



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO**

**AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**TEMA:**

**REGENERACIÓN DE CATALIZADORES AUTOMOTRICES DE  
MOTORES A GASOLINA A PARTIR DE SUSTANCIAS POLARES**

**AUTORES: UTRERAS GARCIA EDISON JAVIER**

**VALENCIA CHEZA JIMMI DAVID**

**DIRECTOR: ING. RAMIRO ANDRÉS ROSERO AÑAZCO, MSc.**

**IBARRA, MARZO DE 2021**

## CERTIFICADO

### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En calidad de director de plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

### CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es “Regeneración de catalizadores automotrices de motores a gasolina a partir de sustancias polares” presentado por: Utreras García Edison Javier con número de cédula 0402041990 y el señor Valencia Cheza Jimmi David con número de cédula 1003561170, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 31 días del mes de mayo del 2021.

Atentamente,

**RAMIRO ANDRES  
ROSERO  
ANAZCO**



Firmado digitalmente  
por RAMIRO ANDRES  
ROSERO ANAZCO  
Fecha: 2021.06.02  
13:08:37 -05'00'

---

Ing. Ramiro Andrés Rosero Añezco MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**  
**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0402041990		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Utreras Garcia Edison Javier		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Tulcán, Santa Martha de Cuba, Av. 21 de marzo y Calle Carchi		
<b>EMAIL:</b>	ejutrerasg@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	09679961710
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1003561170		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Valencia Cheza Jimmi David		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Ibarra, El Olivo, Av. 17 de julio frente a la UTN		
<b>EMAIL:</b>	jdvalenciac@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062 950 221	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0998826378
<b>DATOS DE LA OBRA</b>			
<b>TÍTULO:</b>	"REGENERACIÓN DE CATALIZADORES AUTOMOTRICES DE MOTORES A GASOLINA A PARTIR DE SUSTANCIAS POLARES"		
<b>AUTOR (ES):</b>	Utreras Garcia Edison Javier; Valencia Cheza Jimmi David		
<b>FECHA:</b>	18 de mayo del 2021		
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>			
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>		
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	<b>INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ</b>		
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco MSc.		

## 2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 03 días del mes de junio del 2021

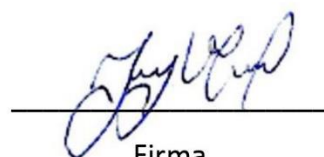
### EL AUTORES:



Firma

Utreras Garcia Edison Javier

C.I: 0402041990



Firma

Valencia Cheza Jimmi David

C.I: 1003561170

## DEDICATORIA

El presente Trabajo de Grado es dedicado con mucho orgullo a mis padres Patricio Utreras y Olga Garcia, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mis hermanas Fernanda y Nayelly por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

**Javier Utreras**

A mi madre, Rosa Cheza, la mujer más importante en mi vida, una mujer luchadora y fuerte que a pesar de todas las adversidades hizo todo lo posible con tanto sacrificio junto con mi padre Juver Valencia, para que todos sus hijos puedan terminar sus estudios, y hoy darle esta alegría de culminar mi carrera y ser un ingeniero con muchas ganas de superarse y seguirse preparando para ser un excelente profesional, ahora es mi turno de darles todo lo mejor que se merecen por tanto esfuerzo, amor y valores que me han llevado a ser la persona que soy ahora.

Así mismo a mis hermanos, Santiago, Daniel, Diego y Cristina, a todos mis sobrinos, que son mi apoyo y motivación en todo momento. A toda mi familia y amigos que siempre confiaron en mí y me brindaron su ayuda en muchos momentos, a mi amiga Salomé, que siempre estuvo apoyándome en las buenas y en las malas.

**Jimmi Valencia**

## **AGRADECIMIENTO**

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Técnica del Norte, institución que me ha brindado sólidos conocimientos para desempeñarme en el campo profesional.

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa Universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi Tutor, por haberme guiado, en la elaboración de este trabajo de Grado, así como, a todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz y todas las personas de las cuales he adquirido conocimiento para formarme como profesional.

**Javier Utreras**

Mi más sincero agradecimiento hacia este prestigioso establecimiento, la Universidad Técnica del Norte, que me brindó la oportunidad de formarme como persona y profesional en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz.

A mi familia, amigos y quienes me apoyaron en todo el proceso para conseguir mi título universitario, siempre agradecido con todos ellos.

