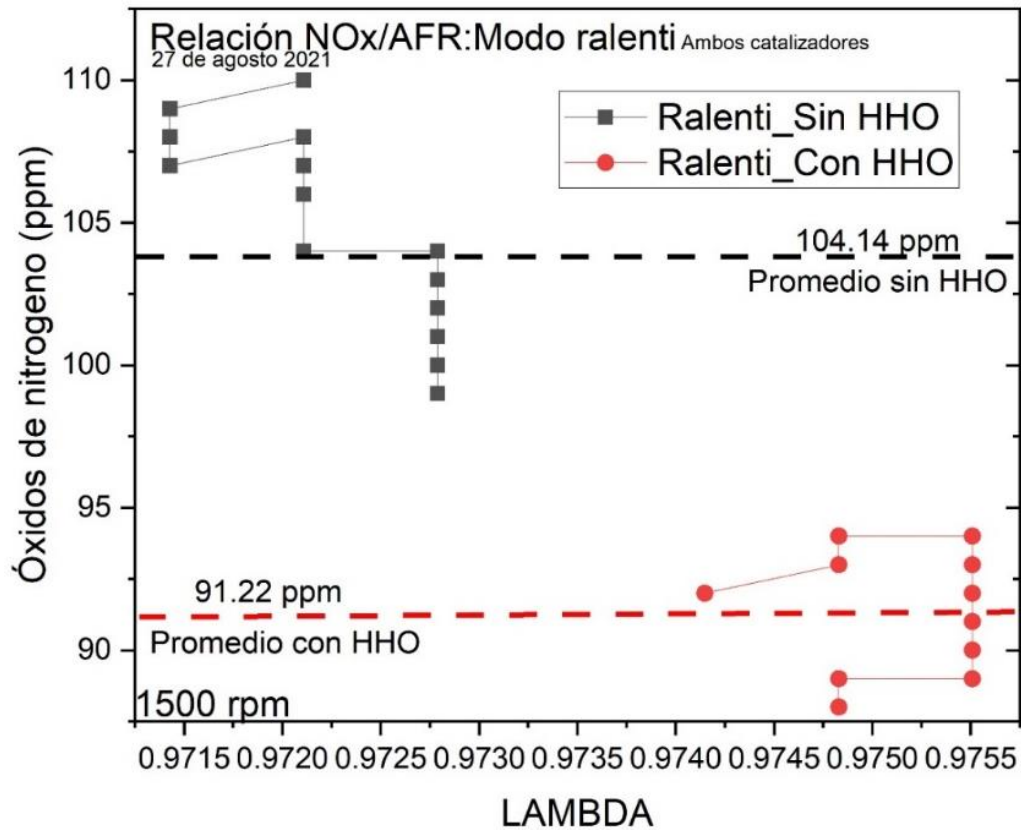


Figura 3.16 Prueba de NOx en ralenti.

La comparación entre las emisiones con y sin HHO en modo ralenti expresan que, si existe una mejoría en la reducción de las emisiones de NOx, teniendo en cuenta que el promedio de NOx emitidos sin HHO es de 104.14 ppm a diferencia que con la implementación del generador de hidrogeno con promedio de 91.22 ppm. Por lo tanto, las emisiones de NOx se ven reducidas en un 12.4%, teniendo una prueba más de que los resultados son favorables con la implementación del gas HHO.

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Durante el proceso de esta investigación se desarrolló la parte experimental diferentes pruebas cada una se relacionó con prueba realizadas ambas en el mismo día, bajo condiciones similares, únicamente modificando la operación o no del generador de gas HHO.

Una vez recolectados y comparados estos datos, se realizó la determinación del porcentaje de mejora que existió en cada prueba seleccionada.

Los resultados están plasmados en la tabla 4.1, que se muestra a continuación.

