



Investigación de la regeneración de convertidores catalíticos de vehículos mediante el sistema de tratamiento de metales en monolitos

Caisalitin Yáñez, Luis Miguel y Cruz Guanoluisa, Edwin Ricardo

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Carátula

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz

Ing. Quiroz Erazo, Leonidas Antonio Msc.

15 de marzo del 2021

Latacunga



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“INVESTIGACIÓN DE LA REGENERACIÓN DE CONVERTIDORES CATALÍTICOS DE VEHÍCULOS MEDIANTE EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE METALES EN MONOLITOS”** fue realizado por los Señores **Caisalitin Yáñez Luis Miguel** y **Cruz Guanoluisa Edwin Ricardo**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 15 de marzo de 2021



Firmado electrónicamente por:
**LEONIDAS
ANTONIO QUIROZ
ERAZO**

Ing. Quiroz Erazo Leonidas Antonio Msc.

C.C.: 050250999-5

Reporte de urkund



Urkund Analysis Result

Analysed Document: REACTOR.docx (D98171876)
Submitted: 3/12/2021 10:02:00 PM
Submitted By: ercruz3@espe.edu.ec
Significance: 6 %

Sources included in the report:

TESIS.pdf (D35814352)
PROYECTO-URKUND-CONDO.pdf (D40644272)
TESIS VELASCO-YUGCHA.docx (D59044294)
TRABAJO TITULACIÓN - SANTIAGO BARRENO.pdf (D29418955)
control catalitico en la salida de gases de combustión de los motores.Tamara y Laura.pdf (D43486465)
Tesis_completa 15-01-202.docx (D62477101)
<https://debates.coches.net/discussion/4162/el-catalizador-funcionamientoSegovia>,
http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/14025/1/63033_1.pdf
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14148/1/T-ESPEL-MAI-0621.pdf>
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21250/1/T-ESPEL-MAI-0675.pdf>
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17319/1/T-UCE-0010-FIL-234.pdf>

Instances where selected sources appear:

43



Firmado electrónicamente por:
**LEONIDAS
ANTONIO QUIROZ
ERAZO**

Ing. Quiroz Erazo Leonidas Antonio Msc.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Responsabilidad de autoría

Nosotros, **Caisalitin Yánez Luis Miguel**, con cédula de ciudadanía 050325236-3 y **Cruz Guanoluisa Edwin Ricardo**, con cédula de ciudadanía 050342056-4, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **INVESTIGACIÓN DE LA REGENERACIÓN DE CONVERTIDORES CATALÍTICOS DE VEHÍCULOS MEDIANTE EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE METALES EN MONOLITOS**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 15 de marzo de 2021



Caisalitin Yánez Luis Miguel

C.C.: 050325236-3



Cruz Guanoluisa Edwin Ricardo

C.C.: 050342056-4



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Autorización de publicación

Nosotros, **Caisalitin Yánez Luis Miguel** con cédula de ciudadanía 050325236-3 y **Cruz Guanoluisa Edwin Ricardo**, con cédula de ciudadanía 050342056-4, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **INVESTIGACIÓN DE LA REGENERACIÓN DE CONVERTIDORES CATALÍTICOS DE VEHÍCULOS MEDIANTE EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE METALES EN MONOLITOS** en el Repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 15 de marzo de 2021

Caisalitin Yánez Luis Miguel

C.C.: 050325236-3

Cruz Guanoluisa Edwin Ricardo

C.C.: 050342056-4

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y el permitirme haber llegado hasta este momento tan importante en mi formación profesional; obteniendo el título de Ingeniero Automotriz.

A mis padres Luis Cruz y Alicia Guanoluisa, quienes me dieron la vida, educación, apoyo y por las enseñanzas y conocimientos impartidos en lo largo de mi vida, por no dejarme rendirme; darme el valor para seguir adelante a pesar de las adversidades, estuvieron conmigo hasta el día de hoy.

A mis hermanos José y Elías quienes con su apoyo y palabras de aliento nunca me dejaron rendirme y Jonathan (+) que siempre estuvo pendiente de mi apoyándome para que terminare mi carrera y ahora estas en el cielo cuidándome.

En especial a mi hijo Anthony Cruz quien fue el motor principal para seguir adelante y terminar mi carrera.

Ricardo Cruz

Agradecimiento

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la salud y el don de la perseverancia para culminar este trabajo de titulación, de la misma forma a la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE que me abrió sus puertas para formarme como excelente profesional y ser una mejor persona.

Quiero agradecer por todo el apoyo a mi familia que siempre estuvieron para mí en los momentos que más los necesitaba dándome palabras de apoyo.

Quiero agradecer a mi tutor Ing. Leonidas Quiroz, quien con sus conocimientos y apoyo me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba. Agradezco al Dr. Trino Romero y a la Ing. Catherine Donoso como colaboradores científicos que gracias a su apoyo científico y ayuda incondicional permitieron la facilidad para el desarrollo de las pruebas con el micro reactor en el laboratorio de petroquímica y siendo guía para culminarlo exitosamente.

Por último, quiero agradecer a Don Teófilo Robles y María Méndez (+) por siempre brindarme su apoyo incondicional y preocuparse de todo, a mis amigos y compañeros por estar pendiente en todo momento y a mi amigo Jimmy Gallegos gracias por brindarme tu amistad y apoyo hasta el día de hoy.

Ricardo Cruz

Dedicatoria

La presente tesis la dedico con todo mi corazón a Dios ya que, gracias a él, è logrado concluir mi carrera, a mi amado padre Segundo Caisalitin por su sacrificio y esfuerzo por darme una carrera para mi futuro, a mi amada madre Teresa Yáñez (+) que desde el cielo siempre me protege y me da su bendición a lo largo de mi vida.

A mis queridos hermanos Nancy, Paola y Alex quienes con su amor y palabras de afecto no me dejaban decaer para que siguiera adelante.

A toda mi familia que es lo más valioso que dios me ha dado, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para poder cumplir mis ideales.

A mi novia Pamela por su amor quien me apoyo y me alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir

Por eso les doy mi trabajo en ofrenda a su paciencia y apoyo incondicional los amo.

Luis Caisalitin

Agradecimiento

Gracias a dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por permitirme cumplir con excelencia el desarrollo de esta tesis. Gracias por creer en mí y gracias a dios por permitirme vivir y disfrutar de cada día, de igual manera a la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE quien me abrió sus puertas para ser mejor persona y un excelente profesional.

Expreso mi gratitud al Ing. Leonidas Quiroz quien fue un excelente docente y tutor, que gracias a su apoyo y ayuda incondicional nos permitió realizar el trabajo de titulación; compartiéndonos sus conocimientos y siendo guía principal para culminarlo exitosamente. Agradezco al Dr. Trino Romero y a la Ing. Catherine Donoso como colaboradores externos quienes nos brindaron su apoyo científico para el desarrollo de este trabajo de titulación, por las facilidades para el desarrollo de las pruebas por el método oxidación – reducción con el micro reactor en el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

A nuestros compañeros ya que con ellos vivimos los buenos y malos momentos que solo se viven en la universidad y que con algunos más que compañeros fuimos verdaderos amigos.

Luis Caisalitin

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte de urkund	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Dedicatoria.....	8
Agradecimiento	9
Tabla de contenidos	10
Índice de tablas	15
Índice de figuras	17
Índice de ecuaciones.....	20
Resumen	21
Abstract.....	22
Planteamiento del problema de investigación	23
Antecedentes investigativos	23
Planteamiento del problema	25
Descripción resumida del proyecto	27
Justificación e Importancia	27

	11
Objetivos	29
<i>Objetivo general</i>	29
<i>Objetivos específicos</i>	29
Metas	30
Hipótesis.....	30
VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
<i>Variable Dependiente</i>	31
<i>Variable Independiente</i>	32
Metodología para el desarrollo de la investigación.....	32
<i>Método deductivo</i>	32
<i>Método inductivo</i>	33
<i>Método analítico</i>	33
<i>Método de síntesis</i>	33
<i>Método experimental</i>	33
<i>Método comparativo</i>	33
<i>Método de medición</i>	33
Marco teórico	34
Combustión	34
<i>Productos derivados de la combustión</i>	35
Convertidor catalítico	37
<i>Estructura</i>	38
Monolito.....	38
<i>Constitución interna</i>	39

	12
Tipos de convertidores catalíticos	40
<i>Convertidor catalítico de dos vías</i>	<i>40</i>
<i>Convertidor catalítico de tres vías</i>	<i>41</i>
Eficiencia del convertidor catalítico.....	41
Principio de funcionamiento del convertidor catalítico.....	42
<i>Etapa de oxidación</i>	<i>44</i>
<i>Etapa de reducción</i>	<i>45</i>
Temperatura de funcionamiento del convertidor catalítico	46
Desactivación del convertidor catalítico.....	47
<i>Envejecimiento</i>	<i>47</i>
<i>Envenenamiento</i>	<i>48</i>
<i>Contaminación por carbono</i>	<i>48</i>
Regeneración del convertidor catalítico	49
<i>Térmica: oxidación – reducción</i>	<i>49</i>
<i>Química</i>	<i>50</i>
Gases para el proceso de regeneración	50
<i>Oxígeno (O₂).....</i>	<i>51</i>
<i>Nitrógeno (N₂).....</i>	<i>52</i>
<i>Hidrógeno (H₂)</i>	<i>53</i>
Diseño de la propuesta	54
Sistema de calentamiento	54
<i>Manufactura del tubo.....</i>	<i>54</i>
<i>Calentamiento eléctrico.....</i>	<i>57</i>

	13
Sistema de control de temperatura.....	59
<i>Controlador.....</i>	<i>59</i>
<i>Termocupla tipo “K”</i>	<i>62</i>
<i>Fusibles</i>	<i>64</i>
<i>Relé de estado sólido.....</i>	<i>65</i>
Sistema de control de flujo de gases	67
<i>Flujómetros</i>	<i>67</i>
<i>Acoples, llaves y espigas</i>	<i>69</i>
Calibración de los flujómetros	71
<i>Procedimiento para calibrar los flujómetros de oxígeno y nitrógeno</i>	<i>72</i>
<i>Procedimiento para calibrar el generador de hidrógeno</i>	<i>77</i>
Análisis de los resultados obtenidos	81
Proceso de oxidación – reducción	81
Analizador de gases Kane AUTO plus	84
Análisis emisiones	84
<i>Análisis de la muestra M_1 con los gases de emisión.....</i>	<i>86</i>
<i>Análisis de la muestra M_2 con los gases de emisión</i>	<i>93</i>
Porcentaje de conversión de los gases de emisión.....	100
<i>Comparativa de valores de los gases de emisión entre las muestras M_1 y M_2.....</i>	<i>103</i>
Marco administrativo	108
Factibilidad de la investigación	108
<i>Recursos materiales.....</i>	<i>108</i>
<i>Recurso humano.....</i>	<i>109</i>

	14
<i>Recurso financiero</i>	110
<i>Recursos tecnológicos</i>	111
Conclusiones	112
Recomendaciones	115
Bibliografía	117
Anexos	120

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de la variable dependiente	31
Tabla 2 Operacionalización de la variable independiente	32
Tabla 3 Productos derivados de la combustión	36
Tabla 4 Conversión de los gases contaminantes y su efectividad.....	42
Tabla 5 Procesos químicos producidos en catalizadores de tres vías	43
Tabla 6 Propiedades del oxígeno (O_2)	51
Tabla 7 Propiedades del nitrógeno (N_2)	52
Tabla 8 Propiedades del hidrógeno (H_2).....	53
Tabla 9 Especificaciones generales del tubo redondo	55
Tabla 10 Tabla de alcance de salida de las termocuplas.....	61
Tabla 11 Datos para la calibración del flujómetro de oxígeno	74
Tabla 12 Datos para la calibración del flujómetro de nitrógeno	76
Tabla 13 Datos para la calibración del generador de hidrógeno.....	79
Tabla 14 Peso y dimensiones de las muestras del monolito	81
Tabla 15 Condiciones del proceso de oxidación	82
Tabla 16 Condiciones del proceso de reducción	83
Tabla 17 Variación de peso de las muestras antes y después del tratamiento.	83
Tabla 18 Campos de medición del analizador de gases Kane AUTOplus	84
Tabla 19 Gases de emisión a la salida del reactor sin catalizador.....	85
Tabla 20 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_1) a T ambiente	86
Tabla 21 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_1) a $T=100^\circ C$	87
Tabla 22 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_1) a $T=150^\circ C$	88

Tabla 23 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_1) a $T=200^{\circ}\text{C}$	89
Tabla 24 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_1) a $T=260^{\circ}\text{C}$	90
Tabla 25 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_2) a T ambiente	93
Tabla 26 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_2) a $T=100^{\circ}\text{C}$	94
Tabla 27 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_2) a $T=150^{\circ}\text{C}$	95
Tabla 28 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_2) a $T=200^{\circ}\text{C}$	96
Tabla 29 Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_2) a $T=260^{\circ}\text{C}$	97
Tabla 30 Porcentajes de conversión de los gases de emisión de la muestra M_1	101
Tabla 31 Porcentajes de conversión de los gases de emisión de la muestra M_2	102
Tabla 32 Comparativa de valores del CO entre las muestras M_1 y M_2	104
Tabla 33 Comparativa de valores del CO_2 entre las muestras M_1 y M_2	105
Tabla 34 Comparativa de valores del HC entre las muestras M_1 y M_2	107
Tabla 35 Recursos materiales	109
Tabla 36 Recurso humano.....	109
Tabla 37 Costo recurso material	110
Tabla 38 Gastos varios	111
Tabla 39 Recursos tecnológicos	111

Índice de figuras

Figura 1 <i>Árbol de problemas</i>	26
Figura 2 <i>Influencia de la relación de aire en la emisión de gases de escape</i>	34
Figura 3 <i>Gases procedentes de la combustión en un motor Ciclo Otto</i>	35
Figura 4 <i>Convertidor catalítico</i>	37
Figura 5 <i>Estructura de un convertidor catalítico</i>	38
Figura 6 <i>Constitución interna del monolito cerámico</i>	39
Figura 7 <i>Catalizador por oxidación</i>	40
Figura 8 <i>Catalizador de tres vías</i>	41
Figura 9 <i>Comportamiento de los gases antes del catalizador</i>	42
Figura 10 <i>Comportamiento de los gases después del catalizador</i>	43
Figura 11 <i>Conversiones químicas en un catalizador de dos vías (Oxidación)</i>	44
Figura 12 <i>Conversiones químicas en un catalizador de tres vías (Oxidación y reducción)</i>	45
Figura 13 <i>Temperatura de entrada y salida del convertidor catalítico</i>	47
Figura 14 <i>Maquinado de la rosca en el tubo</i>	55
Figura 15 <i>Perforación en el tapón</i>	56
Figura 16 <i>Bushing soldado en el tapón</i>	56
Figura 17 <i>Ensamble final del tubo reactor</i>	57
Figura 18 <i>Instalación de la resistencia eléctrica en el tubo reactor</i>	57
Figura 19 <i>Recubrimiento de la resistencia eléctrica</i>	58
Figura 20 <i>Fibra cerámica aislante de calor</i>	58
Figura 21 <i>Recubrimiento final de reactor</i>	59
Figura 22 <i>Controlador de temperatura REX-C 700 marca CAMSCO</i>	60

Figura 23 Controladores de temperatura.....	62
Figura 24 Termocupla tipo "K"	62
Figura 25 Termocupla a la salida del reactor	63
Figura 26 Conexión eléctrica de los controladores de temperatura con las termocuplas.....	64
Figura 27 Fusible y porta fusible marca CAMSCO	64
Figura 28 Relé de estado sólido (SSR).....	65
Figura 29 Conexión eléctrica del relé de estado sólido SSR	66
Figura 30 Esquema eléctrico del circuito de control	67
Figura 31 Fluviómetro de pared marca MADA.....	68
Figura 32 Instalación de los fluviómetros en la placa de acrílico	69
Figura 33 Acoples, llave on / off de 14 in	69
Figura 34 Control de flujo de gases	70
Figura 35 Sistema de tratamiento de monolitos	71
Figura 36 Fluviómetro de burbuja.....	72
Figura 37 Manómetros y llaves del tanque de oxígeno	72
Figura 38 Diagrama de linealidad para el oxígeno.....	75
Figura 39 Diagrama de linealidad para el nitrógeno.....	77
Figura 40 Calibración de generador de hidrógeno	78
Figura 41 Diagrama de linealidad para el hidrógeno	80
Figura 42 Emisión (HC, ppm) en función de la temperatura de la muestra M ₁	91
Figura 43 Emisión (% CO ₂) y (% CO) en función de la temperatura de la muestra M ₁	92
Figura 44 Emisión (HC, ppm) en función de la temperatura de la muestra M ₂	98
Figura 45 Emisión (% CO ₂) y (% CO) en función de la temperatura de la muestra M ₂	99

Figura 46 <i>Diagrama de linealidad de los gases de emisión de M_1</i>	101
Figura 47 <i>Diagrama de linealidad de los gases de emisión de M_2</i>	103
Figura 48 <i>Diagrama de linealidad del CO entre las muestras M_1 y M_2</i>	104
Figura 49 <i>Diagrama de linealidad del CO₂ entre las muestras M_1 y M_2</i>	106
Figura 50 <i>Diagrama de linealidad del HC entre las muestras M_1 y M_2</i>	107

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 <i>Reacciones de la oxidación que se genera con O₂</i>	44
Ecuación 2 <i>Reacciones de oxidación/reducción que se generan con NO</i>	46
Ecuación 3 <i>Cálculo de porcentaje de gases de emisión por componente</i>	100

Resumen

La presente investigación está enfocada al estudio de la regeneración de los metales de monolito de convertidores catalíticos de vehículos a gasolina, mediante la ejecución del método de oxidación – reducción a temperatura programada, tiempo de exposición y flujo constante de gases inertes como N_2 y H_2 . De acuerdo a la forma y dimensiones de la estructura del monolito de los catalizadores de prueba, se tomó muestras de forma rectangular con un peso de 4,195 g y un corte de aristas de 20 mm x 20 mm x 20 mm para el estudio. Se realizó el proceso de diseño y manufactura de un micro reactor para el tratamiento de metales del monolito de convertidores catalíticos comerciales usados de 2 vías y 3 vías. Se analizó el comportamiento de emisiones de cada uno de los gases después de la regeneración con el uso de un analizador de gases insertado directamente al reactor con las muestras tratadas en un vehículo sin catalizador, con lo cual se determinó que mediante este proceso de oxidación - reducción se recuperan las especies del monolito catalítico; así mejorando el proceso catalítico de la conversión de emisiones nocivas a gases inocuos producto de los procesos de combustión en fuentes móviles (vehículos).

Palabras clave:

- **MONOLITO**
- **CONVERTIDORES CATALÍTICOS**
- **OXIDACIÓN - REDUCCIÓN**
- **REGENERACIÓN**

Abstract

The present research is focused on the study of the regeneration of metal of the monolith of catalytic converter of gasoline vehicles, through the execution of the oxidation-reduction method at programmed temperature, exposure time and constant flow of inert gases such as N_2 and H_2 . According to the shape and dimensions of the monolith structure of the test catalysts, rectangular samples with a weight of 4,195 g and a 20 mm x 20 mm x 20 mm edge cutting, were taken for the study. The design manufacturing process of a micro-reactor for the treatment of metals of the monolith of used commercial 2-way and 3-way catalytic converters was carried out. The emission behavior of each of the gases after regeneration was analyzed with the use of a gas analyzer inserted directly into the reactor with the samples treated in a vehicle without catalyst, with which it was determined that through this oxidation-reduction process the species of the catalytic monolith; thus, improving the catalytic process of the conversion of harmful emissions to harmless gases, product of combustion processes in mobile sources (vehicles).

Key words:

- **MONOLITH**
- **CATALYTIC CONVERTERS**
- **OXIDATION - REDUCTION**
- **REGENERATION**

CAPÍTULO I

1. Planteamiento del problema de investigación

1.1 Antecedentes investigativos

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), el número de vehículos matriculados en el 2017 fue de 2,237.264 millones; que comprende un incremento de 8,8% del año anterior, según (INEC, 2018) “El continuo crecimiento del parque automotor en el Ecuador y a los escasos controles por parte de las autoridades encargadas del área ambiental, han generado un aumento en los niveles de contaminación de la atmósfera en las zonas urbanas” (pág. 5)

La contaminación ambiental producida por el parque automotor en la ciudad de Latacunga, se ha convertido en un tema preocupante debido a las consecuencias que este produce, además de los efectos que causa en el ser humano.