De igual forma, agradezco a mi tutor de trabajo de grado y a todos los docentes que tuve el gusto de conocer y aprender de cada uno de ellos, sus enseñanzas durante toda mi carrera que me ayudarán a seguirme preparando y ser un buen profesional.

**Jimmi Valencia**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>RESUMEN</b>	XIV
<b>ABSTRACT</b>	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XVI
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>1</b>
<b>1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	1
1.2. Situación actual	2
1.3. Prospectiva	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Alcance	3
1.6. Justificación	4
1.7. Motores de combustión interna MEP	5
1.7.1. Emisiones contaminantes en motores MEP	6
1.8. Estrategias para reducir las emisiones contaminantes	7
1.9. Convertidor catalítico	8
1.9.1. Tipos de catalizadores	8
1.9.2. Componentes del catalizador	9
1.9.3. Principio de funcionamiento del catalizador	9
1.9.4. Rendimiento del convertidor catalítico	10
1.10. Tecnología para regeneración de catalizadores	12
1.11. Sustancias polares	13
1.12. Fluídos supercríticos	13
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>14</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>14</b>
2.1. Metodología de la investigación	14
2.1.1. Propósito investigativo	14
2.1.2. Determinación de la metodología de investigación	14
2.1.3. Procesos metodológicos	15

2.2. Materiales y equipos	15
2.2.1. Sustancia polar	16
2.2.2. Caldera pirotubular	17
2.2.3. Analizador de gases brain bee ags-688	17
2.2.4. Scanner bosch vcm ii mazda (vehicle communication module)	18
2.2.5. Pistola térmica de infrarrojo “dR. mETER iR-20”	19
2.2.6. Catalizadores utilizados para la regeneración	20
2.3. Análisis del estado del catalizador	20
2.4. Protocolo de pruebas de emisiones	21
2.5. Protocolo para determinar la eficiencia del catalizador	23
2.6. Protocolo para la regeneración del catalizador	25
2.6.1. Métodos de regeneración de catalizadores	26
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>28</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>28</b>
3.1. Acondicionamiento del vehículo	28
3.1.1. ABC del vehículo	28
3.2. Fabricación de bridas para los catalizadores	32
3.3. Prueba de emisiones y eficiencia de los catalizadores	34
3.3.1. Datos del catalizador servintec	36
3.3.2. Datos del catalizador mazda xk	36
3.3.3. Datos del catalizador indima	37
3.3.4. Datos del catalizador bt50 original	38
3.4. Regeneración de los catalizadores	39
3.4.1. Análisis de datos del catalizador servintec	42
3.4.2. Análisis de datos del catalizador mazda xk	43
3.4.3. Análisis de datos del catalizador indima	44
3.4.4. Análisis de datos del catalizador bt50 original	45
3.4.5. Resultados de los datos de emisiones del catalizador nuevo	46
3.5. Análisis general de los resultados	47
3.6. Análisis de resultados de durabilidad del catalizador original bt50	50
3.7. Análisis de costos de proceso de regeneración	50
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>53</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>53</b>