*Tabla 4.1 Comparación de resultados con generador de hidrogeno.*

| Número de figura             | Título de figura                                     | Generador de HHO | Promedio de figura |               |
|------------------------------|--|------------------|--------------------|---------------|
| Fig. 3.7                     | Resultados de referencia sin HHO                     | No añadido       | Referencia         | 305.13 ppm    |
| Fig. 3.8                     | Resultados de referencia con HHO                     | Añadido          | Ruta               | 278.44 ppm    |
| <b>PRUEBA 1 (23/08/2021)</b> |  |                  | <b>Mejora</b>      | <b>8.74 %</b> |
| Fig. 3.10                    | Prueba semifinal para la comparación de NOx: Sin HHO | No añadido       | Ruta               | 243.3 ppm     |
| Fig. 3.11                    | Prueba semifinal para la comparación de NOx: Con HHO | Añadido          | Ruta               | 204.6 ppm     |
| <b>PRUEBA 2 (25/08/2021)</b> |  |                  | <b>Mejora</b>      | <b>15.9 %</b> |
| Fig. 3.13                    | Análisis prueba tres sin HHO                         | No añadido       | Ruta               | 208.8 ppm     |
| Fig. 3.14                    | Análisis prueba tres con HHO                         | Añadido          | Ruta               | 183.03 ppm    |
| <b>PRUEBA 3 (28/08/2021)</b> |  |                  | <b>Mejora</b>      | <b>12 %</b>   |

Se puede identificar que existían variaciones en las pruebas recolectadas, cada una mostraba diferentes intervalos de NOx, sin embargo, cuando cada prueba fue sujeta a su contraprueba correspondiente de análisis se determinó que la reproducibilidad de las pruebas era favorable a la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno cuando era empleado en generador de HHO. La reducción promedio es de 12%.

Como ya se ha mencionado, la adición del sistema del generador de gas HHO, resulta ser positivo en la reducción y mantenimiento de las emisiones de NOx

## Conclusiones

Durante mucho tiempo la industria automovilística se vio altamente interesada en la reducción de gases contaminantes con la implementación de los catalizadores. Motivo por el cual esta investigación se enfocó en otra alternativa que es el generador de hidrogeno.

Los resultados obtenidos para la reducción de los óxidos de nitrógeno resultan positivos, generando en cada prueba realizada una mejoría, esto indica que la reproducibilidad siempre tendrá a ser positiva en la reducción de los NOx tras la implementación del generador HHO. Aunque, revisando el trabajo de mis otros compañeros cuyos gases de interés fueron sobre HC y CO, se observó que dicho dispositivo actúa mejor en otros gases debido a su naturaleza oxidativa. También se identificó que la humedad como agente reductivo actúa favoreciendo a la reacción de los NOx, generando así cambios más favorables en la disminución de éstos.

Dentro de los cambios ocurridos por los catalizadores se destaca el efecto reductivo generado por la participación del rodio y el platino.

Considerando que la referencia [1] menciona un 15% de reducción en los óxidos de nitrógeno sobre pruebas de un motor en banco, vemos que en los experimentos realizados en este trabajo en una ruta real con el automóvil completo y no solo sobre un banco, tenemos resultados similares, una mejora del 12%. Mencionando también que en la referencia [1] se señala que el uso del generador de HHO podría generar un aumento en las emisiones de NOx, y hasta este punto de la investigación eso no fue el resultado de ninguna de nuestras pruebas, existiendo en todas unas mejorías. Esto nos permite recomendar el uso de un generador HHO para abatir también los NOx emitidos por los automóviles. Y podemos concluir que ya se tienen las bases para realizar más experimentos sobre el generador HHO en un automóvil y determinar las condiciones óptimas de su operación.

## Referencias

- [1] Y. A. E. ,. M. E. K. Mohamed M. EL-Kassaby, «Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions.,» *EL SERVIER*, vol. 1, nº 55, pp. 243,251, 2015.
- [2] MINISTERIO DEL INTERIOR, DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO , El impacto medio ambiental del tráfico, Madrid: SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INTERVENCIÓN Y POLÍTICAS VIALES, 2014.
- [3] UNAM, «Cronología Histórica de la UNAM | Portal UNAM,» [En línea]. Available: <https://www.unam.mx/acerca-de-la-unam/unam-en-el-tiempo/cronologia-historica-de-la-unam>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [4] UNAM, «Historia - IFUNAM,» [En línea]. Available: <https://www.fisica.unam.mx/es/historia.php>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [5] UNAM, «UNAM. Misión y visión,» [En línea]. Available: <https://www.unam.mx/mision-y-vision>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [6] Confederación de consumidores y usuarios (CECU), «Nanotecnología,» Registro estatal de asociaciones de consumidores y usuarios, Madrid.
- [7] E. S. Cacho, «Wordpress,» LOS ARTISTAS DE LA ANTIGÜEDAD YA USABAN NANOTECNOLOGÍA, 9 abril 2017. [En línea]. Available: <https://esterscacho.wordpress.com/2017/04/09/artistas-antiguedad-nanotecnologia/>. [Último acceso: 28 julio 2021].
- [8] G. Mendoza y J. L. Rodriguez Lopez, «La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso,» *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, vol. 0, nº 29, pp. 161-186, 2007.
- [9] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), «Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), Madrid, 2015.
- [10] Guia Automotriz de Costa Rica, Guia Automotriz de Costa Rica, 29 Julio 2021. [En línea]. Available: [https://guiaautomotrizcr.com/Articulos/articulos\\_automotriz\\_conozca\\_El%20catalizador.php](https://guiaautomotrizcr.com/Articulos/articulos_automotriz_conozca_El%20catalizador.php). [Último acceso: 30 Julio 2021].
- [11] Sabelotodo.org, «Sistema de escape del motor del automóvil,» [En línea]. Available: <http://www.sabelotodo.org/automovil/sisescape.html>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [12] J. A. Andrino Cebrián, Mecánica y entretenimiento simple del automóvil, España: Dirección general de trafico DGT, 2016.
- [13] J. B. Heywood, «Internal combustion engines: applied thermo sciences,» New york, 1986.