Según (Garzon, 2018) “la OMS, Latacunga es la cuarta ciudad más contaminada del Ecuador después de Santo Domingo, Milagro y Quito. Esta contaminación atmosférica es causada por los vehículos que utilizan combustibles de baja calidad como la gasolina extra, según la dirección Nacional de Hidrocarburos del Ecuador” (pág. 15)

Desde la existencia de la norma NTE 2204 a finales de 1999, todos los vehículos poseen un sistema de inyección electrónica de combustible, en el cual es necesario emplear un convertidor catalítico para reducir los contaminantes producidos por el motor; y establecer los límites máximos de emisiones para automóviles a gasolina, ubicados en la categoría M con límites de: $2,3 \frac{g}{km}$ de CO, $0,2 \frac{g}{km}$ de HC, y 0,15 de NO_x (INEN, s.f.)

Los convertidores catalíticos agotados de los automóviles están asociados con la cantidad de automotores en el Ecuador, una vez transcurrido la vida útil del catalizador este se

convierte en un desecho ambiental, el cual no se puede eliminar por procesos simples debido a su estructura cerámica y la presencia de metales nobles.

Los convertidores catalíticos presentan una gran efectividad en eliminar los gases tóxicos provenientes de la combustión de los automóviles. Esto gracias a los metales del grupo VIIIb de la Tabla Periódica: Platino (Pt), Paladio (Pd) y Rodio (Rh) que contienen y que son excelentes catalizadores para eliminar los gases de escapes, los cuales llegan a deteriorarse principalmente por pérdida de superficie activa mediante la disminución de dispersión de los metales y/o el bloqueo por deposición de coque y envenenamiento por interacción con azufre y fósforo u otro elemento proveniente de la descomposición de los agentes lubricantes de los aceites para automóvil (Centi, 2000, pág. 289).

Los factores que influyen en el deterioro de los convertidores catalíticos suelen ser clasificados en tres grupos: térmicos, químicos y mecánicos que pueden estar asociados o actuar separadamente, pero como resultado final siempre es la pérdida de actividad catalítica, por lo que muchos investigadores se han dedicado a estudiar formas de recuperación de los convertidores o la manera de la recuperación de sus metales (Rincon, Asencio, Camarillo, & Martín, 2008, pág. 10)

En la actualidad los convertidores catalíticos presentan como especies activas a los metales nobles Pt, Pd, Rh, debido a su alto costo y su limitada disponibilidad es importante utilizar menos concentraciones de los mismos en la eliminación de gases contaminantes producidos en la combustión, sin perder el control en las emisiones dadas por las regulaciones existentes.

Por ello se ha planteado el estudio de procesos de recuperación de los convertidores catalíticos usados de desechos que permiten ser reusados de manera eficiente y que tengan un

alto impacto ambiental en la eliminación de emisiones y en la minimización de estos como pasivo ambiental.

1.2 Planteamiento del problema

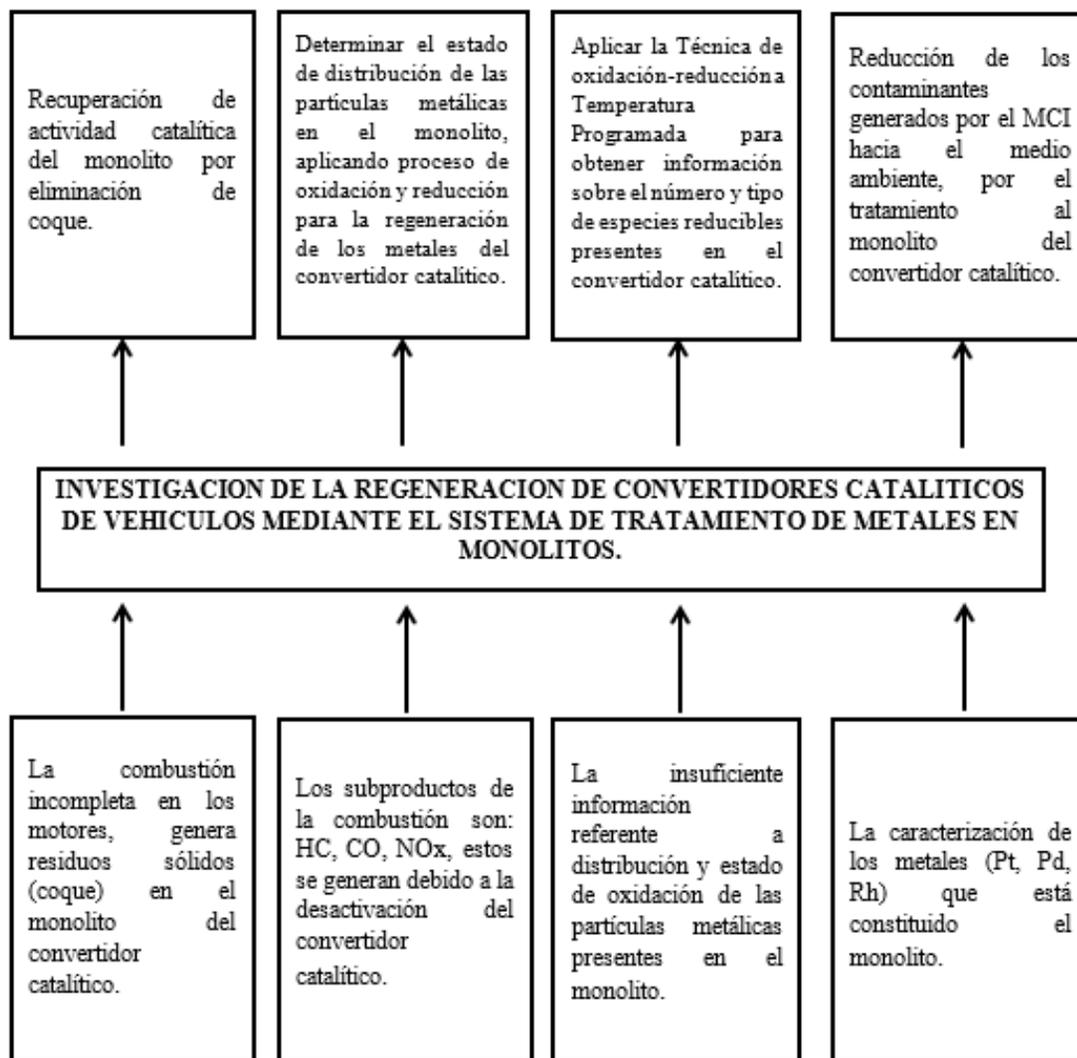
La investigación tiene por motivación la problemática actual frente al reciclado de los convertidores catalíticos gastados considerados desechos automotrices, al no poder ser procesados en fundiciones comunes de chatarra por su contenido cerámico, produciendo así contaminación ambiental, por lo que se ha propuesto dar un uso alternativo, que genere beneficios económicos al país, mediante un método de regeneración de los mismos, que permita la recuperación de los metales como lo es el platino (Pt), paladio (Pd) y rodio (Rh) que forma parte de los convertidores catalíticos automotrices mediante un proceso oxidación-reducción.

Necesariamente se debe tener en cuenta los subproductos de la combustión principalmente: Hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), que perjudican el ambiente como consecuencia de la desactivación de los metales activos del convertidor catalítico y desgaste del material catalizador.

La presente investigación encontró posibles soluciones a la problemática, que es la de no contar con información suficiente referente a pruebas de laboratorio, para tratamiento de monolitos, de manera que estos catalizadores puedan ser reutilizados, mediante el estudio de la superficie metálica del convertidor catalítico cuando se aplican procesos como la oxidación y la reducción de los mismos.

Figura 1

Árbol de problemas



Nota: En el gráfico se puede observar el árbol de problemas como consecuencia de una combustión incompleta causando desgaste, envenenamiento en los catalizadores automotrices y mediante la ejecución del sistema de tratamiento de metales, recuperar su actividad catalítica para ser regenerados.

1.3 Descripción resumida del proyecto

En el proyecto “Investigación de la regeneración de convertidores catalíticos de vehículos mediante el sistema de tratamiento de metales en monolitos”, se desarrolló de la siguiente manera:

Recopilación de la información técnica de fuentes confiables que fundamenten la regeneración de los metales del monolito en los convertidores catalíticos de una manera científica, mediante la ejecución del método de oxidación – reducción a temperatura y tiempo programado.

Investigación de los catálogos, fichas técnicas y manuales de catalizadores de dos vías y tres vías que permitirán conocer las características de funcionamiento, parámetros de fabricación y la confiabilidad de utilización, para la selección del catalizador que será elemento de estudio.

Se diseñó e implementó un sistema de reacción para el tratamiento de metales del monolito para convertidores catalíticos de 2 vías y 3 vías para su limpieza y regeneración.

Se ejecutó pruebas con un analizador de gases en un vehículo para comparar las emisiones generadas por el convertidor catalítico regenerado y uno nuevo, de tal manera de validar la técnica de regeneración de la fase activa de los mismos.

1.4 Justificación e Importancia

En el Ecuador los sistemas de control de emisión de gases relacionado a los combustibles comienzan a generalizarse a partir de 1996, cuando se elimina el contenido plomo en los mismos; posteriormente aparece la regulación de emisiones de los automotores, normas INEN NTE 2204 Y 2207; en las que se establecen los límites de emisiones para motores a gasolina y diésel, respectivamente. (INEN, s.f.).

Tomando en cuenta que el convertidor catalítico al realizar su función, con el paso de tiempo de operación se va acumulando restos de carbón (coque) debido a la combustión incompleta y a la calidad en los combustibles, lo cual hace que en el catalizador acorte su tiempo de vida y se deteriore con mayor rapidez, lo que obligaría a cambiarlo por uno nuevo, o en su defecto darle un mantenimiento al mismo, pero en un periodo prudente de uso.

Existen aditivos a base de hidrocarburos aromáticos que ayudan a limpiar el catalizador del convertidor catalítico, pero se incurre en el uso de productos que también generan contaminación, además los aromáticos producen cáncer de la sangre, leucemia, por lo que su uso es restringido en la gran mayoría de los países industrializados, que llevan varios años en el control y prevención de la contaminación.

Debido al costo del convertidor catalítico, no es factible económicamente el recambio seguido del mismo a causa del deterioro producto del exceso de hollín, tomando en cuenta que es necesario para la transformación de los gases nocivos producto de la combustión logrando la conservación del ambiente y el cumplimiento de las normativas vigentes en el país, por lo que es necesario la búsqueda de métodos de limpieza y reutilización de los mismos.

Por ello se realizó la “INVESTIGACIÓN DE LA REGENERACIÓN DE CONVERTIDORES CATALÍTICOS DE VEHÍCULOS MEDIANTE EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE METALES EN MONOLITOS”.

Con el cual se busca la reutilización de los convertidores catalíticos logrando que de esta manera sigan cumpliendo con su función durante un mayor tiempo, y tratando de disminuir el nivel de contaminación producido por los vehículos, tomando en cuenta la normativa que rige en el país INEN 2204.

Cumpliendo con el objetivo 3, del Eje 1 del Plan Nacional del Buen Vivir en donde se menciona que: “Existe una responsabilidad ética con las actuales y futuras generaciones para: mantener, precautelar y dar soporte a la vida en todas sus formas; reconocer el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, garantizando la sostenibilidad y el Buen Vivir. Estos son los grandes desafíos que el Estado y la sociedad ecuatoriana deben mantener y profundizar” (SENPLADES, 2017, pág. 64)

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Investigar la regeneración de convertidores catalíticos de vehículos mediante el sistema de tratamiento de metales en monolitos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Diseñar un micro - reactor que permita realizar las pruebas de regeneración mediante el método de oxidación-reducción de metales.
- Construir un micro reactor con materiales que permitan una óptima transferencia de calor interna en el mismo, que permita controlar la temperatura para realizar las pruebas de regeneración.
- Especificar la puesta en operación de los sistemas de reacción para realizar las pruebas de regeneración.
- Adecuar muestras de monolito de forma de prisma rectangular de dimensiones 20 mm x 20 mm x 20 mm para realizar los análisis de la superficie metálica antes y después de los procesos de oxidación - reducción.

- Ejecutar pruebas con un analizador de gases en un vehículo para comparar las emisiones generadas por el convertidor catalítico regenerado y uno nuevo, de tal manera de validar la técnica de regeneración de la fase activa de los mismos.
- Establecer las condiciones óptimas para la regeneración efectiva de los metales en la superficie del convertidor catalítico usado.

1.6 Metas

- Diseñar y construir un micro reactor para realizar las pruebas de regeneración en la superficie metálica del monolito.
- Crear e implementar un protocolo para realizar pruebas de laboratorio del monolito, donde se establezca el mayor campo de acción indicando cantidades de muestras estudiadas para encontrar el 60% de fiabilidad de estudio, evidenciando resultados medibles, sujetos a comprobación.
- Los resultados serán utilizados para realizar posteriores estudios de tratamiento de monolito y como se da la regeneración de los metales, sea el caso de la limpieza del convertidor catalítico, en la que como dato técnico específico es la temperatura, flujo de gases y el tiempo de exposición.
- La interpretación de los resultados, marca un eje fundamental, para toda persona que lea la investigación debe entender el proceso que se ejecutó para llegar a los datos citados, dejando el núcleo fundamental de la investigación.

1.7 Hipótesis

¿Es posible reducir en un 70% los niveles iniciales de los gases de emisión de CO, HC, NOx provenientes del convertidor catalítico gastado, luego de la regeneración por el método de oxidación - reducción del monolito?

1.8 Variables de la investigación

1.8.1 Variable Dependiente

Tratamiento de los metales del monolito en convertidores catalíticos de automóviles.

Tabla 1

Operacionalización de la variable dependiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Tratamiento de la superficie de los metales del monolito en convertidores catalíticos de automóviles.	Estudio de los efectos de	Flujo de gas	cc * s ⁻¹	Medición	Sistema de control de flujo de gases
	flujo de gases, temperatura y	Temperatura	°C	Medición	Sistema de control electrónico
	tiempo en el monolito	Tiempo	s	Medición	Cronómetro

Nota: En esta tabla se puede observar las variables dependientes que se determinaron para este proyecto de investigación.

1.8.2 Variable Independiente

Catalizador para la regeneración de los metales.

Tabla 2

Operacionalización de la variable independiente

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Selección del catalizador para el estudio de la regeneración de metales	Propiedades fisicoquímicas	Velocidad de calentamiento	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	Registro de datos	Hoja de datos
		Flujo de la mezcla $\text{O}_2 - \text{N}_2$	$\text{cc} \cdot \text{s}^{-1}$	Medición Registro de datos	Hoja de datos
		Flujo de la mezcla $\text{H}_2 - \text{N}_2$	$\text{cc} \cdot \text{s}^{-1}$	Medición Registro de datos	Hoja de datos

Nota: En esta tabla se puede observar las variables independientes que se determinaron para este proyecto de investigación.

1.9 Metodología para el desarrollo de la investigación

La metodología para la realización de la investigación de la regeneración de convertidores catalíticos de vehículos mediante procesos de oxidación- reducción de metales en monolitos, consisten en establecer información, adaptable a estudios y tratamientos de convertidores catalíticos, que contribuirán a optimizar la reutilización de los mismos. Para ello se seguirá el método de investigación científica que se cita a continuación:

1.9.1 Método deductivo

La investigación se basó en obtener muestras de un convertidos catalítico usado, que luego del proceso de regeneración se trató con gases reales de la combustión procedentes del vehículo; para determinar el grado de recuperación de los metales.

1.9.2 Método inductivo

Mediante este método se determinó los índices de desactivación del convertidor catalítico y se contrarrestó los efectos para la recuperación eficiente en la eliminación de los gases de escape.

1.9.3 Método analítico

Para la investigación se analizó los diferentes parámetros que intervienen en la funcionalidad del catalizador, así como los principios de desgaste que hacen que el monolito se convierta en un elemento del vehículo desechable.

1.9.4 Método de síntesis

El método abarca los valores y datos precisos, que representan la composición química y dimensiones del monolito gastado a estudiar, las condiciones de operación del sistema de oxidación – reducción y los parámetros a considerar para la regeneración del convertidor.

1.9.5 Método experimental

Por medio de la metodología experimental se mostró la esencia de la investigación. Los análisis de caracterización de los convertidores catalíticos permiten determinar el grado de deterioro y la metodología a utilizar para su recuperación.

1.9.6 Método comparativo

Mediante el método comparativo de antes y después de regenerado el convertidor catalítico de dos vías y tres vías se estableció parámetros de los procesos de oxidación – reducción, que permitió su recuperación y re – uso.

1.9.7 Método de medición

La aplicación del método de medición permitió conocer las características que poseen los convertidores catalíticos de dos vías y tres vías a estudiar.

CAPÍTULO II

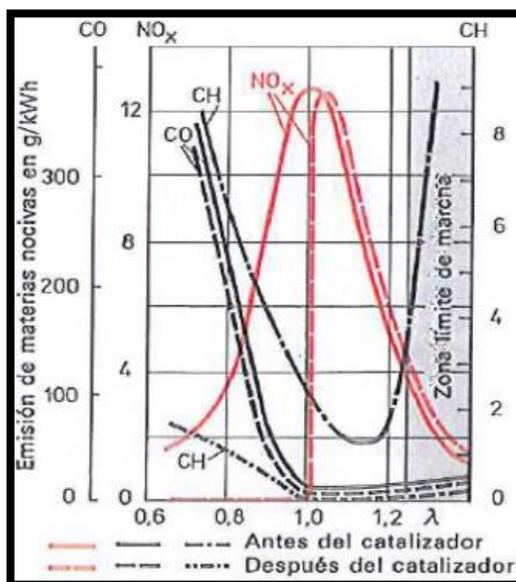
2. Marco teórico

2.1 Combustión

De acuerdo con (Gerschler, 1985), la combustión se produce por una reacción química en la cual existe un elemento combustible, un carburante y una fuente de energía dando como resultado los gases residuales de la combustión, en un motor de combustión interna en la teoría se habla de una mezcla estequiométrica; pero es imposible lograrlo por diferentes elementos presentes en la combustión de la mezcla aire - combustible.

Figura 2

Influencia de la relación de aire en la emisión de gases de escape



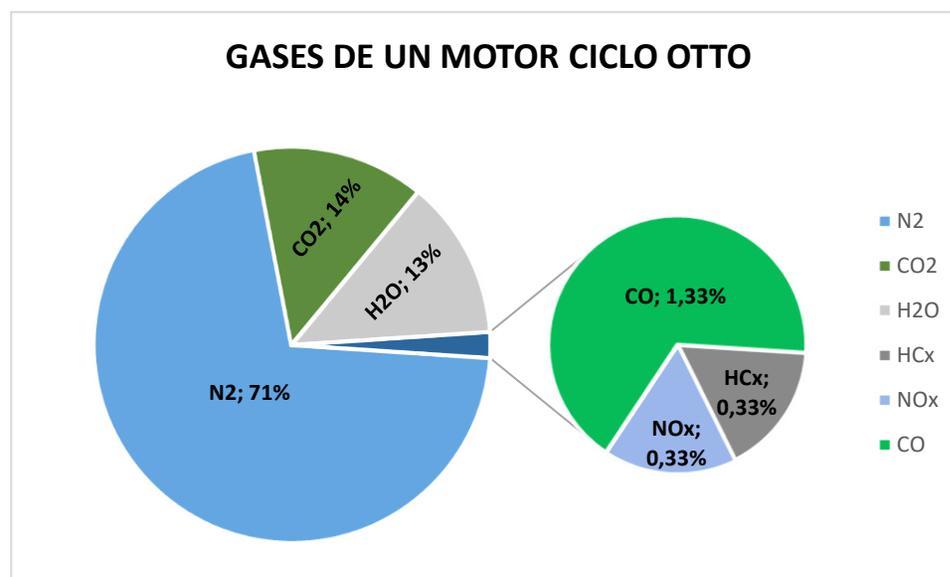
Nota: En el gráfico se puede observar la relación de emisiones vs. el factor lambda para las condiciones de mezcla pobre, estequiométrica y rica. (Gerschler, 1985, pág. 290)

2.1.1 Productos derivados de la combustión

En la combustión al quemar la mezcla aire – combustible, esta produce gases de escape entre los cuales se menciona los componentes principales no tóxicos como son el nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y vapor de agua (H_2O) y los componentes secundarios tóxicos que afectan directamente al ser humano son el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos nítricos (NO_x). Además de un gas que afecta directamente a la atmósfera como es el dióxido de carbono (CO_2). (Bosch, 1996)

Figura 3

Gases procedentes de la combustión en un motor Ciclo Otto



Nota: En el gráfico se puede observar los gases en porcentaje, productos de la combustión de un motor Ciclo Otto. (Pérez Belló, 2011).