4.1. Conclusiones	53
4.2. Recomendaciones	55
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>56</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA NUM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1.1</b>	Estrategias activas y pasivas para reducir emisiones	8
<b>1.2</b>	Propiedades de los Fluidos Supercríticos	13
<b>2.1</b>	Propiedades del vapor de agua saturado	16
<b>2.2</b>	Campos de medición del analizador de gases	18
<b>2.3</b>	Lista de catalizadores utilizados	20
<b>2.4</b>	Inspección visual del estado del catalizador y sistema de escape	20
<b>2.5</b>	Límites máximos permisibles para emisiones de motores a gasolina	23
<b>3.1</b>	Tabla de datos de los sensores y actuadores	31
<b>3.2</b>	Resultados de emisiones del catalizador SERVINTEC	36
<b>3.3</b>	Resultados catalizador Mazda XK	37
<b>3.4</b>	Resultados catalizador INDIMA	38
<b>3.5</b>	Resultados catalizador BT50 original	39
<b>3.6</b>	Intervalos de tiempo de regeneración	40
<b>3.7</b>	Resultados catalizador SERVINTEC	43
<b>3.8</b>	Resultados catalizador Mazda XK	44
<b>3.9</b>	Resultados catalizador INDIMA	45
<b>3.10</b>	Resultados catalizador BT50 original	46
<b>3.11</b>	Resultados catalizador Servintec (nuevo)	47
<b>3.12</b>	Resultados antes de la regeneración	48
<b>3.13</b>	Resultados después de la regeneración	49
<b>3.14</b>	Resultados de pruebas de durabilidad	50
<b>3.15</b>	Costos de fabricación de bridas de los catalizadores	51
<b>3.16</b>	Costo de regeneración de catalizadores	51
<b>3.17</b>	Costo de pruebas de emisiones y temperatura de los catalizadores	52
<b>3.18</b>	Costo total de regeneración	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
1.1	Comportamiento de las emisiones en un MEP en función del dosado relativo.	6
1.2	Componentes del catalizador	9
1.3	Proceso químico interno del catalizador	10
1.4	Eficiencia conversión-temperatura	11
1.5	Eficiencia de conversión - Factor lambda	11
1.6	Máquina para limpieza de catalizadores Modelo CTW 2000	12
2.1	Flujograma del desarrollo de Objetivo	15
2.2	Caldera de vapor de tipo piro tubular	17
2.3	Scanner Bosch VCM II Mazda	18
2.4	Pistola térmica Dr. Meter Ir-20	19
2.5	Flujograma del Protocolo de Pruebas de Emisiones	21
2.6	Medición de temperatura con termómetro infrarrojo	22
2.7	Flujograma del Protocolo para determinar la eficiencia del catalizador	24
2.8	Flujograma del Protocolo de regeneración del catalizador	27
3.1	Estado filtro del de aire	28
3.2	Estado de bujía	29
3.3	Lectura de DTC's del vehículo	30
3.4	Reinicio de la ECU	31
3.5	Lectura de flujo de datos	32
3.6	Plano para construcción de bridas	33
3.7	Dimensionamiento de acoples y bridas	33
3.8	Diseño de bridas	34
3.9	Datos de condiciones del vehículo	35
3.10	Presión de trabajo del caldero	39
3.11	Acoplamiento catalizador - válvula de purga	41
3.12	Catalizador regenerándose	41
3.13	Comparación de estado de monolito, antes y después de la regeneración	42

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

<b>ECUACIÓN NUM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1. 1</b>	Ecuación de la combustión de la gasolina	5
<b>2. 1</b>	Ecuación para el cálculo de la eficiencia del catalizador	24

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>ANEXO NUM.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
1.	Requisitos que establece la Normativa ecuatoriana para la Gasolina	60
2.	Límites máximos permisibles para emisiones de motores a gasolina	61
3.	Matrícula de camioneta Mazda BT50 a gasolina	61
4.	Elaboración de bridas y acoples de los catalizadores	62
5.	Resultados de emisiones antes de regeneración del catalizador Mazda BT50	63
6.	Asesoramiento técnico para utilización de la caldera de vapor	64
7.	Regeneración del catalizador mediante vapor de agua saturado	65
8.	Resultados de emisiones, durabilidad del catalizador Mazda BT50	66
9.	Orden de trabajo de mantenimiento de caldera de vapor	67

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación está dirigido al área automotriz, específicamente para vehículos con motores a gasolina, con la alternativa de regeneración de catalizadores automotrices mediante sustancias polares, debido a que estos dispositivos post combustión pierden su efectividad de catálisis de gases contaminantes por causa de combustiones incompletas y mala calidad de la gasolina. Además, en la actualidad en el Ecuador no existe este tipo de procesos y se opta por el reciclaje o comprar catalizadores alternos nuevos que tienen una vida útil de un poco más de un año, es decir que, no tienen la misma durabilidad que uno original que tiene una vida útil de 5 a 8 años, teniendo en cuenta que esto depende de la calidad de metales que integran el monolito cerámico. Esto demuestra que no se da importancia al cuidado del medio ambiente y se prioriza al factor económico, porque en el país está vigente la revisión técnica vehicular (RTV) con la normativa NTE 2204 para emisiones de motores a gasolina y se usa catalizadores alternos de mala calidad solo para pasar la revisión. Por lo tanto, se requiere esta investigación para determinar si el método de regeneración mediante sustancias polares es factible, también se escogió como sustancia polar al vapor de agua saturado por ser de mayor accesibilidad y más económico. Para la regeneración se utilizó una caldera de vapor “piro tubular” mientras que, para evaluar la eficiencia y durabilidad de los catalizadores se realizó pruebas de emisiones y de temperaturas, lo mismo se realizó antes y después del proceso, con estos resultados se obtuvo que la eficiencia de regeneración en catalizadores alternos usados es menor al 30%, mientras que en catalizadores originales usados la eficiencia de regeneración es alrededor del 50%. Para determinar la durabilidad de regeneración se realizó más pruebas de emisiones con el catalizador original Mazda BT50, luego de un recorrido de 50 días y 2823 km, en el cual se obtuvo que la eficiencia en emisiones de hidrocarburos no quemados (HC) se redujo un 8,9% mientras que en emisiones de monóxido de carbono (CO) se mantuvo la eficiencia. Finalmente fue necesario un análisis de costos de este proceso, en el que resultó que el valor aproximado para regenerar un catalizador es de \$52, que quiere decir que es una excelente alternativa en comparación con el costo y calidad de un catalizador alternativo nuevo.