- [14] D. G. Pérez Darquea, «Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales,» *INNOVA Research Journal*, vol. 2, nº 23-24, p. 12, 2017.
- [15] Agencia de salut publica, «Los óxidos de nitrógeno (NOx) en el aire urbano y la salud,» *Consord Sanitari de Barcelona*, vol. 0, nº 0, p. 2, 2006.
- [16] M. Montaña Arias y A. L. Sandoval Pérez , «Contaminacion atmosferica y salud,» *REDALYC*, vol. 14, nº 065, pp. 29-33, 2007 |.
- [17] Secretaría de Gobernacion , «NOM-167-SEMARNAT-2017,» *Diario Oficial de la Federación* , p. 23, 2017.
- [18] Á. O. Diaz Rey, J. E. Gonzáles Gil y O. A. González Estrada, «Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, nº 1, pp. 143-154, 2018.
- [19] HIDROCELL, «SISTEMAS AHORRADORES DE COMBUSTIBLE,» [En línea]. Available: <https://hidrocell.mx/>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [20] L. Gutiérrez Jodra, «El hidrógeno, combustible del futuro,» *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 99, nº 1, pp. 49-67, 2005.
- [21] N. Saravanan, G. Nagarajan, C. Dhanasekaran y K. Kalaiselvan, «An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique,» *Renew. Energy*, vol. 33, nº 7, 2008.
- [22] N. Saravanan, G. Nagarajan, C. Dhanasekaran y K. Kalaiselvan, «Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine,´ *Int. J. Hydrogen Energy*,» vol. 32, nº 16, 2017.
- [23] K. Suárez Alcántara , «Un poco de todo sobre el HIDRÓGENO,» *Ciencia*, vol. 70, nº 1, pp. 72-80, 2019.
- [24] A. CASTRO LUNA, «El hidrogeno como vector energetico: su obtencion por electrolisis,» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL LA PLATA, Buenos Aires, 2015.
- [25] FLEXFUEL, «Flexfuel España · Descarbonización de motores,» Todo sobre descarbonización : los costes, los impactos, los garajes..., [En línea]. Available: <https://www.flexfuel-company.es/descarbonizacion-motores/faq/>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [26] H.A.L. Team Mechanics, «Laredotool Analizador de gases,» [En línea]. Available: <https://laredotools.com/categorias/analizador-de-gases>. [Último acceso: 19 Agosto 2021].
- [27] K. C. R. Martins, F. Soto Pau, J. A. Silva, A. M. d. Santos y R. F. E. Santos, «Estudio del empleo de un convertidor catalítico para las emisiones gaseosas en un motor de ignición,» *Revista de ingeniería mecánica*, vol. 8, nº 1, pp. 39-46, 2005.

- [28] D. Galán Madruga y R. Fernández Patier, «Implicaciones de los NO<sub>x</sub> en la química atmosférica,» *Revista electrónica de mediambiente UCM*, vol. 0, nº 0, p. 15, 2006.
- [29] J. Téllez , A. Rodríguez y Á. Fajardo, «Contaminación por Monóxido de carbono: un problema de salud ambiental.,» *Revista de salud pública*, vol. 8, nº 1, pp. 108-117, 2006.
- [30] A. Á. Prieto, «Autonocion.com,» El catalizador, 30 junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.autonocion.com/el-catalizador-que-es-partes-componentes-y-funcionamiento/>. [Último acceso: 30 junio 2021].