Tabla 3

Productos derivados de la combustión

PRODUCTOS DERIVADOS DE LA COMBUSTIÓN	
Nitrógeno N₂	Parte de los componentes del aire para la obtención de la mezcla aire - combustible en un 71% en volumen.
Oxígeno O₂	Parte de los componentes del aire que ingresa a los cilindros en un 21% en volumen y es evacuado por el escape entre 0,5 y 3%.
Vapor de agua (H₂O)	Producido en mínima cantidad como resultado de la combustión y se forma por la condensación en las líneas de escape.
Dióxido de carbono (CO₂)	Está presente en el aire en un 0,03%; en un máximo rendimiento en el motor se conseguirá un 15% de gases residuales siendo un indicativo del estado del motor.
Monóxido de carbono (CO)	Se encuentra presente en los gases de escape en un 1% y puede ascender hasta un 4% en un sistema sin catalizador.
Hidrocarburos (HC)	Se originan por la combustión incompleta y estos no deben superar 100 ppm, cuanto más pobre la mezcla menor HC emite el vehículo.
Óxidos nítricos (NO_x)	Es el gas más difícil de neutralizar ya que sus emisiones son más altas comparadas con los demás, el valor máximo de obtención se da cuando su rendimiento térmico y volumétrico se aproximé a la dosificación estequiométrica ($\lambda=1$)

Nota: En esta tabla se puede observar una breve descripción de los productos derivados de la combustión de un motor Ciclo Otto (Pérez Belló, 2011)

2.2 Convertidor catalítico

El convertidor catalítico está compuesto de una fase activa de metales nobles como el platino (Pt), paladio (Pd) y rodio (Rh) que aceleran las reacciones químicas de transformación de los gases de emisión producto de la combustión incompleta del combustible del motor de combustión interna, como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx). Además, de ser altamente selectivos a la transformación de estos en agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂). (Pérez Belló, 2011)

Figura 4

Convertidor catalítico



Nota: En el gráfico se puede observar un convertidor catalítico de tres vías de un vehículo a gasolina. (Calleja, 2015, pág. 275)

Según (Crouse, 2007), el funcionamiento correcto del convertidor catalítico requiere que la fase activa metálica entre en contacto con los gases de la combustión. Los cilindros deben recibir una mezcla de aire-combustible con una relación estequiométrica de 14,7 kg de aire por 1 kg de gasolina, variaciones de esta relación producen grandes incrementos en las emisiones de gases de escape, una solución a dicho problema es la utilización de un sistema de inyección de

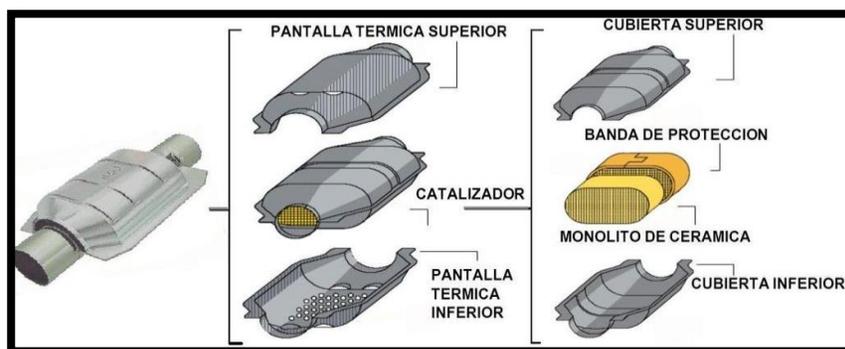
combustible controlado electrónicamente recibiendo así la mayor parte de las condiciones adecuadas de operación en la dosificación de la mezcla estequiométrica.

2.2.1 Estructura

Internamente, un catalizador tiene varios componentes como el monolito ya sea cerámico o metálico que contiene en su interior metales nobles, además posee un aislante térmico encargado de sujetar al monolito con la estructura externa y un deflector cuya función es aislar los componentes del vehículo del calor emanado por el mismo, dependiendo del tipo de convertidor catalítico y su aplicación se cuenta o no con una toma de aire adicional (Pérez Belló, 2011).

Figura 5

Estructura de un convertidor catalítico



Nota: En el gráfico se puede observar los elementos externos e internos que constituye un convertidor catalítico automotriz. Recuperado de (Valero Fernandez, 2014, pág. 38)

2.3 Monolito

Según (Pérez Belló, 2011), los monolitos son fabricados de materiales metálicos o de cerámica; su estructura interna tiene forma de panel donde se producen las reacciones químicas de oxidación y reducción, en su estructura externa se depositan recubrimientos de óxido de aluminio conocidos como “wash coat”, cuya función es ampliar el área superficial de contacto

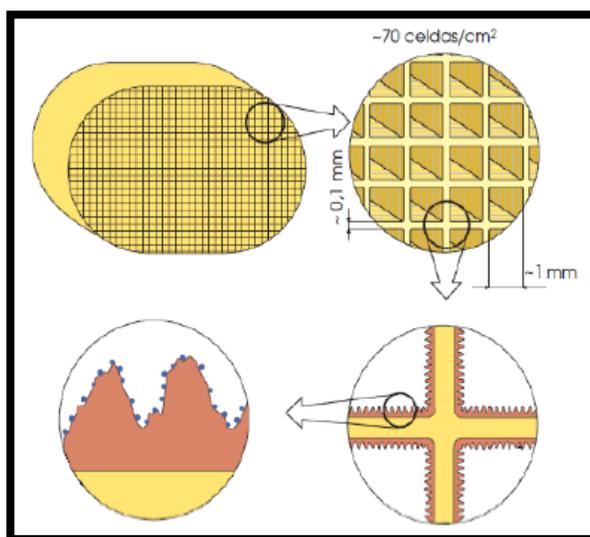
de los gases de escape con los metales nobles presentes en el monolito en unas 7000 veces mayor, permitiendo así diseñar un catalizador mucho más reducido.

2.3.1 Constitución interna

El convertidor catalítico está constituido de un monolito de forma oval o cilíndrica con estructura de múltiples celdas en forma de panal, con una densidad de 450 celdas por cada pulgada cuadrada (70 celdas por centímetro cuadrado). La superficie activa del catalizador está constituida por metales preciosos como son el platino (Pt) y/o paladio (Pd), que conducen a la oxidación completa de los gases de escape de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC). Por otra parte, contienen el rodio (Rh) que conduce a la reducción de los óxidos nítricos (NO_x). (Calleja, 2015)

Figura 6

Constitución interna del monolito cerámico



Nota: En el gráfico se puede observar a detalle la constitución interna del monolito cerámico, donde se aprecia el número de celdas con su espesor y dimensiones. (Calleja, 2015, pág. 275)

Las concentraciones de los metales preciosos contenidos en el monolito están alrededor de los 0.1 % – 0.15 %, con una relación platino (Pt) – paladio (Pd) de 2.5 a 1 y platino (Pt) – rodio (Rh) de 5 a 1. De dichas concentraciones se sabe que están presentes de 1 gramo a 2 gramos en los convertidores catalíticos. (Calleja, 2015)

2.4 Tipos de convertidores catalíticos

Un convertidor catalítico se distingue según el número de vías, de acuerdo al gas de emisión que se requiere transformar, para ello se dispone de los metales nobles de platino (Pt), paladio (Pd) y rodio (Rh) para tal fin. Disminuyendo los gases contaminantes a porcentajes dentro de la norma y clasificándose de la siguiente manera:

2.4.1 *Convertidor catalítico de dos vías*

También llamados catalizadores de oxidación, se encargan de transformar el monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) no combustionados producto de la combustión incompleta del motor, es necesario la aportación de aire adicional en el escape para introducir mayor cantidad de oxígeno que favorezca la oxidación. (Calleja, 2015)

Figura 7

Catalizador por oxidación



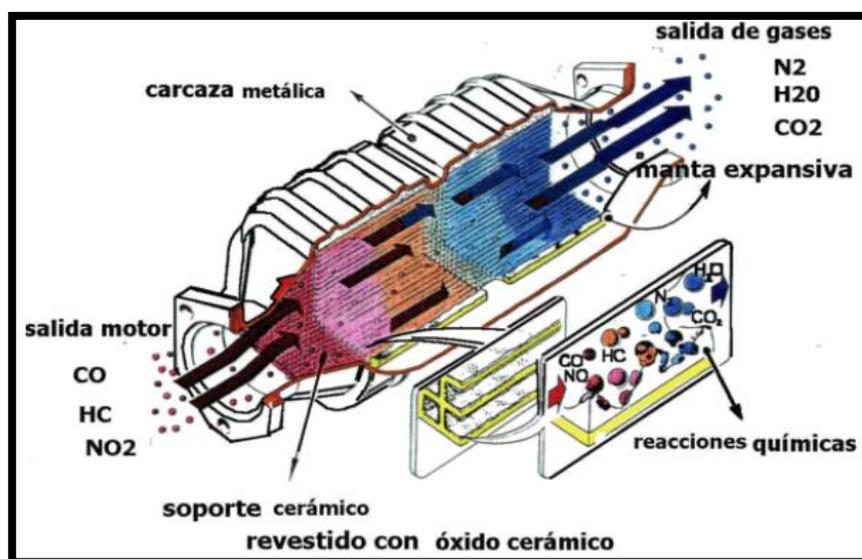
Nota: En el gráfico se puede observar un catalizador de dos vías, donde se produce la reacción química de oxidación del CO y HC; transformándolos a su salida en CO₂ y H₂O. (Vázquez, s.f.)

2.4.2 Convertidor catalítico de tres vías

Estos tipos de catalizadores sofisticados son usados en la actualidad en motores a gasolina, los cuales han desplazado a los catalizadores de oxidación completa. Se utiliza como catalizador a los metales como el platino (Pt), paladio (Pd) y rodio (Rh) para reducir los gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no combustionados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x). (Paz Guitian, 1999)

Figura 8

Catalizador de tres vías



Nota: En el gráfico se puede observar un catalizador de tres vías, donde se produce las reacciones químicas de oxidación – reducción del CO, HC y NO₂; transformándolos a su salida en CO₂, H₂O y N₂. (MOTORGIGA, s.f.)

2.5 Eficiencia del convertidor catalítico.

La eficiencia en los catalizadores nuevos es del 95 %, pero al llegar a los 3000 km esta eficiencia disminuye y se estabiliza entre el 80 % y 90 % para la etapa de oxidación y entre 70 % y 75 % para la etapa de reducción, valores que son constantes hasta el final de su vida útil que

están sobre los 80.000 km en sistemas controlados electrónicamente conocidos como de lazo cerrado; en el que actúa el sensor de oxígeno (sonda lambda) admitiendo la dosificación de la mezcla estequiométrica. (Álvarez Flórez, 2005)

Tabla 4

Conversión de los gases contaminantes y su efectividad

Gas inicial	Producto	Efectividad (%)
Hidrocarburos HC	CO ₂	80 - 90
Monóxido de carbono CO	CO ₂ + H ₂ O	80 - 90
Óxidos nítricos NO _x	N ₂ + O ₂	70 - 75

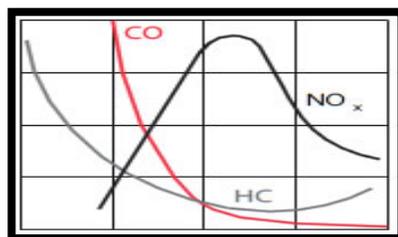
Nota: En esta tabla se puede observar la efectividad del convertidor catalítico luego de los procesos de oxidación y reducción en el control de emisiones. (Álvarez Flórez, 2005, pág. 364)

2.6 Principio de funcionamiento del convertidor catalítico

Los actuales convertidores catalíticos realizan dos tipos de reacciones químicas la de oxidación y reducción. Los motores a gasolina requieren de estas dos reacciones químicas para neutralizar los gases contaminantes que estos producen, el proceso de reducción por sus características demanda de una dosificación estequiométrica por lo cual los motores poseen un sistema de alimentación de control electrónico con regulación lambda. (Pérez Belló, 2011)

Figura 9

Comportamiento de los gases antes del catalizador

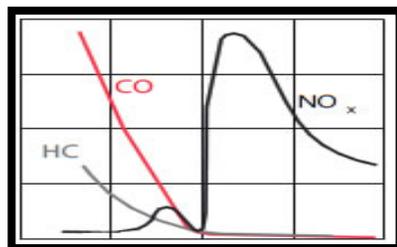


Nota: En el gráfico se puede observar las curvas características de los productos derivados de la combustión como es el CO, HC y NO_x sin catalizador. (GUIA AUTOMOTRIZ, s.f.)

Al pasar los gases de escape por el catalizador, entran en contacto con los metales preciosos produciendo las reacciones químicas de oxidación y reducción.

Figura 10

Comportamiento de los gases después del catalizador



Nota: En el gráfico se puede observar las curvas características de los productos derivados de la combustión como es el CO, HC y NOX con catalizador. (GUIA AUTOMOTRIZ, s.f.)

La limpieza catalítica se basa en los procesos químicos de reducción que consiste en la extracción de oxígeno y el proceso de oxidación que es la adición de oxígeno a los componentes de los gases de escape como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5

Procesos químicos producidos en catalizadores de tres vías

PROCESOS QUÍMICOS PRODUCIDOS EN CATALIZADORES DE 3 VÍAS			
<i>Proceso</i>	<i>Entrada</i>	<i>Combinación</i>	<i>Salida</i>
Oxidación	CO	O ₂	CO ₂
Oxidación	Gasolina	O ₂	CO ₂ + H ₂ O
Reducción	NO _x	CO	CO ₂ + N ₂

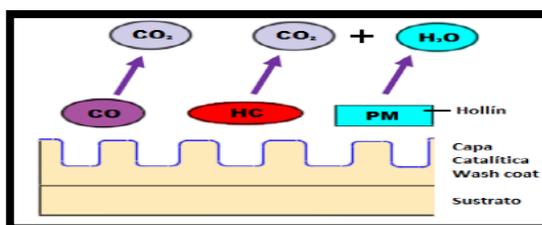
Nota: En esta tabla se puede observar los procesos químicos que se producen en el interior del catalizador de 3 vías, al entrar en contacto los gases de escape con los metales preciosos. (GUIA AUTOMOTRIZ, s.f.)

2.6.1 Etapa de oxidación

En el proceso de oxidación el monóxido de carbono (CO) y el oxígeno (O₂) al absorberse en la superficie metálica de Platino (Pt) y/o Paladio (Pd) se transforma en dióxido de carbono (CO₂). Los hidrocarburos no combustionados (HC) que al entrar en contacto con el Platino (Pt) y/o Paladio (Pd) en presencia del oxígeno (O₂) se transforman en dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O). (Pérez Belló, 2011)

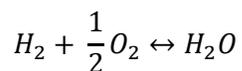
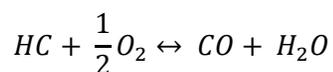
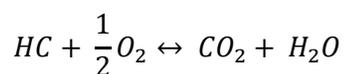
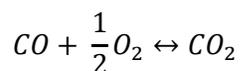
Figura 11

Conversiones químicas en un catalizador de dos vías (Oxidación)



Nota: En el gráfico se observa el proceso de oxidación en la superficie del monolito de un convertidor catalítico de dos vías. (Pérez Belló, 2011, pág. 379)

Las siguientes reacciones químicas muestran la transformación de hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) como una ecuación de transformación completa de dichas sustancias.



Ecuación 1

Reacciones de la oxidación que se genera con O₂

Donde:

CO: Monóxido de carbono (mol)

CO₂: Dióxido de carbono (mol)

HC: Hidrocarburos (mol)

H₂O: Vapor de agua (mol)

O₂: Oxígeno (mol)

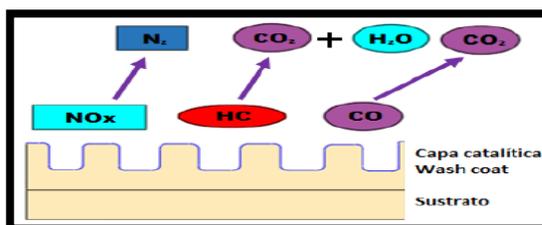
H₂: Hidrógeno (mol)

2.6.2 Etapa de reducción

El proceso de reducción comprende la eliminación de los óxidos nítricos NO_x, mediante la reacción con el CO en presencia del rodio (Rh) para convertirse en dióxido de carbono CO₂ y nitrógeno N₂. (Pérez Belló, 2011)

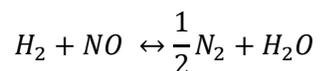
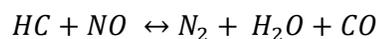
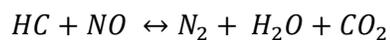
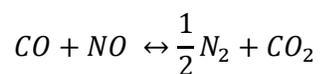
Figura 12

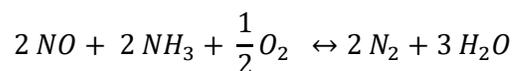
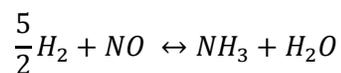
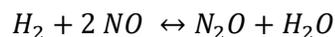
Conversiones químicas en un catalizador de tres vías (Oxidación y reducción)



Nota: En el gráfico se observa el proceso de oxidación/reducción en la superficie del monolito de un convertidor catalítico de tres vías (Pérez Belló, 2011, pág. 379)

En las siguientes ecuaciones se muestra la transformación completa del NO_x por medio de reacciones químicas que ocurren en dicho proceso.





Ecuación 2

Reacciones de oxidación/reducción que se generan con NO

Donde:

CO: Monóxido de carbono (mol)

CO₂: Dióxido de carbono (mol)

HC: Hidrocarburos (mol)

NO: Óxido de nitrógeno (mol)

NH₃: Amoníaco (mol)

H₂O: Vapor de agua (mol)

O₂: Oxígeno (mol)

H₂: Hidrógeno (mol)

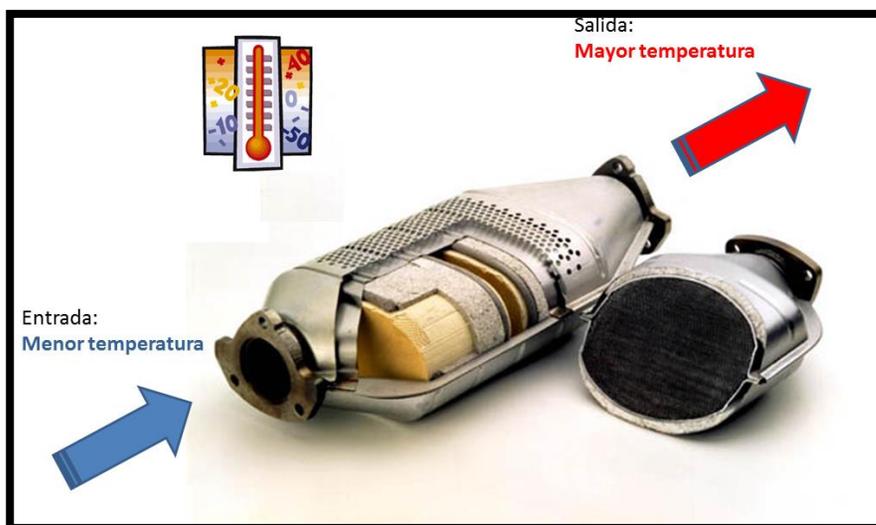
N₂: Nitrógeno (mol)

2.7 Temperatura de funcionamiento del convertidor catalítico

La eliminación de los gases de escape por el catalizador ocurre alrededor de los 200 °C a 250 °C. El funcionamiento normal del catalizador va desde los 400 °C y 800 °C; ya que a la temperatura de 200 °C no presenta actividad y al alcanzar la temperatura de 800 °C se produce la degradación de los metales del catalizador conduciendo al envejecimiento térmico del mismo. Por encima de los 1000 °C a 1400 °C existe una sinterización de los metales nobles y en caso de un monolito cerámico puede producirse la fusión del mismo. (Robles, 2003)

Figura 13

Temperatura de entrada y salida del convertidor catalítico



Nota: En el gráfico se puede observar que la temperatura a la salida del convertidor catalítico es mayor que la temperatura de entrada, con una diferencia de 20 °C a 50 °C. (Herranz, 2015)

2.8 Desactivación del convertidor catalítico

La actividad catalítica de los catalizadores de tres vías posee un área superficial dominante en la cual se localizan los metales nobles activos. Dicha actividad se deteriora con el pasar del tiempo y el uso, revelando una disminución de su superficie activa debido a la presencia de coque y de la dispersión de los metales nobles, debido a fenómenos de sinterización ocasionados por temperaturas de trabajo elevadas. (Asencio, Rincón, Camarillo, & Martín, 2008)

2.8.1 Envejecimiento

Según (Asencio, Rincón, Camarillo, & Martín, 2008), el envejecimiento se debe a las elevadas temperaturas de operación, que superan los 800 °C. El sustrato y los metales activos se

ven afectados a estas condiciones de trabajo, presentando cambios cristalográficos en los componentes del sustrato, interacciones entre metales activos y aleaciones, que reducen la actividad catalítica debido a la pérdida de los espacios activos del catalizador. Esta desactivación térmica generalmente es irreversible, ya que en casos en los que se ha producido pérdida de dispersión debido a la sinterización de partículas metálicas, se puede recuperar parte de la actividad catalítica perdida re - dispersando el metal en la superficie.