## ABSTRACT

This research project is aimed at the automotive area, specifically for gasoline vehicles, with the alternative of regeneration of automotive catalysts using polar substances, because these afterburners lose their effectiveness in catalyzing polluting gases due to incomplete combustion and poor gasoline quality. In addition, currently there is not such process in Ecuador, and it is decided to recycle or buy new alternative catalysts that have a useful life of just over a year, that is, they do not have the same durability as an original that has a useful life 5 to 8 years, considering that this depends on the quality of the metals that make up the ceramic monolith. This shows that environmental care is not given importance and that the economic factor is given priority, because in the country the Technical Vehicle Revision (RTV) with the NTE 2204 standard for emissions of gasoline engines is in force and alternating catalysts of poor quality are used only to pass the service. Therefore, this research is required to determine whether the method of regeneration by polar substances is feasible, also, saturated water vapor was chosen as the polar substance because it was more accessible and cheaper. A "pyro tubular" steam boiler was used for regeneration, while emissions and temperature tests were carried out to assess the efficiency and durability of catalysts, the same was done before and after the process, with these results it was obtained that the regeneration efficiency in alternate catalysts used is less than 30%, whereas in original catalysts used the regeneration efficiency is about 50%. To determine the regeneration durability, further emissions testing was performed with the original Mazda BT50 catalyst, after a route of 50 days and 2823 km, in which the efficiency in hydrocarbon (HC) emissions was reduced by 8.9% while in carbon monoxide (CO) emissions efficiency was maintained. Finally, a cost analysis of this process was necessary, in which it turned out that the approximate value for regenerating a catalyst is \$52, which means that it is an excellent alternative compared to the cost and quality of a new alternative catalyst.

## INTRODUCCIÓN

Los vehículos son considerados actualmente una de las fuentes principales de la contaminación atmosférica, por las características de los gases de escape que estos poseen. Debido al excesivo incremento del parque automotor, se ha elevado los niveles de emisiones contaminantes que provocan el calentamiento global, también es causante de enfermedades respiratorias debido a la contaminación del aire, por tal razón a escala mundial en los últimos años los gobiernos han instaurado regulaciones cada vez más estrictas para tratar de controlar los niveles máximos de emisiones vehiculares.

Para reducir estos contaminantes, los fabricantes de la industria automotriz han visto la necesidad de desarrollar sistemas post combustión, uno de los más importantes es el convertidor catalítico. Sin embargo, con las condiciones de trabajo tan severas y la calidad del combustible, los catalizadores tienden a desactivarse y son remplazados por alternativos o en peores casos desmontados por completo, llevando a la problemática de mayores niveles de contaminación, además de que estos vehículos no aprueben la revisión técnica vehicular.

Para reducir este tipo de inconvenientes existen varias soluciones técnicas, entre las que encuentra el reciclado de catalizadores. El presente proyecto de investigación formula una metodología para la regeneración de catalizadores automotrices de vehículos a gasolina utilizando vapor de agua saturada como sustancia polar, permitiendo dar una segunda vida a catalizadores originales, siendo una mejor opción que reemplazar por uno nuevo original o nuevos alternos, que en ocasiones es muy costoso y no cumplen con la vida útil esperada. Se analizará la eficiencia después de su regeneración como también la durabilidad comparando datos con las de un catalizador nuevo para determinar qué tan eficiente es este proceso.