2.8.2 Envenenamiento

La pérdida de actividad catalítica es causada por la quimisorción de impurezas presentes en la mezcla reaccionante, ya que la adsorción sobre la superficie del monolito es afectada y se produce el envenenamiento catalítico. Existen varios compuestos propios del combustible o agregados como los aditivos ya sean para combustibles o aceites lubricantes, que actúan como venenos desactivando el convertidor catalítico y reduciendo su vida útil. El principal causante es el azufre. (Fernández & Escudero, 2005)

- **Azufre**

La descomposición de los componentes sulfuros presentes en los combustibles en presencia de oxígeno producen óxidos de azufre (SO_x), que es un compuesto tóxico y que además de envenenar a los metales presentes en el convertidor catalítico al combinarse con el H_2O producen ácido sulfúrico (H_2SO_4). (Fernández & Escudero, 2005)

2.8.3 Contaminación por carbono

Esta contaminación es producida por depósitos de carbón o de otras sustancias carbonosas que obstruyen los canales del monolito y se depositan sobre la superficie metálica activa del convertidor catalítico conduciendo a la desactivación del mismo. (Segovia, 1995)

2.9 Regeneración del convertidor catalítico

La vida promedio de un catalizador depende del uso y los mantenimientos que se le realice, en promedio debe durar entre 80.000 km y 100.000 km recorridos. Al cumplir dicho kilometraje se debe considerar regenerar o reemplazarlo ya que el catalizador ha perdido la capacidad de reacción catalítica y debe ser sustituido. (Brain, s.f.)

Para la regeneración o limpieza del catalizador se debe separar las impurezas que bloquean los lugares activos del catalizador, la gasolina extra y súper en la actualidad no contienen plomo; pero existen otros factores que producen la desactivación y uno de los principales es la contaminación producida por el carbón generado en la combustión deficiente de la gasolina. (Castro & Lozano, 2014)

Con la regeneración se logra solucionar dos dificultades; por una parte, la problemática de tratar el catalizador agotado como residuo peligroso y por otra reducir el coste de catalizadores nuevos. Dichas técnicas de regeneración se clasifican en térmicas y químicas, en función del tipo de tratamiento empleado. (Castro & Lozano, 2014)

2.9.1 Térmica: oxidación – reducción

Cuando el catalizador es expuesto a temperaturas muy elevadas, presenta una pérdida de dispersión metálica y centros activos, conduciendo a la disminución de la actividad catalítica. Diversos autores dan a conocer que un tratamiento térmico que ayuda a la recuperación de la actividad catalítica, produciendo la re - dispersión del metal en el catalizador. En una primera etapa en presencia del oxígeno (O_2) se produce la formación de óxidos metálicos, en la segunda etapa en presencia del hidrógeno (H_2) se reducen dichos óxidos y se forman pequeños cristales metálicos en la superficie del catalizador. (Asencio, Rincón, Camarillo, & Martín, 2008)

2.9.2 Química

Este tipo de regeneración según (Asencio, Rincón, Camarillo, & Martín, 2008), ayuda a recuperar la actividad catalítica disolviendo los compuestos desactivantes, especialmente en medios ácidos. Se utilizan ácidos orgánicos débiles, ya que, el empleo de ácidos minerales fuertes, atacan el sustrato del catalizador provocando su destrucción. Entre los ácidos orgánicos débiles más utilizados está el oxálico, el acético y el cítrico, siendo eficaces para la eliminación de P, Fe, Zn, Cr, Pb, Ni y Cu.

En la actualidad se conoce el uso de agentes quelantes, que han logrado resultados muy prometedores para Pb, Ca, Zn, Fe, Cu y Ni. El principal inconveniente de esta técnica es la presencia de contaminación secundaria por la formación de un efluente contaminado (complejo EDTA - metal) que influye de manera negativa, la viabilidad del proceso. (Asencio, Rincón, Camarillo, & Martín, 2008)

2.10 Gases para el proceso de regeneración

Para la limpieza y regeneración en los convertidores catalíticos, se requiere de cierto tipo de gases que facilitan el proceso, entre los cuales se tiene el oxígeno (O_2) necesario en el proceso de la oxidación y nitrógeno (N_2) e hidrógeno (H_2) que ayuda en el proceso de reducción. A continuación, se detallan las propiedades físicas y químicas de cada uno.

2.10.1 Oxígeno (O₂)

Gas incoloro y sin olor, es 1,1 veces más pesado que el aire y soluble ligeramente en agua y alcohol. Este no es inflamable, aunque alimenta a la combustión; pero al existir una fuga este produce oxidación, lo que ayuda en el proceso de oxidación para limpiar el catalizador.

(LINDE, 2012)

Tabla 6

Propiedades del oxígeno (O₂)

Propiedades físicas y químicas	
Densidad de gas a 21,1 °C (70 °F), 1 atm	1,326 $\frac{kg}{m^3}$ (0.082 $\frac{lb}{ft^3}$)
Punto de ebullición a 1 atm	-182.96 °C (-297.29 °F)
Punto de congelación / fusión a 1 atm	-218.65 °C (-361.53 °F)
pH	No aplica
Peso específico (aire = 1) a 21,1 °C (70 °F)	1.105
Peso molecular	32.00
Solubilidad en agua vol./vol. a 0 °C (32 °F) y 1 atm	0.0489
Vol. específico del gas a 21,1 °C (70 °F) y 1 atm	0.752 $\frac{m^3}{kg}$ (12.05 $\frac{ft^3}{lb}$)
Presión de vapor a 21,1 °C (70 °F)	No aplica
Coefficiente de distribución agua / aceite	No aplica

Nota: En esta tabla se puede observar las propiedades físicas y químicas del oxígeno que se deben conocer para la realización del proceso de oxidación (LINDE, 2012)

2.10.2 Nitrógeno (N₂)

Es un gas incoloro, inerte e inoloro. La salud de las personas se ve afectado si es aspirado ya que produce un desplazamiento del oxígeno y no es toxico. Es un gas ideal para la reducción de un convertidor catalítico y gracias a sus propiedades permite la limpieza (LINDE, 2012)

Tabla 7

Propiedades del nitrógeno (N₂)

Propiedades físicas y químicas	
Densidad de gas a 21,1 °C (70 °F), 1 atm	1.153 $\frac{kg}{m^3}$ (0.072 $\frac{lb}{ft^3}$)
Punto de ebullición a 1 atm	-195.8 °C (-320.4 °F)
Punto de congelación / fusión a 1 atm	-210 °C (-345.8 °F)
pH	No aplica
Peso específico (aire = 1) a 21,1 °C (70 °F)	0.967
Peso molecular	28.01
Solubilidad en agua vol./vol. a 0 °C (32 °F) y 1 atm	0.023
Vol. específico del gas a 21,1 °C (70 °F) y 1 atm	0.867 $\frac{m^3}{kg}$ (13.89 $\frac{ft^3}{lb}$)
Presión de vapor a 21,1 °C (70 °F)	No aplica
Coefficiente de distribución agua / aceite	No aplica

Nota: En esta tabla se puede observar las propiedades físicas y químicas del nitrógeno que se deben conocer para la realización del proceso de reducción. (LINDE, 2012)

2.10.3 Hidrógeno (H₂)

Gas no tóxico, inodoro, incoloro, insípido y altamente inflamable. Al quemarse forma una llama azul pálida casi invisible, es propenso a fugas debido a su baja viscosidad y su peso molecular. Al igual que el nitrógeno este gas ayuda en la limpieza del catalizador gracias a las propiedades que este posee. (LINDE, 2012)

Tabla 8

Propiedades del hidrógeno (H₂)

Propiedades físicas y químicas	
Densidad de gas a 21,1 °C (70 °F), 1 atm	0.08342 $\frac{kg}{m^3}$ (0.00521 $\frac{lb}{ft^3}$)
Punto de ebullición a 1 atm	-252.8 °C (-423.0 °F)
Punto de congelación / fusión a 1 atm	-259.2 °C (-434.6 °F)
pH	No aplica
Peso específico (aire = 1) a 21,1 °C (70 °F)	0.06960
Peso molecular	2.106
Solubilidad en agua vol./vol. a 0 °C (32 °F) y 1 atm	0.019
Vol. específico del gas a 21,1 °C (70 °F) y 1 atm	11.99 $\frac{m^3}{kg}$ (192.0 $\frac{ft^3}{lb}$)
Presión de vapor a 21,1 °C (70 °F)	No aplica
Coefficiente de distribución agua / aceite	No aplica

Nota: En esta tabla se puede observar las propiedades físicas y químicas del hidrógeno que se deben conocer para la realización del proceso de reducción. (LINDE, 2012)

CAPÍTULO III

3. Diseño de la propuesta

El presente capítulo desarrolla la construcción del micro reactor, que se utilizó como base para realizar las diferentes pruebas que permitieron tratar las muestras de catalizadores para su regeneración; por medio del proceso oxidación – reducción a temperatura y tiempos programados.

3.1 Sistema de calentamiento

Para el estudio del proceso de oxidación – reducción, se diseñó y construyó un reactor con un sistema de calentamiento el cual alcanza temperaturas de trabajo de 300 °C a 350 °C para la regeneración del monolito de los convertidores catalíticos automotrices.

3.1.1 *Manufactura del tubo*

En la construcción del micro reactor se seleccionó un tubo de acero inoxidable 304 austénico (cromo/níquel), que impide la formación de carburos de cromo durante su enfriamiento. Utilizados en aplicaciones como intercambiadores térmicos, en la industria alimenticia, en componente criogénicos, entre otras; según (NKS, s.f.), este tipo de acero tiene una conductividad térmica de $12.4 \left(\frac{Btu}{h*ft} \right)$ a una temperatura de 932 °F (500 °C).

De acuerdo a (IMPORT ACEROS, s.f.), en su catálogo de tubos de acero inoxidable mostrado en la tabla 9 se seleccionó un tubo de $1 \frac{1}{4}$ in (31,75 mm) con un espesor de pared de 1,50 mm ideal para el proceso de manufactura del roscado; ya que en tubos de menor espesor es imposible realizar este proceso.

La longitud del tubo es de 400 mm, la cual permite una mejor distribución de calor y flujo de gases constante; ideal para el tratamiento del monolito del convertidor catalítico.

Tabla 9

Especificaciones generales del tubo redondo

DIÁMETRO EXTERIOR (D)		ESPESOR	PESO		PROPIEDADES		
		e	P	A	I	W	I
in	mm	mm	$\frac{kg}{cm}$	cm	cm ⁴	cc	cm
1 ¼	31,75	0,95	4,50	0,92	1,09	0,69	1,18
		1,10	5,22	1,06	1,24	0,78	1,08
		1,50	7,08	1,43	1,63	1,03	1,07

Nota: En esta tabla se puede observar las especificaciones del tubo seleccionado para la construcción del micro reactor. Recuperado de (IMPORT ACEROS, s.f.)

En los extremos del tubo se realizó un proceso de manufactura con una rosca 11 NPT, para el acople con los tapones hembra 150 304 de 1 in NPT; obteniendo la hermeticidad requerida en el proceso de regeneración.

Figura 14

Maquinado de la rosca en el tubo



Nota: En el gráfico se puede observar el proceso de maquinado de una rosca cónica de 8 hilos en uno de los extremos del tubo reactor para la estanqueidad del sistema.

En los tapones hembra 150 304 de 1 in NPT, se realizó perforaciones de 15 mm de diámetro, en los cuales se soldaron los bushing NPT de $\frac{3}{8}$ in x $\frac{1}{4}$ in , como conexión a los acoples de las mangueras de entrada y salida de los gases.

Figura 15

Perforación en el tapón



Nota: En el gráfico se puede observar la perforación del tapón con un taladro eléctrico y una broca de 15 mm de diámetro.

Los bushing NPT de $\frac{3}{8}$ in x $\frac{1}{4}$ in se soldaron a los tapones perforados, mediante un proceso de soldadura por arco eléctrico (SMAW), la cual utilizó electrodos OK 61.30/308 L-17 a una intensidad de corriente entre 50 A – 90 A con una regulación de tensión de 31 VAC, para garantizar la durabilidad y la estanqueidad requerida por el sistema.

Figura 16

Bushing soldado en el tapón



Nota: En el gráfico se puede observar el bushing NPT soldado al tapón, con la soldadura por arco eléctrico.

Una vez obtenidos todos los elementos necesarios, se realiza el ensamble final del tubo reactor figura 17.

Figura 17

Ensamble final del tubo reactor



Nota: En el gráfico se observa el ensamble final de tubo reactor ideal para el tratamiento

3.1.2 Calentamiento eléctrico

El calentamiento se realizó con una resistencia eléctrica de acero CAST IRON en forma de espiral con una potencia de 2800 W y una tensión de trabajo de 220 VAC; que convierte la energía eléctrica en energía calorífica con una longitud de 2 m, acorde al diseño del tubo a calentar alcanzando temperaturas de trabajo de 500 °C.

Figura 18

Instalación de la resistencia eléctrica en el tubo reactor.



Nota: En el gráfico se puede observar la resistencia eléctrica en espiral, enrollada al tubo reactor la cual alcanza una temperatura de 500 °C.

La resistencia eléctrica y el tubo reactor son recubiertos por una lámina de acero inoxidable con un espesor de 1 mm, con el fin de evitar el contacto entre el aislante térmico y la resistencia eléctrica figura 19.

Figura 19

Recubrimiento de la resistencia eléctrica



Nota: En el gráfico se puede observar el recubrimiento de la resistencia eléctrica y el tubo reactor con la lámina de acero inoxidable.

Se requiere incorporar una fibra cerámica de dimensiones 320 mm x 380 mm x 30 mm como aislamiento térmico de baja conductividad térmica, con el fin de mantener las temperaturas de trabajo de 300 °C a 350 °C en el sistema de tal manera de disminuir en un 70% el calor generado por la resistencia eléctrica.

Figura 20

Fibra cerámica aislante de calor



Nota: En el gráfico se puede observar la fibra cerámica utilizada como aislamiento térmico para mantener las temperaturas de trabajo de 300 °C a 350 °C.

Se utilizó una segunda lamina de acero inoxidable de espesor de 1 mm, con el fin de cerrar el circuito de calentamiento del reactor, como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Recubrimiento final de reactor



Nota: En el gráfico se puede observar el recubrimiento final del tubo reactor con una lámina de acero inoxidable

3.2 Sistema de control de temperatura

Se diseñó y construyó un sistema de control de temperatura, que permitió modificar las temperaturas de trabajo de 300 °C a 500 °C, requeridas para el estudio del proceso de oxidación – reducción.

3.2.1 Controlador

Se utilizó un controlador de temperatura REX – C 700 marca CAMSCO, con un rango de temperatura de 0 °C a 1200 °C, apto para una temperatura de trabajo de 500 °C requerida por el micro reactor, además estos son utilizados para el control de temperatura de hornos que garantiza un manejo ideal de temperatura.

Figura 22

Controlador de temperatura REX-C 700 marca CAMSCO



Nota: En el gráfico se puede observar el controlador de temperatura, el cual permite visualizar las lecturas de temperatura enviadas por de las termocuplas y modificar los rangos de temperatura de trabajo.

En la tabla 10 se muestra una descripción del controlador con los tipos de termocuplas que este puede manejar de este modo se seleccionó la termocupla tipo K, la cual facilitó la obtención de los valores de lectura y control de las temperaturas con las cuales trabaja el micro reactor.

Tabla 10

Tabla de alcance de salida de las termocuplas

	Entrada	Alcance de medida	Código	Alcance de medida	Código	Alcance de medida	Código
TERMOCUPLAS	K	0 - 200 °C	K 01	0 - 400 °C	K 02	0 - 600 °C	K 03
		0 - 800 °C	K 04	0 - 1000 °C	K 05	0 - 1200 °C	K 06
		0 - 1372 °C	K 07	0 - 100 °C	K 13	0 - 300 °C	K 14
	J	0 - 200 °C	J 01	0 - 400 °C	J 02	0 - 600 °C	J 03
		0 - 800 °C	J 04	0 - 1000 °C	J 05	0 - 1200 °C	J 06
	R #1	0 - 1600 °C	R 01	0 - 1769 °C	R 02		
	S #1	0 - 1600 °C	S 01	0 - 1769 °C	S 02		
	B #1	400 - 1800 °C	B 01	0 - 1769 °C	B 02		
	E	0 - 800 °C	E 01	0 - 1000 °C	E 02		
	N	1 - 1300 °C	N 01	0 - 1300 °C	N 02		
	T #2	199,9 - 400 °C	T 01	199,9 - 100 °C	T 02	199,9 - 200 °C	T 03
		0 - 350 °C	T 04				

Nota: En esta tabla se observan los diferentes tipos de termocupla con sus respectivos códigos y alcance de medida que el controlador de temperatura puede manejar, acorde a la aplicación que se requiera.

Para monitorear la temperatura del micro reactor se utilizaron cuatro controladores, el primero controla la temperatura de operación de la resistencia eléctrica y los tres restantes monitorean la temperatura de entrada, salida y monolito necesarias para el proceso de regeneración.

Figura 23

Controladores de temperatura



Nota: En el gráfico se puede observar el interruptor de encendido/apagado junto con los cuatro controladores de temperatura ensamblados al gabinete metálico, los cuales permitieron visualizar y monitorear las temperaturas de trabajo.

3.2.2 Termocupla tipo "K"

Es una termocupla de contacto con un alcance de medida de 0 °C a 600 °C, tiene un sensor de diámetro de 4.5 mm y longitud del cable de 1000 mm, ideal para medir los valores de la temperatura de operación del micro reactor que es de 500 °C.

Figura 24

Termocupla tipo "K"



Nota: En el gráfico se puede observar una termocupla de contacto tipo "K", la cual mide valores de temperatura de 0 °C a 600 °C

Se conectaron las termocuplas a los puntos específicos para la toma de valores de temperatura del micro reactor es decir a la entrada, salida y centro (monolito - resistencia), posteriormente son conectadas a su respectivo controlador.

Figura 25

Termocupla a la salida del reactor

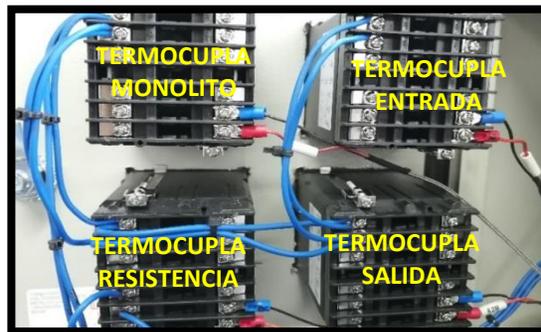


Nota: En el gráfico se puede observar la conexión de la termocupla tipo "K" a la salida del tubo reactor y la resistencia eléctrica con su respectivo cable para su conexión

Se programó el controlador de la resistencia eléctrica a la temperatura de operación requerida de 300 °C; los controladores restantes son programados para registrar valores de temperatura hasta los 600 °C por medio de las termocuplas en cada punto especificado.

Figura 26

Conexión eléctrica de los controladores de temperatura con las termocuplas



Nota: En el gráfico se puede observar la conexión eléctrica en serie de los controladores de temperatura con su respectiva termocupla

3.2.3 Fusibles

Se colocaron dos fusibles cilíndricos RT 14-20 marca CAMSCO de 25 A que soporta una tensión de 500 V (100 KA) con su respectivo porta fusibles, con el fin de proteger el sistema eléctrico y electrónico de posibles cortos o sobrecargas de corriente que puedan afectar al control de temperatura.

Figura 27

Fusible y porta fusible marca CAMSCO



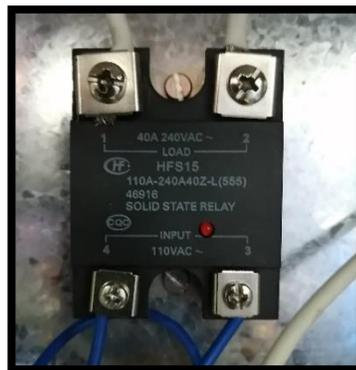
Nota: En el gráfico se puede observar el fusible y porta fusible, usado para la protección de sobre cargas o cortocircuitos.

3.2.4 Relé de estado sólido

Se utiliza este elemento para aislar la parte de control de la parte de potencia, debido a las conmutaciones simultáneas existentes en el control de temperatura; los contactos del relé SSR no sufren desgaste como sucede normalmente con los relés electromagnéticos, debido a la activación y desactivación constante de la resistencia.

Figura 28

Relé de estado sólido (SSR)



Nota: En el gráfico se puede observar el relé SSR, el cual aisló la parte de control de la parte de potencia debido a las conmutaciones generadas por los controladores

La primera fase está conectada a la entrada del fusible a través de la fuente de alimentación de 220 VAC y su salida se enlaza al pin 1 del relé; la segunda fase se vincula a la entrada de otro fusible mientras que su salida se une a la resistencia eléctrica, por lo tanto, el pin 2 del relé es conectado al otro extremo. Los pines 3 y 4 del relé controlan las conmutaciones originadas por los controladores.

Figura 29

Conexión eléctrica del relé de estado sólido SSR

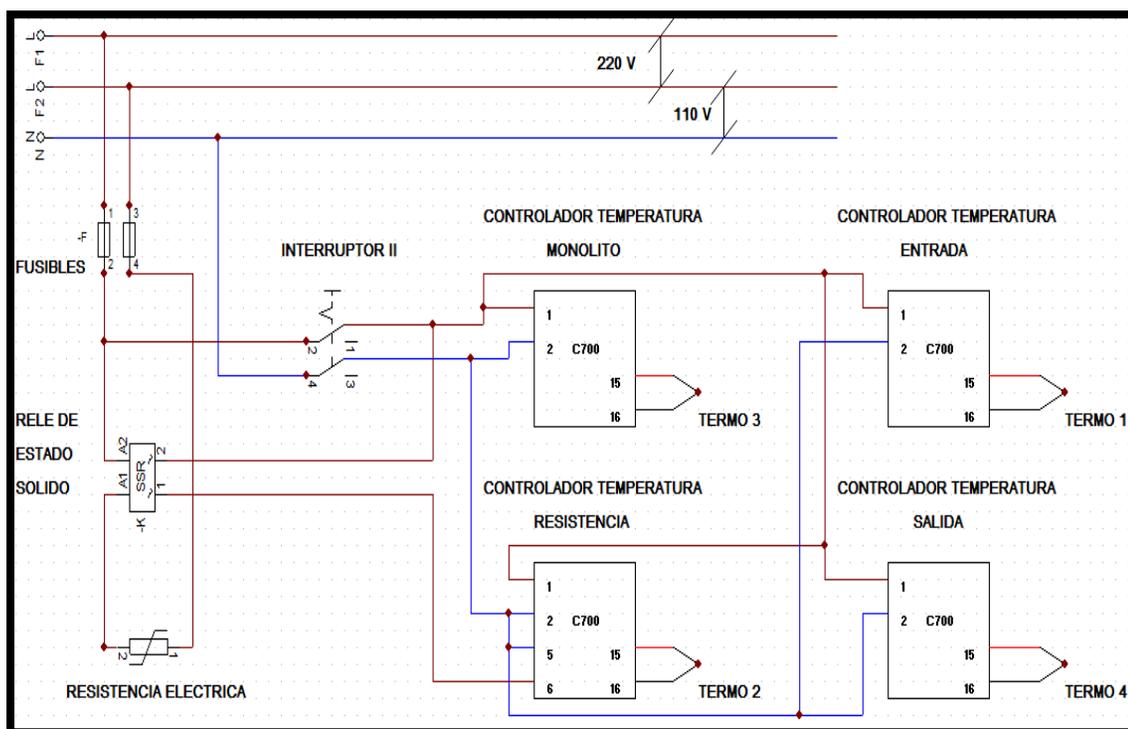


Nota: En el gráfico se puede observar la conexión eléctrica partiendo de la fuente de alimentación de 220 VAC hacia los fusibles y finalmente relé SSR

En un gabinete metálico con dimensiones de 300 mm x 300 mm x 200 mm, se instaló todos los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para el sistema de control de temperatura. Adicional, se diseñó un esquema eléctrico como guía para la conexión de todos sus elementos.

Figura 30

Esquema eléctrico del circuito de control



Nota: En el gráfico se puede observar el esquema eléctrico, para las conexiones de los componentes eléctricos y electrónicos realizado en el software CADe SIMU

3.3 Sistema de control de flujo de gases

Para el tratamiento de las muestras del monolito en el estudio del proceso de oxidación – reducción, se diseñó y construyó un sistema de control de flujo de gases que permitió controlar el flujo total de salida de los gases para la regeneración del convertidor catalítico.

3.3.1 Flujómetros

Para controlar el flujo de gases durante el proceso de regeneración, se utilizó flujómetros de pared marca MADA con capacidad de un $1 \frac{l}{min}$ que es la escala más baja disponible en el mercado; ya que en nuestra investigación se manejan flujos bajos, permitiendo

obtener un control eficiente en la salida de los gases que circulan por el micro reactor;
optimizando el tratamiento de la muestra del monolito del catalizador automotriz.

Figura 31

Flujómetro de pared marca MADA

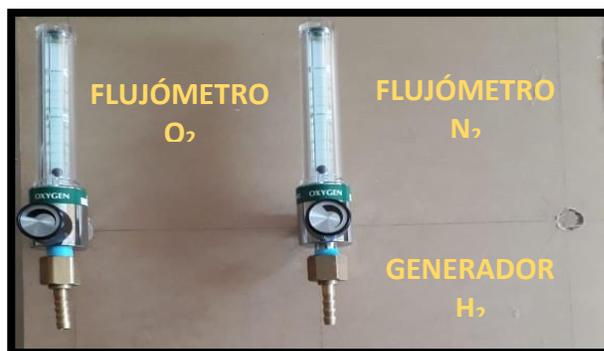


Nota: En el gráfico se puede observar un flujómetro de pared con una escala de $1 \frac{l}{min}$ ideal para el control de flujo de los gases durante el proceso de regeneración del convertidor catalítico.

En la placa de acrílico de 300 mm x 300 mm, se colocaron los flujómetros de oxígeno y nitrógeno con sus respectivas separaciones, adicional un espacio para la conexión hacia el generador de hidrógeno.

Figura 32

Instalación de los flujómetros en la placa de acrílico



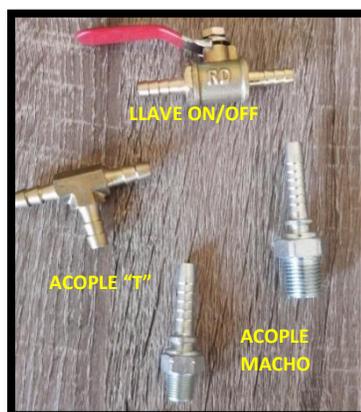
Nota: En el gráfico se puede observar la placa de acrílico con los flujómetros de pared, utilizados en el control de flujo de gases y una perforación para la conexión del generador de hidrógeno

3.3.2 Acoples, llaves y espigas

Se utilizaron acoples, espigas, llaves con una medida de $\frac{1}{4}$ in para las conexiones entre los flujómetros, tanques y mangueras; ideales para controlar la salida de los gases que circulan por el sistema micro reactor.

Figura 33

Acoples, llave on / off de $\frac{1}{4}$ in



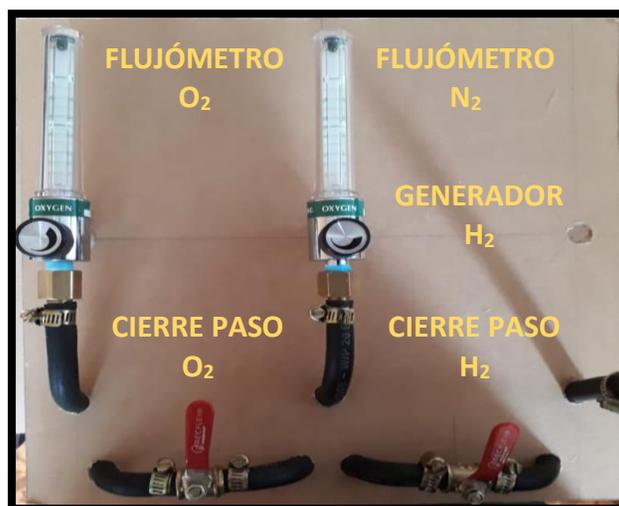
Nota: En el gráfico se puede observar los elementos de conexión como los acoples macho, acople en "T" y llaves on / off, para la unión de los elementos del sistema de flujo de gases.

Para la conexión del sistema de control de gases, se utilizaron dos llaves de paso de $\frac{1}{4}$ in para controlar la salida del flujo los gases desde el flujómetro y dos acoples en "T" de $\frac{1}{4}$ in para facilitar la mezcla de los gases (O_2 , H_2 , N_2) utilizados en el proceso de oxidación - reducción para el tratamiento de la muestra del convertidor catalítico.

Se utilizaron cuatro espigas hembra $\frac{1}{4}$ in x $\frac{9}{16}$ in, dos acoples de manguera 4 - 2 y 4 - 4 para conectar los tanques a los flujómetros y finalmente para la unión de estos elementos se utilizó una manguera flexible multiusos de $\frac{1}{4}$ in la que soporta una presión entre 20 Bar (300 Psi) ideal para esta aplicación.

Figura 34

Control de flujo de gases



Nota: En el gráfico se puede observar la manguera flexible utilizada en la conexión de los flujómetros con las espigas hembra y las llaves on/off, para controlar el flujo de gases en el sistema.

Listos los sistemas de calentamiento, control de temperatura y flujo de gases; se instalan sobre una base metálica de 500 mm x 500 mm con una altura de 1000 mm, para una mejor ergonomía y manipulación de cada uno de los sistemas utilizados en el proceso de regeneración de las muestras de los convertidores catalíticos de un automóvil.

Figura 35

Sistema de tratamiento de monolitos



Nota: En el gráfico se puede observar el sistema de tratamiento de monolitos, para el proceso de oxidación y reducción de las muestras del convertidor catalítico automotriz.

3.4 Calibración de los flujómetros

Para la calibración fue necesario el uso de un flujómetro de burbuja mostrado en la figura 36; en el cual se colocó 30 ml de agua con jabón que con el paso del gas forma una burbuja en su interior, la que sirve como indicativo del flujo que se obtiene a la salida del micro reactor, este flujo se reguló por medio de la perilla del flujómetro y se tomaron varias medidas para finalmente obtener un promedio del flujo requerido en el proceso de oxidación - reducción.

Figura 36

Flujómetro de burbuja



Nota: En el gráfico se puede observar el flujómetro de burbuja utilizado para calibrar el flujo de los gases a la salida del reactor.

3.4.1 Procedimiento para calibrar los flujómetros de oxígeno y nitrógeno

Para la correcta calibración de los flujómetros en la aplicación del método de oxidación - reducción, es necesario seguir la siguiente secuencia de pasos:

Figura 37

Manómetros y llaves del tanque de oxígeno



Nota: En el gráfico se puede observar los tanques de oxígeno, nitrógeno con sus respectivos manómetros y llaves que sirven para regular la presión de salida del gas.

- Abrir la llave principal del tanque O₂ y observar en el manómetro 1 la presión existente en el interior del tanque.
- Regular la presión de salida a 2 bar con la perilla de regulación y verificar el valor en el manómetro 2.
- Verificar que la perilla del flujómetro O₂ esté cerrada y abrir la llave de salida del tanque O₂ que está conectada a la entrada del flujómetro.
- Conectar el flujómetro de burbuja a la salida del flujómetro de O₂, abrir la perilla del flujómetro de O₂ en la escala más baja de $0 \frac{l}{min}$; para luego realizar las mediciones en base al tiempo y flujo de salida.
- Repetir el paso anterior, aumentando la escala del flujómetro de O₂ de $0,1 \frac{l}{min}$, $0,2 \frac{l}{min}$, $0,3 \frac{l}{min}$, etc. hasta que no varíe el flujo de gas.
- Finalizadas las mediciones cerrar la llave principal del tanque de O₂ y dejar salir por completo el gas de las cañerías.
- Cerrar la llave de salida del manómetro 2 y la perilla del flujómetro de O₂
- Tabular los datos y realizar la gráfica de la linealidad con los flujos obtenidos por el flujómetro de burbuja.
- Realizar el procedimiento anterior para calibrar el flujómetro de nitrógeno (N₂).

Se detalla los valores medidos del flujo de oxígeno con el flujómetro de burbuja, los mismo que sirvieron para tener obtener la figura de linealidad tabla 11.

Tabla 11

Datos para la calibración del flujómetro de oxígeno

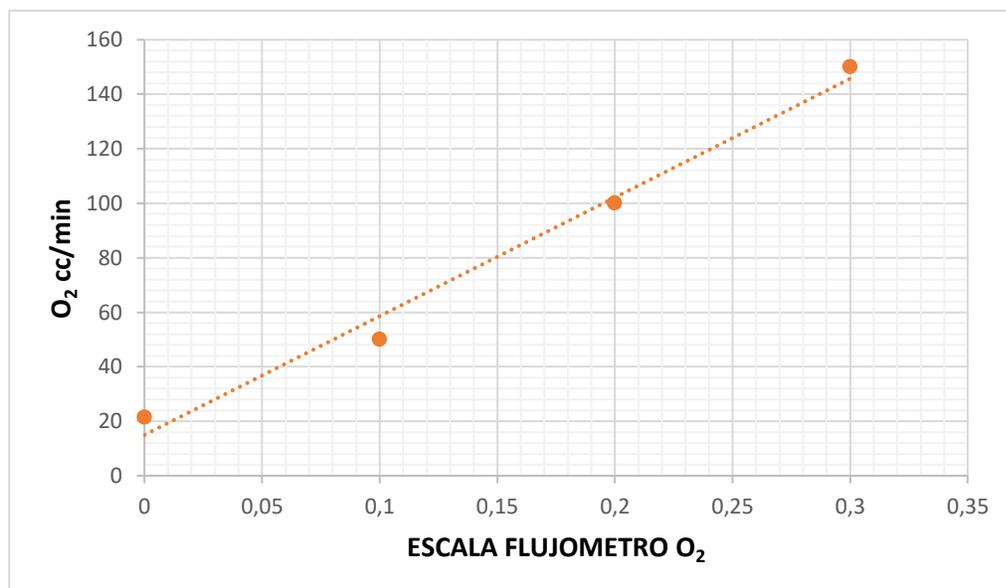
OXÍGENO O₂		
Presión Tanque	120 bar	
Presión Salida	2 bar	
FLUJÓMETRO PARED	FLUJÓMETRO BURBUJA	
$\frac{l}{min}$	$\frac{cc}{s}$	$\frac{cc}{min}$
0	0,35	21,42
0,1	0,83	49,98
0,2	1,66	99,96
0,3	2,50	150,00
0,4	5,00	300,00
0,5	10,0	600,00
0,6	6,49	389,58

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de presión de entrada y salida del tanque de oxígeno; así como los valores medidos con el flujómetro de burbuja.

En la tabla 11 se toman como referencia las cuatro primeras medidas, para realizar el diagrama del flujo de oxígeno con relación al flujómetro y obtener la linealidad del gas como se muestra en la figura 38.

Figura 38

Diagrama de linealidad para el oxígeno



Nota: En el gráfico se puede observar que existe una linealidad del oxígeno ascendente, demostrándonos una proporcionalidad entre los dos flujómetros de pared y burbuja

Se detalla los valores medidos del flujo de nitrógeno con el flujómetro de burbuja, los mismo que sirvieron para tener obtener la linealidad de nitrógeno tabla 12.

Tabla 12

Datos para la calibración del flujómetro de nitrógeno

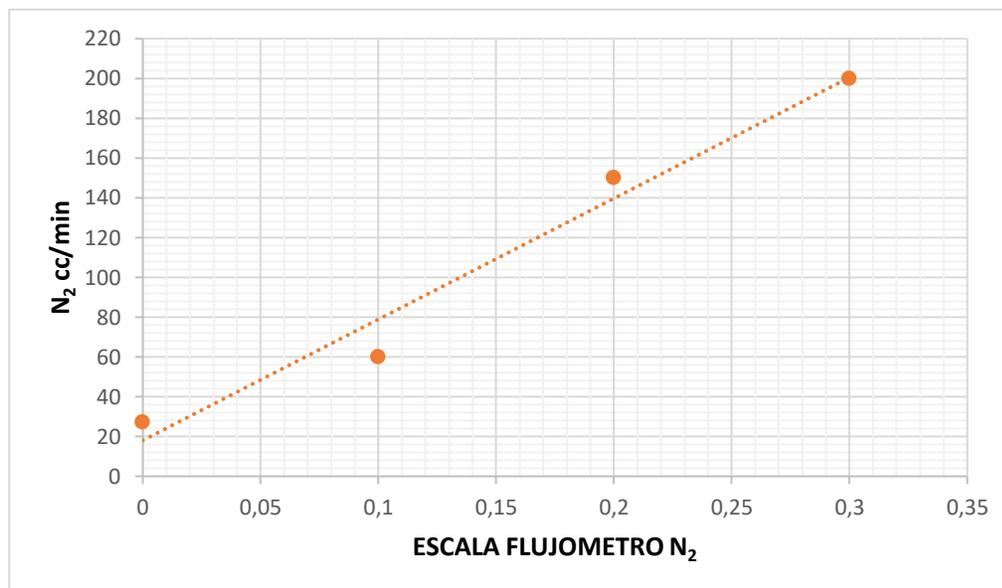
NITRÓGENO N₂		
Presión Tanque	80 bar	
Presión Salida	1 bar	
FLUJÓMETRO PARED	FLUJÓMETRO BURBUJA	
$\frac{l}{min}$	$\frac{cc}{s}$	$\frac{cc}{min}$
0	0,45	27,27
0,1	1,00	60,00
0,2	2,50	150,00
0,3	3,33	199,99
0,4	5,00	300,00
0,5	10,00	600,00
0,6	10,00	600,00

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de presión de entrada y salida del tanque de nitrógeno; así como los valores medidos con el flujómetro de burbuja.

En la tabla 12 se toman como referencia las cuatro primeras medidas, para realizar el diagrama del flujo de nitrógeno con relación al flujómetro y obtener la linealidad del gas como se muestra en la figura 39.

Figura 39

Diagrama de linealidad para el nitrógeno



Nota: En el gráfico se puede observar que existe una linealidad del nitrógeno ascendente, demostrándonos una proporcionalidad entre los dos flujómetros de pared y burbuja

3.4.2 Procedimiento para calibrar el generador de hidrógeno

Para la correcta calibración del generador de hidrógeno en la aplicación del método de oxidación - reducción es necesario seguir la siguiente secuencia de pasos:

- Colocar una concentración de peróxido de hidrógeno, apropiada para la operatividad del generador de hidrógeno hasta el límite indicado en el recipiente para tal fin.
- Cerrar el recipiente de la celda del generador de hidrógeno y conectarlo a la fuente de alimentación de 12 V.
- A la salida del generador de H₂, conectar el flujómetro de burbuja para realizar las mediciones en base al tiempo y flujo de salida.
- Dejar pasar el H₂ con la escala de voltaje más baja de 4.6 V; luego tomar los valores.