# CAPÍTULO I

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. ANTECEDENTES

Desde hace décadas, la industria automotriz ha sido una de las fuentes de mayor contaminación para el medio ambiente, por esta razón, se busca disminuir las emisiones vehiculares que son producto de la combustión de gasolina y diésel, los contaminantes generados son los causantes del deterioro de la capa de ozono y los cambios climáticos del planeta, además afectan directamente a la salud de las personas. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la contaminación del aire es una de las prioridades más importantes en cuanto a la salud pública y según estudios realizados por este organismo, el aire contaminado es el responsable del 1,4% de todas las muertes a nivel mundial y que la mitad de este porcentaje es por causa de emisiones producto de la combustión de motores que usan combustibles fósiles (Linares, Montero, & Mancha, 2014, p. 2). Es por esto que, en el Ecuador está vigente la normativa técnica NTE INEN 2204, que permite regular los límites máximos permitidos para emisiones vehiculares específicamente de motores a gasolina (Normativa Técnica Ecuatoriana, 2017, p. 2).

Producto de combustiones incompletas en motores de combustión interna a gasolina, se generan agentes contaminantes como el monóxido de Carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), y los óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Por la existencia de estas emisiones, se han impuesto disposiciones o normativas cada vez más estrictas con el fin de reducir estos efectos negativos contra el medio ambiente, específicamente la calidad de aire (Querol, 2018, p. 18). Para reducir un porcentaje de esta contaminación del aire por emisiones vehiculares, se han desarrollado alternativas como el uso de biocombustibles e innovaciones en dispositivos postcombustión. Por ello, se han implementado tecnologías como catalizadores para disminuir o controlar los niveles de emisiones, tomando en cuenta que estos contaminantes dependen también de la calidad del combustible. En motores a gasolina se utilizan catalizadores de tres vías cuyo funcionamiento es realizar la catálisis de los tres principales contaminantes (CO, HC y NO<sub>x</sub>) simultáneamente. Sin embargo, debido a varios factores como condiciones severas de funcionamiento, calidad del recurso fósil, fallas químicas y mecánicas, la vida útil de los convertidores catalíticos se ve afectada hasta llegar al punto de desactivarse (Rincón, Asencio, Camarillo, & Martín, 2008).

## **1.2. SITUACIÓN ACTUAL**

La industria automotriz viene siendo hasta la actualidad una de las fuentes de mayor contaminación para el medio ambiente debido a las emisiones vehiculares, por tal razón existen los organismos encargados de regular que se cumpla con los niveles máximos de emisiones, en el Ecuador la revisión técnica vehicular (RTV) cumple con la normativa vigente que es la INEN NTE 2204 específica para vehículos con motores a gasolina.

Actualmente, en el Ecuador no se realizan técnicas para la regeneración de catalizadores automotrices que han perdido su eficiencia por causa de saturación y que ha cumplido con su vida útil, por lo que las alternativas son comprar catalizadores alternos nuevos y el reciclaje de metales como platino, paladio y rodio. Por lo que se requiere la investigación sobre regeneración de catalizadores mediante sustancias polares como una alternativa viable para ser aplicada, además, a nivel industrial se sabe que con un proceso de regeneración se puede recuperar un gran porcentaje de eficiencia de los catalizadores para reducir los gases contaminantes, sin embargo, se aplican métodos muy costosos con el uso de diferentes sustancias polares para la limpieza de los monolitos, por lo tanto, la aplicación de vapor de agua saturado para la regeneración de convertidores catalíticos de motores a gasolina es una alternativa amigable con el medio ambiente y muy accesible en cuanto a costos.

## **1.3. PROSPECTIVA**

Con el presente trabajo de investigación se busca contribuir al cuidado del medio ambiente con el control de emisiones contaminantes para el medio ambiente y nocivos para la salud humana, mediante la regeneración de catalizadores de vehículos con motores a gasolina. Tomando en cuenta que no todos los catalizadores que cumplieron con su vida útil pueden ser regenerados, debido a las condiciones de funcionamiento severas en las que se encuentran sometidos hacen que solo los convertidores catalíticos que se hayan desactivado químicamente (saturados) puedan recuperar su eficiencia de catálisis de gases contaminantes, luego de un proceso de regeneración. Con la aplicación de esta alternativa se quiere lograr un ahorro económico en comparación a comprar un catalizador alternativo nuevo, que además no son de la misma calidad que uno original, logrando una eficiencia con relación al costo y beneficio.