- Repetir el paso anterior, elevando la tensión en la fuente de alimentación del generador de H_2 , es decir 5,4 V, 5,8 V, etc. hasta que no varíen las medidas de flujo.
- Finalizadas las mediciones apagar la fuente del generador de H_2 .
- Tabular los datos y realizar la gráfica de linealidad del H_2 con los flujos obtenidos por el flujómetro de burbuja.

Figura 40

Calibración de generador de hidrógeno



Nota: En el gráfico se puede observar la calibración del generador de hidrógeno con la ayuda del flujómetro de burbuja y un cronómetro.

Se detalla los valores medidos del flujo de hidrógeno con el flujómetro de burbuja, los mismo que sirvieron para tener obtener la figura de linealidad tabla 13.

Tabla 13

Datos para la calibración del generador de hidrógeno

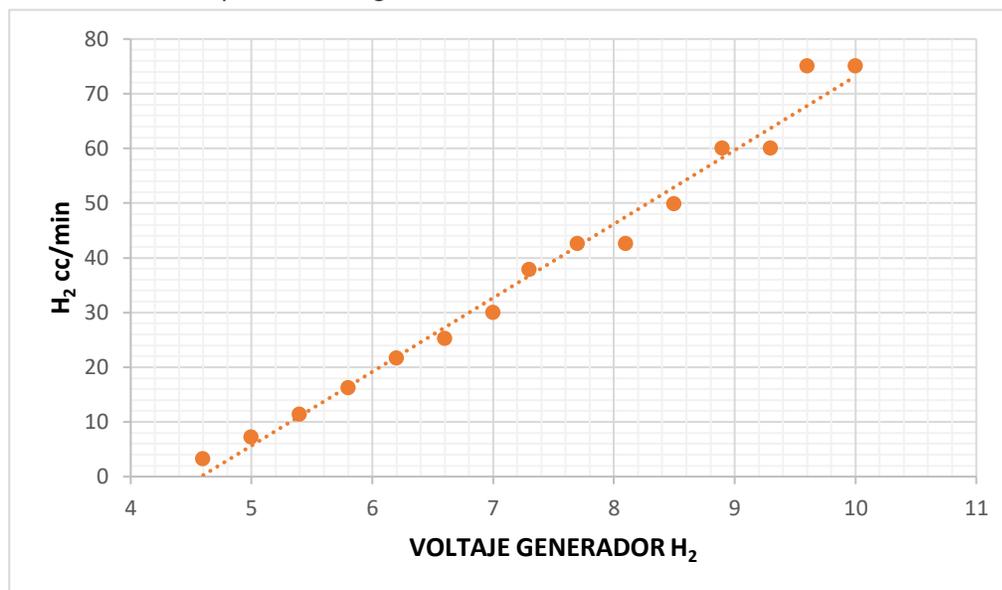
HIDRÓGENO H₂		
GENERADOR DE H₂	FLUJÓMETRO BURBUJA	
V	$\frac{cc}{s}$	$\frac{cc}{min}$
4,6	0,05	3,18
5,0	0,12	7,20
5,4	0,19	11,40
5,8	0,27	16,20
6,2	0,36	21,60
6,6	0,42	25,20
7,0	0,50	30,00
7,3	0,63	37,80
7,7	0,71	42,60
8,1	0,71	42,60
8,5	0,83	49,80
8,9	1,00	60,00
9,3	1,00	60,00
9,6	1,25	75,00
10,0	1,25	75,00

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de voltaje de la fuente del generador de hidrógeno; así como los valores de flujo medidos con el flujómetro de burbuja.

En la tabla 13 se detallan los valores de voltaje de la fuente de alimentación y los valores de flujo de hidrógeno obtenidos con el flujómetro de burbuja, los mismos que sirvieron para realizar el diagrama del flujo con relación al flujómetro y obtener la linealidad del gas como se muestra en la figura 41.

Figura 41

Diagrama de linealidad para el hidrógeno



Nota: En el gráfico se puede observar que existe una linealidad del hidrógeno ascendente, demostrándonos una proporcionalidad entre el generador y el flujómetro de burbuja

CAPÍTULO IV

4. Análisis de los resultados obtenidos

En este capítulo se describen las pruebas de oxidación - reducción a temperatura (°C) programada, relación de porcentaje en volumen de oxígeno/nitrógeno $\left(\%, \frac{v}{v}\right)$ e hidrógeno/nitrógeno $\left(\%, \frac{v}{v}\right)$ respectivamente, flujo total $\left(\frac{cc}{min}\right)$ y tiempo de exposición (min) para la regeneración de las muestras rectangulares de dimensiones 20 mm x 20 mm x 20 mm de la estructura del monolito de un convertidor catalítico usado de desecho, mediante el uso de un micro reactor diseñado y construido para tal fin.

4.1 Proceso de oxidación – reducción

En la tabla 14 se especifica las dimensiones (mm) y el peso (g) de las muestras rectangulares de monolitos, utilizadas para este estudio e identificadas como M₁, M₂, M₃ y M₄.

Tabla 14

Peso y dimensiones de las muestras del monolito

Muestra	Peso (g)	Dimensiones (mm)
M ₁	4,195	19 mm x 18 mm x 19 mm
M ₂	4,552	19 mm x 19 mm x 19 mm
M ₃	4,288	19 mm x 19 mm x 19 mm
M ₄	4,180	19 mm x 18 mm x 19 mm

Nota: En esta tabla se puede observar el peso y dimensiones de las muestras del monolito utilizadas para el tratamiento.

El proceso de oxidación – reducción para la regeneración se lo realiza de manera simultánea, en la cual se procede previamente a la eliminación de la humedad mediante un calentamiento a 300 °C en atmósfera de nitrógeno a un flujo de $84,1 \frac{cc}{min}$ durante 20 minutos.

La oxidación se la realiza a una relación O_2/N_2 $\left(\frac{v}{v}\right)$ de $49 \pm 2 \frac{cc}{min}$, flujo total ($O_2 + N_2$) de $164 \pm 2 \frac{cc}{min}$, velocidad de calentamiento de $10 \frac{°C}{min}$, elevando su temperatura a $300 °C$ durante 60 minutos, como se muestra en la tabla 15; al finalizar el proceso se cierra el paso de oxígeno y se apaga el sistema de calentamiento por un periodo de 45 minutos para alcanzar la temperatura ambiente en atmósfera de nitrógeno.

Tabla 15

Condiciones del proceso de oxidación

Muestra	Relación O_2/N_2 $\left(\%, \frac{v}{v}\right)$	Velocidad de calentamiento $\left(\frac{°C}{min}\right)$	Temperatura de oxidación $(°C)$	Tiempo de exposición (min)	Flujo total $\left(\frac{cc}{min}\right)$
M ₁	48	10	300	60	162,5
M ₂	46	10	300	60	155,0
M ₃	51	10	300	60	170,2
M ₄	50	10	300	60	169,2

Nota: En esta tabla se puede observar la relación de los gases, velocidad de calentamiento, temperatura de oxidación, tiempo de exposición y flujo total para el proceso de oxidación.

Encender el sistema de calentamiento hasta alcanzar la temperatura de reducción, la cual es de $300 °C$ o $350 °C$ respectivamente; para posteriormente dejar circular hidrógeno a una relación de H_2/N_2 $\left(\%, \frac{v}{v}\right)$ de $40 \pm 1 \frac{cc}{min}$, flujo total ($H_2 + N_2$) de $140 \pm 1 \frac{cc}{min}$ a un tiempo de exposición de 60 minutos, como se indica en la tabla 16.

Tabla 16*Condiciones del proceso de reducción*

Muestra	Relación H_2/N_2 (%, $\frac{v}{v}$)	Velocidad de calentamiento ($\frac{^\circ C}{min}$)	Temperatura de reducción ($^\circ C$)	Tiempo de exposición (min)	Flujo total ($\frac{cc}{min}$)
M ₁	40	10	350	60	138,2
M ₂	39	10	300	60	139,8
M ₃	42	10	350	60	139,1
M ₄	40	10	300	60	141,1

Nota: En esta tabla se puede observar la relación de los gases, velocidad de calentamiento, temperatura de oxidación, tiempo de exposición y flujo total para el proceso de reducción.

Las muestras tratadas se evalúan a partir del uso de los gases de emisión provenientes de un motor de combustión a gasolina, que determina la eficiencia del método utilizado para la recuperación del convertidor. Se conectó un tubo desde el escape del automóvil hacia el reactor, para realizar las pruebas directamente con los gases de emisión a temperatura de reacción controlada.

Tabla 17*Variación de peso de las muestras antes y después del tratamiento.*

Muestra	Peso (g) antes del tratamiento	Peso (g) después del tratamiento	Variación de peso (Δp)	% pérdida de peso
M ₁	4,195	4,151	0,044	1,04
M ₂	4,552	4,514	0,038	0,83
M ₃	4,288	4,264	0,024	0,56
M ₄	4,180	4,101	0,079	1,89

Nota: En esta tabla se puede observar el peso de las muestras antes y después del tratamiento de oxidación – reducción, además de la variación y porcentaje de pérdida del peso

Se detalla las variaciones de peso luego del proceso, encontrando un porcentaje de pérdida de $1,1 \pm 0,4$ %; debido a la humedad y a residuos carbonoso existente en el uso del convertidor catalítico tabla 17.

4.2 Analizador de gases Kane AUTO plus

El analizador de gases portátil marca Kane AUTO plus, permite el análisis cualitativo - cuantitativo de la composición de los gases de emisión (CO, CO₂, O₂, HC) y Lambda (relación de oxígeno disponible). A continuación, se detallan los campos de medición que permite el equipo tabla 18.

Tabla 18

Campos de medición del analizador de gases Kane AUTO plus

Parámetro	Resolución	Precisión	Rango
Monóxido de Carbono	0,01 %	+/- 5 % de lectura +/- 0,06 % volumen	0 – 10 % sobre - rango 20 %
Oxígeno	0,01 %	+/- 5 % de lectura +/- 0,1% volumen	0 – 21 % sobre - rango 25 %
Hidrocarburo	1 ppm	+/- 5 % de lectura +/- 12 ppm volumen	0 - 5000 ppm sobre - rango 10.000 rpm
Dióxido de Carbono	0,10 %	+/- 5 % de lectura +/- 0,5 % volumen	0 – 16 % sobre - rango 25 %
Lambda	0,001 00,01		0,8 - 1,2 11,76 - 17,64 12,48 - 18,72

Nota: En esta tabla se puede observar los parámetros y rangos de medición de los gases que son útiles para nuestra investigación

4.3 Análisis emisiones

Para el análisis de las emisiones, se utilizó del analizador el cual es previamente calibrado de acuerdo a la metodología recomendada por el fabricante obteniendo mediciones por triplicado de la composición de los gases reales del vehículo al reactor por medio de un tubo

de acero inoxidable y a través de los controladores se registraron los valores de las temperaturas del reactor: T entrada (T_e), T medio (T_m) y T salida (T_s) para obtener un promedio.

Los gases de emisión: hidrocarburo (HC), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) en ralentí sin catalizador se tomó como referencia para determinar de manera relativa en que porcentaje se regenera el convertidor catalítico, los datos se registraron en la tabla 19.

Tabla 19

Gases de emisión a la salida del reactor sin catalizador

Gases Emisión a la salida del reactor					
Variables	1	2	3	4	5
O ₂ (%)	0	0	0	0	0
CO (%)	7,86	7,92	7,88	7,95	7,95
CO ₂ (%)	4,4	4,5	4,3	4,3	4,4
HC (ppm)	3835	3858	3822	3884	3907
Lambda	0,565	0,568	0,562	0,560	0,563
Rpm	900	900	900	900	900
Reactor					
T entrada:	31 °C	33 °C	32 °C	32 °C	33 °C
T catalizador:	34 °C	35 °C	34 °C	35 °C	35 °C
T salida:	29 °C	29 °C	29 °C	30 °C	29 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor

provenientes de vehículo sin la muestra del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

4.3.1 Análisis de la muestra M_1 con los gases de emisión

Para este análisis la muestra " M_1 " se colocó hasta la posición media del reactor por el que circulan los gases de emisión donde se varió la temperatura del reactor desde la temperatura ambiente; requiriendo 20 minutos para el cambio de temperatura. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 20.

Tabla 20

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M_1) a T ambiente

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	7,25	6,59	6,69
CO ₂ (%)	4,2	3,7	3,7
HC (ppm)	3074	2996	3026
Lambda	0,583	0,572	0,571
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	31 °C	31 °C	32 °C
T catalizador:	35 °C	35 °C	35 °C
T salida:	29 °C	29 °C	30 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a temperatura ambiente con la muestra M_1 del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Cambiar la temperatura a 100 °C con la muestra “M₁” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 21.

Tabla 21

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₁) a T=100 °C

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	7,63	6,63	6,98
CO ₂ (%)	4,6	4,0	3,9
HC (ppm)	2522	2423	2565
Lambda	0,608	0,601	0,588
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	29 °C	30 °C	30 °C
T catalizador:	100 °C	101 °C	100 °C
T salida:	45 °C	45 °C	46 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 100 °C con la muestra M₁ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Cambiar la temperatura a 150 °C con la muestra “M₁” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 22.

Tabla 22

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₁) a T=150 °C

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	5,38	4,91	5,08
CO ₂ (%)	4,1	4,0	3,8
HC (ppm)	1973	2010	2095
Lambda	0,638	0,640	0,626
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	43 °C	42 °C	42 °C
T catalizador:	150 °C	151 °C	150 °C
T salida:	80 °C	79 °C	79 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 150 °C con la muestra M₁ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Cambiar la temperatura a 200 °C con la muestra “M₁” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 23.

Tabla 23

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₁) a T=200 °C

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	3,88	3,03	3,53
CO ₂ (%)	2,8	2,7	3,0
HC (ppm)	1885	1799	1790
Lambda	0,607	0,623	0,630
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	48 °C	49 °C	49 °C
T catalizador:	200 °C	201 °C	200 °C
T salida:	89 °C	91 °C	93 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 200 °C con la muestra M₁ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Modificar la temperatura a 260 °C con la muestra “M₁” esperar un cierto tiempo para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 24.

Tabla 24

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₁) a T=260 °C

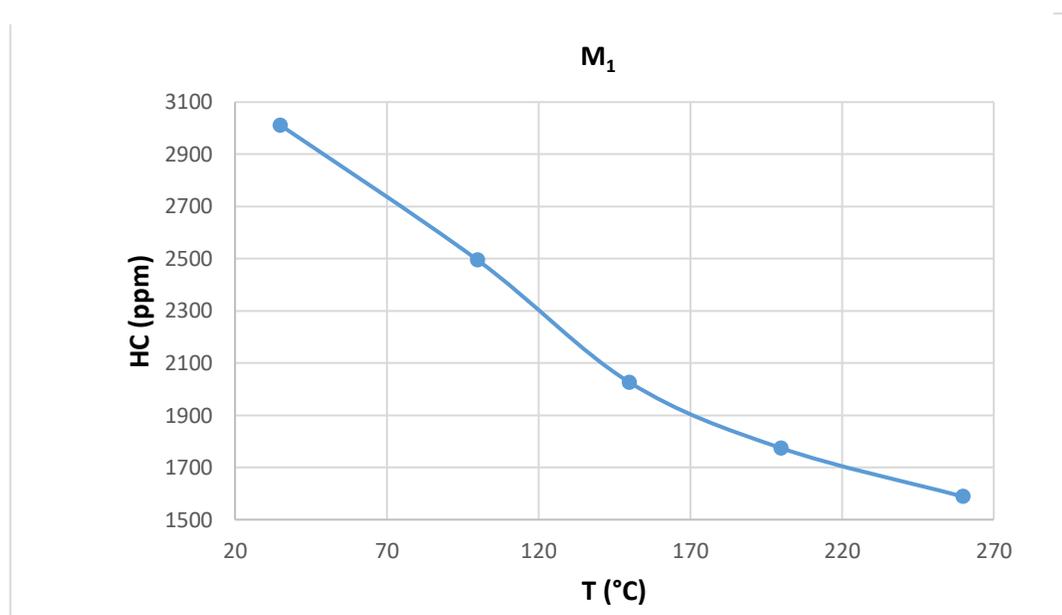
Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	4,19	3,39	3,13
CO ₂ (%)	3,4	2,6	2,2
HC (ppm)	1752	1581	1595
Lambda	0,638	0,620	0,598
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	62 °C	63 °C	62 °C
T catalizador:	258 °C	257 °C	257 °C
T salida:	137 °C	138 °C	137 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 260 °C con la muestra M₁ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

En la figura 42, los hidrocarburos (HC, ppm) están en función de la temperatura donde se observó que a medida que se incrementa la temperatura de 35 °C a 260 °C los HC disminuyen de 3011 ppm a 1588 ppm, lo que representa que la muestra M_1 tuvo una reducción del 47,3 % en la emisión de este gas.

Figura 42

Emisión (HC, ppm) en función de la temperatura de la muestra M_1

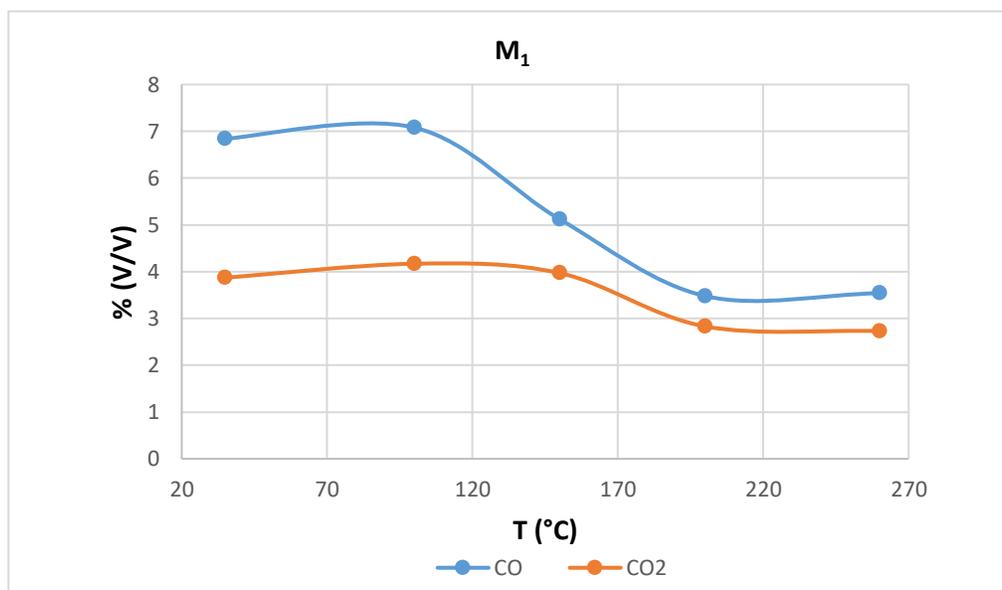


Nota: En el gráfico se puede observar los hidrocarburos en función de la temperatura, donde se puede apreciar que a mayor temperatura menor emisión de hidrocarburos

Con relación al dióxido y monóxido de carbono se observó una variación entre los gases, ya que disminuyó el porcentaje del CO_2 con respecto al CO a medida que se incrementó la temperatura, como se muestra en la figura 43.

Figura 43

Emisión (% CO₂) y (% CO) en función de la temperatura de la muestra M1



Nota: En el gráfico se puede observar el porcentaje de volumen del dióxido y monóxido de carbono en función de la temperatura, donde se puede apreciar que a mayor temperatura menor emisión de estos gases

El porcentaje de reducción en presencia del convertidor catalítico regenerado con el dióxido de carbono fue de 29,5 % y con el monóxido de carbono fue de 48,2 % con respecto a los valores de los gases de emisión a temperatura ambiente.

4.3.2 Análisis de la muestra M2 con los gases de emisión

Para este análisis se colocó la muestra “M₂” hasta la posición media del reactor por el que circulan los gases de emisión donde se varió la temperatura del reactor desde la temperatura ambiente; requiriendo 20 minutos para el cambio de temperatura. Los datos obtenidos tomados por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 25.

Tabla 25

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₂) a T ambiente

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	6,71	6,86	6,16
CO ₂ (%)	3,7	3,6	3,6
HC (ppm)	2903	2917	3006
Lambda	0,574	0,567	0,572
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	31 °C	31 °C	31 °C
T catalizador:	35 °C	34 °C	34 °C
T salida:	29 °C	29 °C	29 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a temperatura ambiente con la muestra M₂ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Cambiar la temperatura a 100 °C con la muestra “M₂” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 26.

Tabla 26

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₂) a T=100 °C

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	7,44	7,55	7,63
CO ₂ (%)	4,9	5,0	5,1
HC (ppm)	2404	2409	2427
Lambda	0,623	0,625	0,626
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	32 °C	33 °C	32 °C
T catalizador:	101 °C	100 °C	100 °C
T salida:	46 °C	46 °C	45 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 100 °C con la muestra M₂ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Modificar la temperatura a 150 °C con la muestra “M₂” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 27.

Tabla 27

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₂) a T=150 °C

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	7,60	6,76	7,10
CO ₂ (%)	4,9	4,4	4,6
HC (ppm)	2211	2203	2293
Lambda	0,626	0,622	0,620
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	41 °C	41 °C	41 °C
T catalizador:	150 °C	150 °C	151 °C
T salida:	72 °C	73 °C	74 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 150 °C con la muestra M₂ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Cambiar la temperatura a 200 °C con la muestra “M₂” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 28.

Tabla 28

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₂) a T=200 °C

Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	5,36	4,63	4,64
CO ₂ (%)	3,5	2,9	3,7
HC (ppm)	2191	2042	2058
Lambda	0,605	0,592	0,631
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	53 °C	52 °C	53 °C
T catalizador:	201 °C	201 °C	200 °C
T salida:	98 °C	96 °C	96 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 200 °C con la muestra M₂ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

Cambiar la temperatura a 260 °C con la muestra “M₂” esperar el tiempo de 20 min para que se estabilice la temperatura y dejar circular nuevamente los gases de escape. Los datos obtenidos por el analizador y los controladores de temperatura se registran en la tabla 29.

Tabla 29

Gases de emisión a la salida del reactor con catalizador (M₂) a T=260 °C

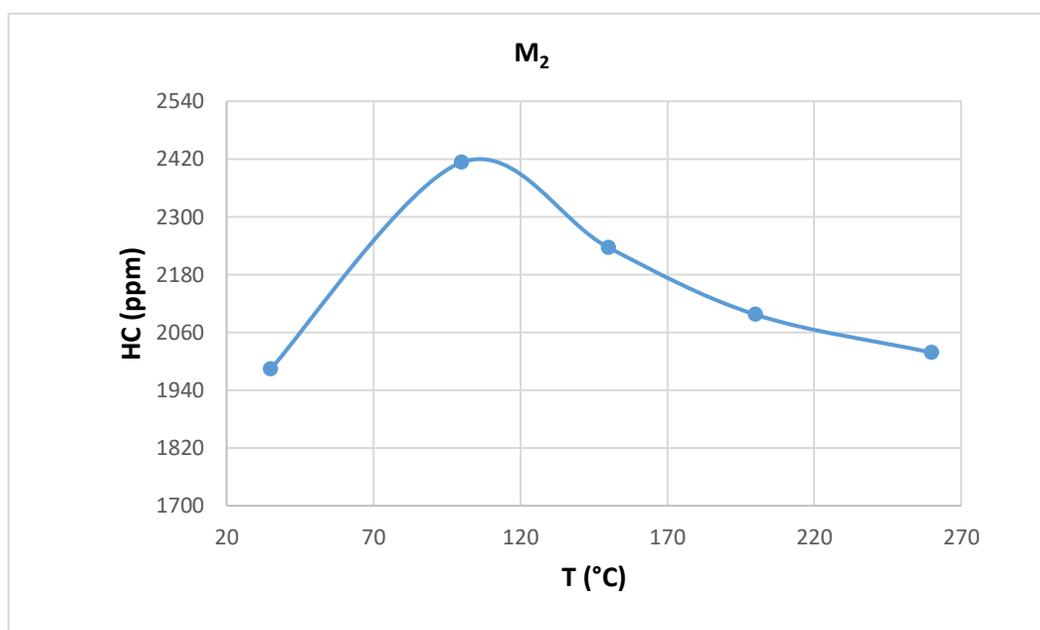
Gases Emisión a la salida del reactor			
Variables	1	2	3
O ₂ (%)	0	0	0
CO (%)	4,42	6,31	3,74
CO ₂ (%)	3,0	3,7	2,7
HC (ppm)	2080	2072	1904
Lambda	0,599	0,604	0,602
rpm	900	900	900
Reactor			
T entrada:	61 °C	61 °C	62 °C
T catalizador:	258 °C	259 °C	256 °C
T salida:	136 °C	138 °C	139 °C

Nota: En esta tabla se puede observar los valores de emisión a la salida del tubo reactor provenientes de vehículo a la temperatura de 260 °C con la muestra M₂ del monolito y sus temperaturas (entrada, catalizador, salida)

En la figura 44, los hidrocarburos (HC, ppm) están en función de la temperatura que a medida que esta se incrementa de 35 °C a 258 °C los HC disminuyen de 1984 ppm a 1642 ppm, lo que representa una reducción del 17,23 % menor que M_1 lo que indica que la reducción del catalizador a 350 °C es más eficiente que la reducción a 300 °C.

Figura 44

Emisión (HC, ppm) en función de la temperatura de la muestra M_2

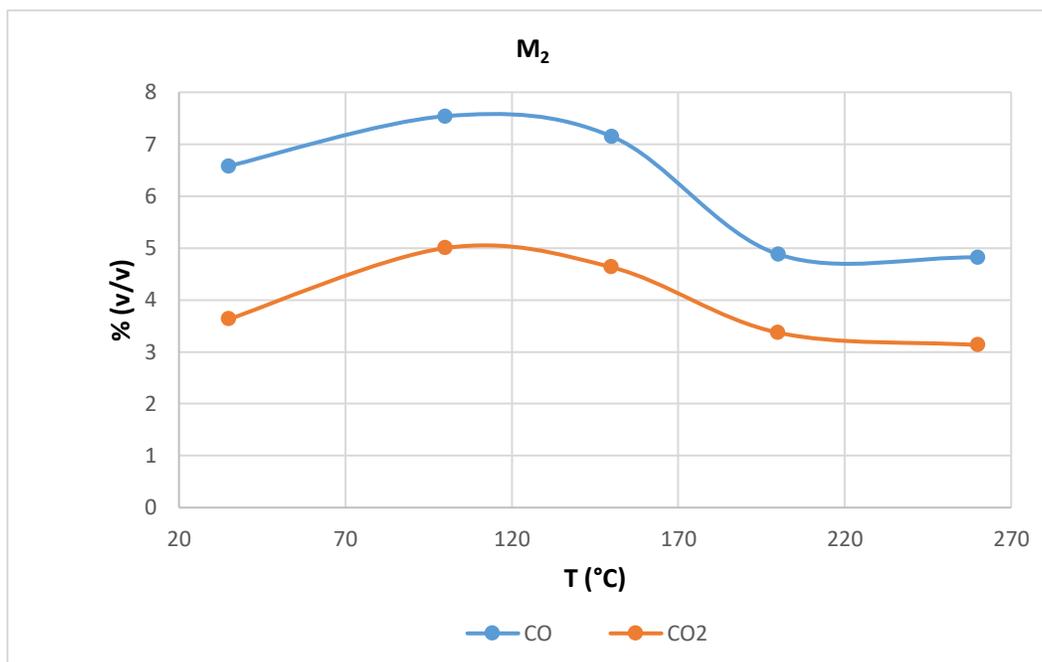


Nota: En el gráfico se puede observar los hidrocarburos en función de la temperatura, donde se puede apreciar que de 30 °C a 100 °C aumenta la emisión de hidrocarburos; teniendo a los 100 °C el punto más alto de emisión del gas y a partir de los 100 °C en adelante la emisión de hidrocarburos es menor.

Para M_2 los porcentajes del dióxido de carbono y de monóxido de carbono no presentan mayor variación con respecto a M_1 , como se indica en la figura 45.

Figura 45

Emisión (% CO_2) y (% CO) en función de la temperatura de la muestra M_2



Nota: En el gráfico se puede observar el porcentaje de volumen del dióxido y monóxido de carbono en función de la temperatura, donde se puede apreciar que a partir de los 100 °C las emisiones empiezan a disminuir.

El convertidor catalítico regenerado presenta un porcentaje de reducción en el dióxido de carbono de 13,8 % y en el monóxido de carbono de 26,7 %, respecto al valor de los gases de emisión a temperatura ambiente. Lo que confirma que la reducción del convertidor catalítico a 350 °C es más efectiva que la reducida a 300 °C.

4.4 Porcentaje de conversión de los gases de emisión

Los porcentajes de conversión de la emisión de gases están expresados mediante la siguiente relación matemática:

$$\% \text{ Conversión de gas emisión} = \left(\frac{\text{gas de emisión}_{\text{entrada}} - \text{gas emisión}_{\text{salida}}}{\text{gas de emisión}_{\text{entrada}}} \right) \times 100$$

Ecuación 3

Cálculo de porcentaje de gases de emisión por componente

Donde:

Gas de emisión de entrada en el caso del CO y CO₂ se mide en porcentaje (%)

Gas de emisión de entrada en el caso de HC se mide en partes por millón (ppm)

Gas de emisión de salida en el caso del CO y CO₂ se mide en porcentaje (%)

Gas de emisión de salida en el caso de HC se mide en partes por millón (ppm)

Conversión de gas de emisión esta dado en porcentaje (%)

De las pruebas con el analizador de gases a diferentes temperaturas se tomaron los valores por triplicado con la muestra M₁ y aplicando la ecuación 3 se obtuvo los porcentajes de conversión de los gases de emisión, estos valores calculados son detallados en la tabla 30.

Tabla 30

Porcentajes de conversión de los gases de emisión de la muestra M_1

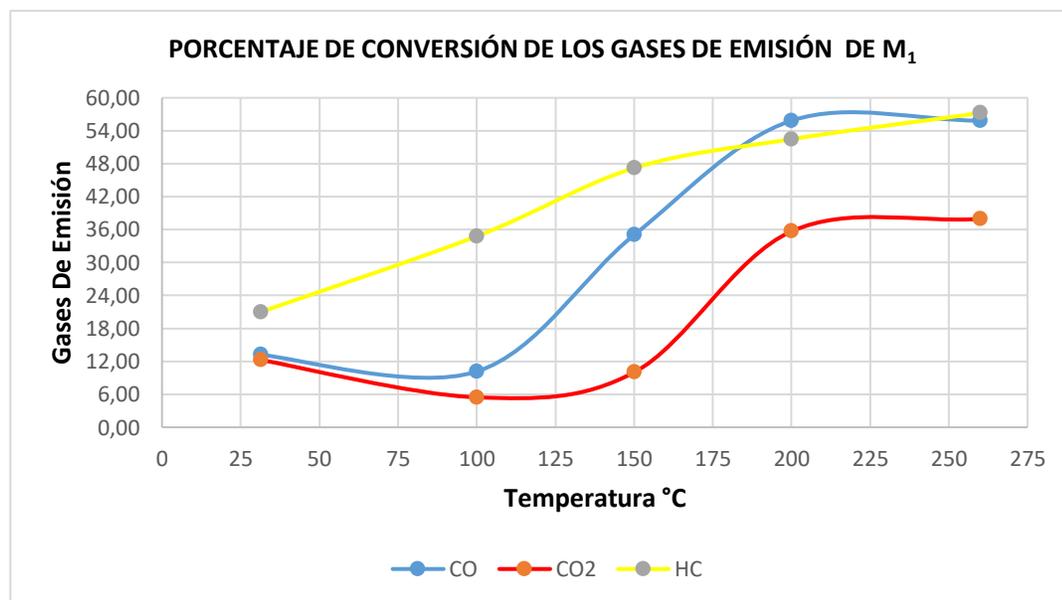
TEMPERATURA (°C)	PORCENTAJE DE CONVERSIÓN DE LOS GASES DE EMISIÓN M_1		
	CO	CO ₂	HC
31,32	13,20	12,27	21,00
100	10,15	5,45	34,78
150	35,03	10,00	47,21
200	55,84	35,68	52,48
260	55,84	37,95	57,22

Nota: En esta tabla se puede observar los porcentajes de conversión calculados a las diferentes temperaturas de los gases de emisión por componente de la muestra M_1

En la figura 46 se puede apreciar el diagrama de linealidad de la muestra M_1 realizado con los datos registrados en la tabla 30, con el fin de determinar la variación de los gases.

Figura 46

Diagrama de linealidad de los gases de emisión de M_1



Nota: En el gráfico se puede observar el porcentaje de conversión de los gases por componente

Para la muestra M₂ se realizó el mismo procedimiento que en M₁ utilizando el mismo cálculo para determinar los porcentajes de conversión de los gases de emisión, estos valores calculados son detallados en la tabla 31.

Tabla 31

Porcentajes de conversión de los gases de emisión de la muestra M₂

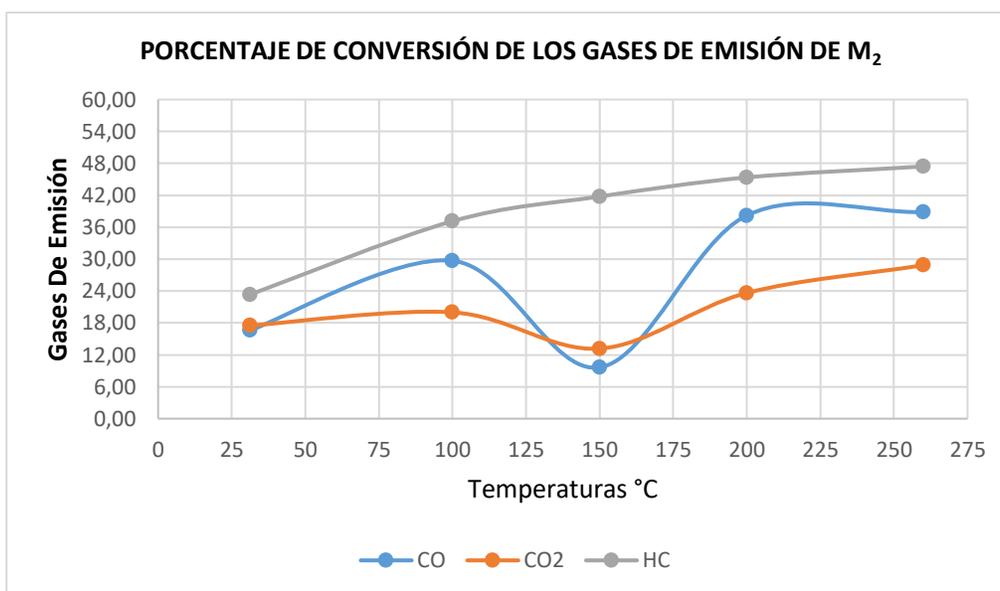
TEMPERATURA (°C)	PORCENTAJE DE CONVERSIÓN DE LOS GASES DE EMISIÓN M ₂		
	CO	CO ₂	HC
31,33	16,62	17,50	23,35
100	29,70	20,00	37,13
150	9,64	13,18	41,77
200	38,20	23,64	45,36
260	38,83	28,86	47,42

Nota: En esta tabla se puede observar los porcentajes de conversión calculados a las diferentes temperaturas de los gases de emisión por componente de la muestra M₂

En la figura 47 se puede apreciar el diagrama de linealidad de la muestra M_2 realizado con los datos registrados en la tabla 31, con el fin de determinar la variación de los gases.

Figura 47

Diagrama de linealidad de los gases de emisión de M_2



Nota: En el gráfico se puede observar el porcentaje de conversión de los gases por componente

4.4.1 Comparativa de valores de los gases de emisión entre las muestras M_1 y M_2

La comparación de los valores de los gases por separado entre las muestras M_1 y M_2 permitió determinar en qué porcentaje el convertidor catalítico regenerado redujo los gases al variar la temperatura, determinado así cuál de las dos muestras tuvo un tratamiento óptimo.

Para realizar la comparativa entre la M_1 y M_2 referente al monóxido de carbono se tienen los valores que se detallan en la tabla 32, los mismos que permitieron realizar la gráfica de la variación del CO figura 48.

Tabla 32

Comparativa de valores del CO entre las muestras M_1 y M_2

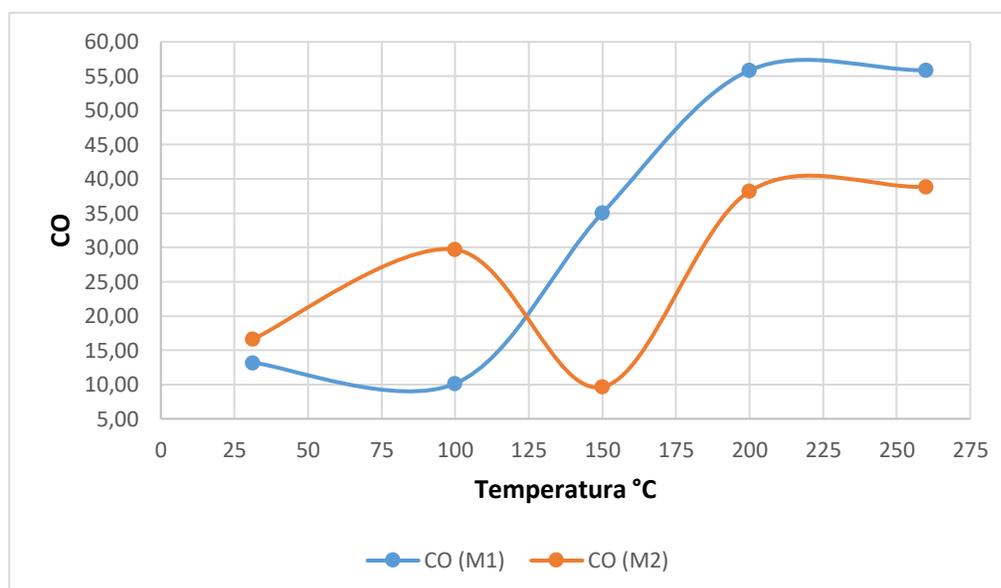
TEMPERATURA (°C)	M_1	M_2
	CO	CO
31,33	13,20	16,62
100	10,15	29,70
Con Catalizador		
150	35,03	9,64
200	55,84	38,20
260	55,84	38,83

Nota: En esta tabla se puede observar la comparativa realizada del monóxido de carbono entre la muestra M_1 y M_2

En la figura 48 se puede apreciar la variación del monóxido de carbono en cada una de las muestras, donde M_1 redujo mayor cantidad de gas en comparación a M_2

Figura 48

Diagrama de linealidad del CO entre las muestras M_1 y M_2



Nota: En el gráfico se puede observar la variación que presenta el CO de la muestra M_1 en comparación a la muestra M_2

Para realizar la comparativa entre la M_1 y M_2 referente al dióxido de carbono se tienen los valores que se detallan en la tabla 33, los mismos que permitieron realizar la gráfica de la variación del CO_2 figura 49.

Tabla 33

Comparativa de valores del CO_2 entre las muestras M_1 y M_2

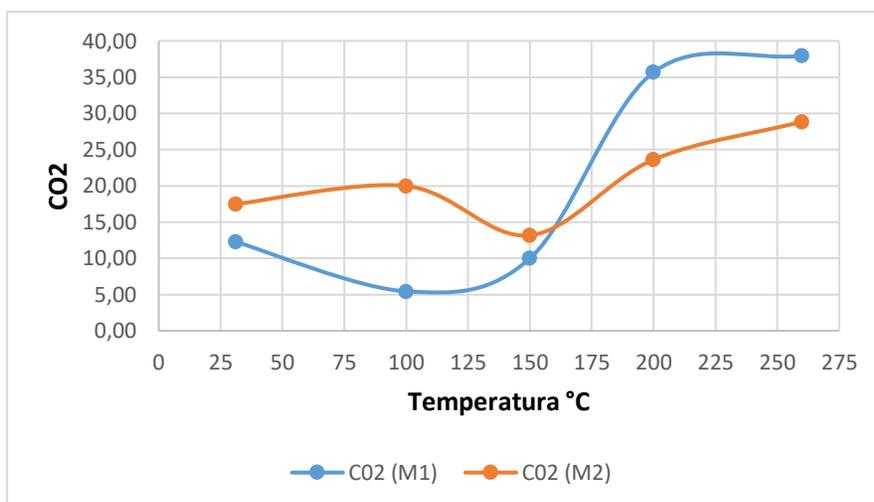
TEMPERATURA (°C)	M ₁	M ₂
	CO ₂	CO ₂
31,33	12,27	17,50
100	5,45	20,00
Con Catalizador 150	10,00	13,18
200	35,68	23,64
260	37,95	28,86

Nota: En esta tabla se puede observar la comparativa realizada del dióxido de carbono entre la muestra M_1 y M_2

En la figura 49 se puede apreciar la variación del dióxido de carbono en cada una de las muestras, donde M_1 redujo mayor cantidad de gas en comparación a M_2

Figura 49

Diagrama de linealidad del CO_2 entre las muestras M_1 y M_2



Nota: En el gráfico se puede observar la variación presenta el CO_2 de la muestra M_1 en comparación a la muestra M_2

Para realizar la comparativa entre la M_1 y M_2 referente a los hidrocarburos se tienen los valores que se detallan en la tabla 34, los mismos que permitieron realizar la gráfica de la variación del HC figura 50.