## **1.4. OBJETIVOS**

Para el desarrollo de este proyecto se planteó el objetivo general y objetivos específicos, necesarios para llevar a cabo de manera ordenada la investigación.

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

- Regeneración y evaluación de catalizadores automotrices de motores a gasolina que se hayan desactivado químicamente empleando vapor de agua saturado como sustancia polar, para determinar su grado de eficiencia.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudio del estado del arte referente a dispositivos postcombustión utilizados en vehículos con motores MEP.
- Establecer los parámetros para la regeneración de catalizadores en función de un protocolo de pruebas.
- Evaluar las emisiones generadas de un catalizador regenerado comparadas con las de uno nuevo, mediante pruebas estáticas.
- Determinar el grado de eficiencia de regeneración y durabilidad esperada del catalizador regenerado.

## **1.5. ALCANCE**

En el presente proyecto se realiza una investigación sobre la regeneración de catalizadores automotrices de motores a gasolina mediante sustancias polares, principalmente con el uso de vapor de agua saturado para la limpieza de las superficies de estos convertidores catalíticos, además se hace un estudio de otras alternativas similares a estas sustancias, las cuales puedan emplearse en este proceso de recuperación. Para efectuar esta investigación se tiene como mínimo tres catalizadores en diferentes estados de uso (nuevo, medio uso y desactivado químicamente) que puedan ser sometidos a una regeneración y posterior a ello realizar un análisis y comparación de emisiones y eficiencia de estos convertidores catalíticos. Las pruebas de emisiones se las realizó con los equipos correspondientes con los que cuentan los talleres de la Universidad Técnica del Norte.

## 1.6. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto de investigación está enfocado en plantear una alternativa viable ante una de las mayores fuentes de contaminación del medio ambiente como son las emisiones vehiculares, mediante el estudio del uso de sustancias polares, principalmente y el más común que es el agua de vapor saturado para la regeneración de catalizadores automotrices.

Según datos de la RTV (Revisión Técnica Vehicular) en Ecuador, a partir del año 1996 se empezó a generalizar todo lo referente a sistemas de control de emisiones con el plan de eliminación del plomo de los combustibles y el objeto de mejorar la calidad de este recurso, posteriormente de acuerdo con la normativa NTE INEN 2204 Y 2207 creadas para regular las emisiones se establecieron los límites permisibles para motores a gasolina y diésel. Como consecuencia a estas normativas, luego del año 2000, en el país se comercializan automotores equipados con sistemas post combustión que controlan o reducen las emisiones de gases contaminantes, estos son los convertidores catalíticos, que son de varios tipos t según su funcionamiento hay convertidores catalíticos de oxidación para eliminar emisiones de hidrocarburos (HC), Monóxidos de carbono (CO) y los de reducción que eliminan dichos gases y a la vez desoxidan los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). También con fundamentación en el reglamento de procesos de revisión vehicular se menciona en el Art. 2 de la Ley Orgánica de Transporte terrestre, tránsito y seguridad Vial, los principios del derecho a la vida, al libre tránsito y movilidad, mejorar la calidad de vida del ciudadano y preservación del medio ambiente (ANT, 2017, p. 3).

Al considerar que el convertidor catalítico se encuentra operando de manera simultánea con el funcionamiento del motor, es inevitable que su estado y estructura se va deteriorando, debido a combustiones incompletas y mala calidad del combustible, por esta razón, el catalizador pierde su eficiencia en la capacidad de eliminar los gases contaminantes. Al conocer todos estos factores existe la necesidad de investigar si es mejor reemplazar o regenerar estos dispositivos, tomando en cuenta que, para realizar este proceso. Con esta investigación se hace un aporte al Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021 “Toda una vida” al poner en práctica la política 5.3 cuyo argumento es promover la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, la innovación y el emprendimiento, en articulación con las necesidades sociales, para impulsar el cambio de la matriz productiva (SENPLADES, 2017, p. 74).

## 1.7. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA MEP

Los motores de encendido provocado o conocidos como motores de ciclo Otto, se caracterizan por su proceso de combustión que se lleva a cabo después del salto de chispa generado por un agente externo que enciende la mezcla estequiométrica de aire-combustible (14,7 kg de aire a 1 kg de combustible) al final de la etapa de compresión. Sin embargo, durante el proceso de combustión queda mezcla sin quemar y es así como se producen las emisiones de gases contaminantes, por lo cual se implementan los dispositivos post combustión (Munoz & de Antonio, 2016, p. 25).