Tabla 34

Comparativa de valores del HC entre las muestras M₁ y M₂

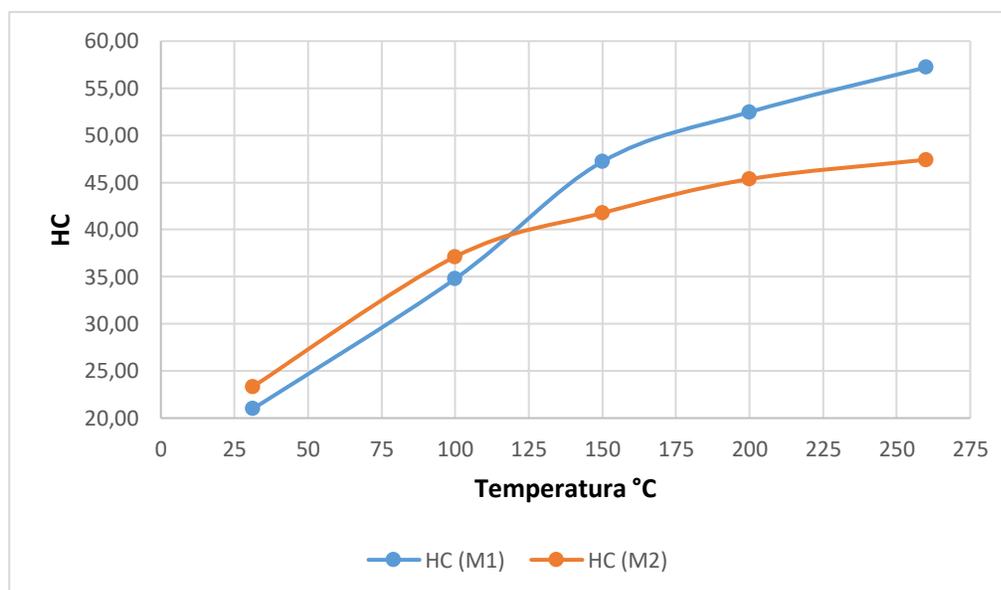
TEMPERATURA (°C)	M ₁	M ₂
	HC	HC
31,33	21,00	23,35
100	34,78	37,13
Con Catalizador 150	47,21	41,77
200	52,48	45,36
260	57,22	47,42

Nota: En esta tabla se puede observar la comparativa realizada con los hidrocarburos entre la muestra M₁ y M₂

En la figura 50 se puede apreciar la variación de los hidrocarburos en cada una de las muestras, donde M₂ redujo mayor cantidad de gas en comparación a M₁

Figura 50

Diagrama de linealidad del HC entre las muestras M₁ y M₂



Nota: En el gráfico se puede observar la variación que presenta el HC de la muestra M₁ en comparación a la muestra M₂

CAPÍTULO V

5. Marco administrativo

En este capítulo se detalla aspectos económicos, logísticos, los recursos necesarios que garantizaron la viabilidad y factibilidad en la ejecución del proyecto; así como las conclusiones y recomendaciones que surgieron de la ejecución del proyecto denominado: Investigación de la regeneración de convertidores catalíticos de vehículos mediante el sistema de tratamiento de metales en monolitos.

5.1 Factibilidad de la investigación

Para el desarrollo del trabajo de investigación se consideró la optimización y disponibilidad de recursos materiales, económicos y tecnológicos necesarios que sirvieron para el cumplimiento de los objetivos que se plantearon.

5.1.1 Recursos materiales

Los recursos materiales utilizados para el desarrollo de la investigación se detallan en la tabla 35:

Tabla 35*Recursos materiales*

Cantidad	Descripción
1	Convertidor catalítico de tres vías (usado)
7	Materiales tubo reactor
3	Componentes electrónicos
6	Componentes eléctricos
1	Gabinete metálico liviano 30 x 30 x 20 cm
1	Placa de acrílico 30 x 30 cm
11	Control de flujo de gases
3	Gases Inertes
26	Materiales adicionales
1	Soporte metálico
1	Extensión de acople para el reactor
1	Analizador de gases Kane AUTO plus

Nota: En esta tabla se puede observar todos los recursos materiales que se utilizaron para la construcción del sistema micro reactor.

5.1.2 Recurso humano

En la tabla 36 se describe el talento humano, quien aportó conocimientos e ideas que sirvieron para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Tabla 36*Recurso humano*

Orden	Nombre	Función
1	Sr. Luis Caisalitin	Investigador
2	Sr. Ricardo Cruz	Investigador
3	Ing. Leonidas Quiroz	Director del proyecto de investigación
		Colaborador científico
		Colaborador de emisiones vehiculares
4	Dr. Trino Romero	Colaborador científico
5	Ing. Catherine Donoso	Colaborador científico

Nota: En esta tabla se puede observar el talento humano indispensable para el desarrollo de la investigación.

5.1.3 Recurso financiero

El financiamiento por parte de los investigadores para los recursos materiales y pruebas necesarias para el desarrollo del estudio, tuvo un costo total de \$ 1.482,18 y que se detalla en la tabla 37.

Tabla 37

Costo recurso material

Orden	Descripción	Costo unitario	Cantidad	Total
1	Convertidor catalítico de tres vías (usado)	120,00	1	120,00
2	Micro reactor	197,59	1	197,59
3	Sistema de control electrónico de temperatura	359,19	1	359,19
4	Sistema de control de flujo de gases	209,40	1	209,40
5	Tanque Oxígeno (recarga)	30,00	1	30,00
6	Tanque Nitrógeno (recarga)	45,00	1	45,00
7	Recipientes de vidrio	1,50	4	6,00
8	Soporte para el control electrónico y micro reactor	55,00	1	55,00
8	Extensión de acople para el reactor con el tubo de escape del vehículo	40,00	1	40,00
TOTAL				1.062,18

Nota: En esta tabla se puede observar el desglose de los diferentes costos del presupuesto necesario para el desarrollo de la investigación.

Del presupuesto para el proyecto de investigación surgieron gastos adicionales que se detallan en la tabla 38.

Tabla 38*Gastos varios*

Orden	Detalle	Costo Unitario	Cantidad	Total
1	Movilización	20,00	20	400,00
2	Impresiones adhesivas	20,00	1	20,00
TOTAL				420,00

Nota: En esta tabla se puede observar los gastos adicionales del presupuesto para el desarrollo de la investigación.

5.1.4 Recursos tecnológicos

Los recursos tecnológicos utilizados para determinar el análisis de resultados y desarrollo del proyecto de investigación, se detallan en la tabla 39.

Tabla 39

Recursos tecnológicos

Software	Descripción
CADe SIMU	Programa para el desarrollo de circuitos eléctricos
KANE LIVE	Programa para identificar fallas relacionadas con emisiones
Paquete de Office	Programa de desarrollo de documentos de escritura y cálculo
Equipo	Tipo de prueba
Analizador de gases Kane AUTO plus	Medición de la cantidad de emisiones de gases de escape generadas por el vehículo

Nota: En esta tabla se puede observar los recursos tecnológicos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Conclusiones

- Se diseñó y se construyó un sistema de regeneración por el método de oxidación – reducción de catalizadores automotrices mediante un reactor a temperatura programada y la inyección de gases inertes como nitrógeno e hidrógeno para la recuperación de los materiales del monolito, mejorando su capacidad catalítica, la misma que se validó a través de pruebas de emisiones con equipos de análisis calibrado y certificado.
- Con la regeneración por el método oxidación - reducción se redujo los niveles iniciales de los gases de emisión de CO, HC, NOx provenientes del convertidor catalítico gastado en un 60 % por lo que la investigación fue exitosa.
- Para la construcción del micro reactor se seleccionaron materiales de alta transferencia de calor, como es el acero inoxidable con una conductividad térmica de $12.4 \left(\frac{\text{Btu}}{\text{h}\cdot\text{ft}} \right)$ a una temperatura de 500 °C; que permite una óptima aplicación del método de oxidación – reducción de los metales preciosos del monolito que se activan a los 250 °C alcanzando así la regeneración del convertidor catalítico.
- En el proceso de oxidación de las muestras se lo realizó dentro de los parámetros de funcionamiento del micro reactor a una temperatura de 300 °C, flujo total de gases $\text{N}_2 + \text{O}_2$ de $162 \left(\frac{\text{CC}}{\text{min}} \right)$ y una relación volumen – volumen de $48.23 \% \left(\frac{\text{O}_2}{\text{N}_2} \right)$; el cual permitió una correcta aplicación del método.
- En el proceso de reducción de las muestras se lo realizó a una temperatura de 350 °C, flujo total de gases $\text{N}_2 + \text{H}_2$ de $138.22 \left(\frac{\text{CC}}{\text{min}} \right)$ y una relación volumen – volumen de $40.41 \% \left(\frac{\text{H}_2}{\text{N}_2} \right)$; el cual permitió terminar la regeneración del monolito.

- Se desarrolló un método de prueba experimental para la medición de gases (CO, CO₂, O₂, HC) por medio del analizador AUTO plus con la adaptación de una proporción del convertidor regenerado dentro del sistema micro rector, a través de una variación de temperatura de 100 °C hasta 260 °C para llegar a niveles de activación del monolito y validar la variación de los índices de emisiones.
- La medición de los niveles del monóxido de carbono (CO) al pasar por la muestra del monolito regenerado con la temperatura de 35 °C registró un porcentaje del 6,84% y al aumentar la temperatura a 260 °C el porcentaje fue del 3.57% dando como resultado una disminución de los niveles de emisión del 47.82%.
- La medición de los niveles del dióxido de carbono (CO₂) al pasar por la muestra del monolito regenerado con la temperatura de 35 °C registró un porcentaje del 3,86% y al aumentar la temperatura a 260 °C el porcentaje fue del 2,73% dando como resultado una disminución de los niveles de emisión del 29,27%.
- La medición de los niveles de hidrocarburos (HC) al pasar por la muestra del monolito regenerado con la temperatura de 35 °C registró un valor de 3011 ppm y al aumentar la temperatura a 260 °C el valor fue de 1588 ppm dando como resultado una disminución de los niveles de emisión del 47.26%.
- La medición de los niveles de oxígeno (O₂) no fueron registrados debido a que el vehículo de prueba utilizado no contaba con un convertidor catalítico, regulador de oxígeno por lo que presenta una mezcla rica dando un valor del 0 % de recuperación de los niveles de emisión.
- Se realizó una relación matemática que contempla los niveles de emisiones a la entrada y salida del micro reactor para establecer porcentualmente la recuperación del monolito

referido a la capacidad de conversión catalítica de los metales preciosos como el platino, paladio, rodio; al pasar por la muestra regenerada y con el incremento de la temperatura.

Recomendaciones

- Desarrollar un proceso de manufactura ideal para la extracción del monolito completo de un catalizador automotriz de dos vías o tres vías de diferentes modelos, sin destruir la estructura interna y externa del mismo.
- Realizar el proceso de oxidación – reducción a temperatura y tiempo programado de un monolito a escala real de un convertidor catalítico usado de dos vías, tres vías, reductor de óxidos nitrosos y cualquier otro tipo que permita realizar pruebas estáticas y dinámicas para verificar la cantidad de emisiones de gases que produce un vehículo en base a normativas vigentes.
- Realizar el proceso de oxidación – reducción a temperatura y tiempo programado de un monolito a escala real de un convertidor catalítico reductor de óxidos nitrosos con inyección de UREA al 32% (ADBLUE) para motores diésel que permita realizar pruebas estáticas y dinámicas para verificar la cantidad de emisiones de gases que produce un vehículo en base a normativas vigentes.
- Calibrar el analizador de gases Kane AUTO plus, antes de realizar las pruebas de conversión de los gases de emisión, de acuerdo con la metodología recomendada por el fabricante de manera de poder detectar los gases de emisión de oxígeno (O₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) y el Lambda.
- Para realizar las pruebas de gases es necesario llevar el motor de combustión interna a una temperatura ideal de funcionamiento con la finalidad de obtener los menores niveles de contaminación en vista que el catalizador comienza a funcionar a partir de los 250 °C con el fin de preservar la vida útil de los catalizadores automotrices.

- Es importante analizar el comportamiento de la gestión electrónica gasolina – diésel cuando un convertidor catalítico automotriz se encuentre totalmente taponado, así determinando sus características operativas referidas al consumo de combustible, torque, potencia y emisiones.
- Realizar la caracterización de los materiales del monolito después de la reducción, mediante la prueba TPR (reducción a temperatura programada) para determinar el consumo total de hidrógeno y las temperaturas de los procesos de reducción de las especies metálicas presentes en la muestra de monolito.
- Realizar la caracterización de los materiales del monolito después de la oxidación, mediante la prueba TPO (oxidación a temperatura programa) para determinar el consumo del oxígeno de las especies metálicas en la muestra de monolito.
- Realizar la caracterización de los materiales del monolito mediante la prueba TGA (análisis termogravimétrico) para determinar el porcentaje de coque presente en la muestra con la variación de masas al inicio y finalización de la regeneración.
- Realizar la caracterización de los materiales del monolito después de la regeneración, mediante la prueba de quimisorción de hidrógeno para determinar valores de volumen de hidrógeno absorbido por los metales nobles (Pt, Pd, Rh) de la muestra con el fin de establecer el porcentaje de dispersión metálica.
- Desarrollar un proceso de soldadura para ensamblar la estructura metálica que contiene al monolito del catalizador automotriz de dos vías o tres vías de diferentes modelos.

Bibliografía

- Alonso Pérez, J. M. (2001). *Electromecánica de Vehículos. Sistemas Auxiliares del Motor*. Madrid: Paraninfo.
- Álvarez Flórez, J. A. (2005). *Motores alternativos de combustión interna*. Cataluña: Ediciones UPC.
- Asencio, I., Rincón, J., Camarillo, R., & Martín, A. (24 de Julio de 2008). *Reciclado de catalizadores de automóviles*. Recuperado el 12 de Julio de 2019, de REDISA: <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A3.pdf>
- Bosch, R. G. (1996). *Manual de la técnica del automóvil*. Alemania: Reverté S.A.
- Brain. (s.f.). *Catalizadores*. Recuperado el 16 de Enero de 2020, de Brain: <http://www.catalizadores-brain.com/#1527609175813-f577a6d8-adeb>
- Calleja, D. G. (2015). *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo Otto*. Madrid: Paraninfo.
- Castro, M., & Lozano, G. (27 de Octubre de 2014). *Regeneración de catalizadores industriales*. Recuperado el 08 de Mayo de 2019, de Slideshare: <https://es.slideshare.net/Galozano23/regeneracion-de-catalizadores-industriales>
- Centi, G. (20 de Diciembre de 2000). *Catalizadores de paladio compatibles con tecnologías catalíticas ambientales para emisiones gaseosas*. Recuperado el 12 de Agosto de 2019, de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1381116901001558>
- Crouse, W. H. (2007). *Motores de automóvil*. Valencia: Alfaomega.
- Fernández, L., & Escudero, P. (01 de Enero de 2005). *Evolución del Contenido de Azufre en la Gasolina*. Recuperado el 02 de Junio de 2019, de Scielo: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v20n1/art07.pdf>
- Garzon, L. R. (18 de Agosto de 2018). *Contaminación en las ciudades de Ecuador*. Recuperado el 18 de Abril de 2019, de www. Pressreader.com: www.pressreader.com/ecuador/la-hora-cotopaxi/20180818/textview
- Gerschler, H. (1985). *Tecnología de automóvil*. Barcelona: Reverte S.A.
- GUIA AUTOMOTRIZ. (s.f.). *En que consiste el catalizador*. Recuperado el 25 de Febrero de 2021, de Guia Automotriz: https://www.guiaautomotrizcr.com/Articulos/articulos_automotriz_conozca_El%20catalizador.php

- Herranz, D. (03 de Noviembre de 2015). *Como comprobar la eficiencia del catalizador*. Recuperado el 24 de Agosto de 2019, de BlogMecánicos:
<http://www.blogmecanicos.com/2015/11/como-comprobar-la-eficiencia-del.html>
- IMPORT ACEROS. (s.f.). *Tubería y accesorios en acero inoxidable*. Recuperado el 03 de Febrero de 2020, de Import Aceros: <https://www.importaceros.com/tuberias>
- INEC. (11 de Diciembre de 2018). *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. Recuperado el 05 de Abril de 2019, de Ecuador en cifras:
[http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2017/2017_TRANSPORT E_PRESENTACION.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/2017/2017_TRANSPORT_E_PRESENTACION.pdf)
- INEN. (s.f.). *Servicio Ecuatoriano de Normalizacion INEN*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2020, de Servicio Ecuatoriano de Normalizacion INEN:
<https://www.normalizacion.gob.ec/>
- LINDE. (19 de Octubre de 2012). *Hoja de seguridad del Materia (SDS) Nitrógeno*. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de LINDE: http://www.linde-gas.ec/en/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20NITROGENO_tcm339-98255.pdf
- LINDE. (19 de Octubre de 2012). *Hoja de seguridad del material (SDS) Hidrógeno*. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de LINDE: http://www.linde-gas.ec/en/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20HIDROGENO_tcm339-98265.pdf
- LINDE. (19 de Octubre de 2012). *Hoja de seguridad del material (SDS) oxígeno*. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de LINDE: http://www.linde-gas.ec/en/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20OXIGENO%20COMPRIMIDO_tcm339-98251.pdf
- MOTORGIGA. (s.f.). *Catalizador*. Recuperado el 02 de Marzo de 2021, de MOTORGIGA:
<https://diccionario.motorgiga.com/catalizador>
- Nilsson, J. W. (1995). *Circuitos eléctricos*. Madrid: Pearson.
- NKS. (s.f.). *Aceros inoxidables 304 y 304L*. Recuperado el 29 de Enero de 20221, de NKS:
<https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-304/>
- Oliva, A. C., & Herranz, G. S. (1993). *Tecnología eléctrica*. Madrid: Interamericana de España S.A.
- Paz Guitian, M. A. (1999). *Manual de Automóviles*. Madrid: Dossat.
- Pérez Belló, M. Á. (2011). *Sistemas Auxiliares del Motor*. España: Paraninfo.
- Rincon, Asencio, Camarillo, & Martín. (22 de Enero de 2008). *Reciclado de catalizadores de automóviles*. Recuperado el 11 de Agosto de 2019, de Tratamiento De Residuos:
<https://previa.uclm.es/profesorado/rafaelcamarillo/esp/Art%EDculos/Reciclado%20de%20catalizadores%20de%20automoviles.pdf>

- Robles, A. (15 de Febrero de 2003). *El catalizador, funcionamiento*. Recuperado el 01 de septiembre de 2019, de Coches.net: <https://debates.coches.net/discussion/4162/el-catalizador-funcionamiento>
- Segovia, A. D. (09 de Febrero de 1995). *Desactivación de la zeolita zsm-5 en la conversión de mezclas acetona/n-butanol en hidrocarburos*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2019, de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=64707>
- SENPLADES. (2017). Plan Nacional del Buen Vivir. *Plan Nacional del Buen Vivir*, 64.
- Valero Fernandez, F. (2014). Estudio para la recuperación del platino a partir de residuos catalíticos de automóviles. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Vázquez, J. (s.f.). *Convertidor catalítico*. Recuperado el 02 de Marzo de 2021, de e-auto: <http://e-auto.com.mx/enev/index.php/boletines-tecnicos/85-boletines-tecnicos/7032-convertidor-catalitico-tipos>

Anexos