Todo el ciclo se lleva a cabo en cuatro carreras del pistón y cada dos revoluciones del cigüeñal, por lo tanto, las fases de un motor otto el ciclo de cuatro tiempos, son:

- La etapa de trabajo, en donde las válvulas se encuentran cerradas y luego del chispazo el pistón desciende desde el PMS al PMI.
- La segunda imagen muestra cómo se realiza el escape o vaciado de gases, mediante el movimiento del pistón desde el PMI al PMS, mientras la válvula de escape está abierta y la de admisión se encuentra cerrada.
- Luego está la etapa de compresión que se da con el ascenso del pistón desde el PMI al PMS, mientras las dos válvulas están cerradas.
- Y la etapa de admisión que se da con el llenado del cilindro, cuando el pistón desciende desde el PMS al PMI, mientras la válvula de admisión está abierta y la de escape se encuentra cerrada (Secundino, 2011, pp. 16-20).

En los motores de encendido provocado se utiliza principalmente la gasolina como combustible, que en teoría en el proceso se realiza una combustión completa, que quiere decir que, el carbono se oxida y genera bióxido de carbono, el hidrógeno se transforma en moléculas de agua y el nitrógeno es inerte (Barbosa & Gutierrez, 2016, p. 383). En un proceso de combustión real, por lo general se encuentra que la oxidación de la gasolina no es completa y como resultado se obtiene las emisiones de componentes sin oxidar, químicamente se la representa de la siguiente forma:

- Ecuación química de la combustión de la gasolina

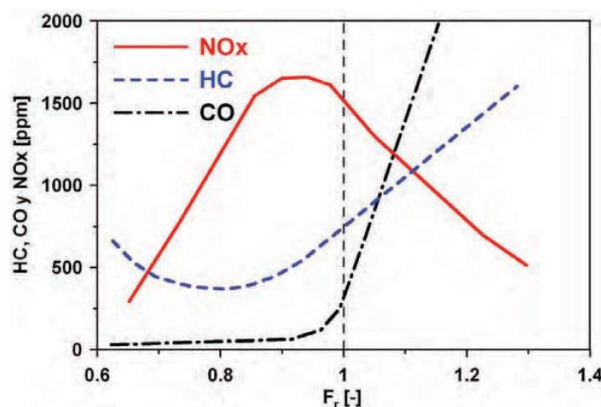


### 1.7.1. EMISIONES CONTAMINANTES EN MOTORES MEP

Las emisiones típicas de los motores de encendido provocado son los hidrocarburos no quemados (HC), monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), la causa principal de la formación de estos gases es la elevada temperatura producto de la combustión. Estos contaminantes se generan también por la dispersión del dosado relativo, que es la relación entre el dosado real y el dosado estequiométrico (Sanchez, 2011, p. 71).

De acuerdo con el dosado relativo, se generan las siguientes condiciones:

- Cuando igual a 1, la mezcla aire/combustible y la reacción son estequiométricas.
- Cuando es menor a 1, se denomina mezcla aire/combustible pobre.
- Cuando es mayor a 1, la mezcla se denomina rica.



**Figura 1.1** Comportamiento de las emisiones en un MEP en función del dosado relativo.

(Lopez, Salvador, & Novella, 2020, p. 138)

En la Figura 1.1, se presenta un diagrama comparativo del comportamiento de las emisiones de CO, HC y  $\text{NO}_x$  como se detallan a continuación:

- CO

Se forma cuando la combustión no se efectúa completamente por presencia excesiva de combustible y en regiones de la mezcla en donde el dosado relativo supera la unidad. El incremento de estas emisiones se da desde poco antes de que  $F_r$  global sea igual a 1.

- HC

Conocidos como hidrocarburos sin combustionar, son de igual manera producto de una mala combustión, esto se produce porque la llama se apaga antes de llegar a ciertas regiones,

dejando porciones de masa sin quemar. Mientras mayor sea el dosado, mayor va ser la cantidad de combustible en la mezcla, por lo tanto existirá más cantidad de HC. Con esta explicación se logra entender por qué cuando se reduce el dosado se logra bajar los niveles de emisiones de estos contaminantes, pero existe cierto límite para realizar esta práctica ya que si se disminuye exageradamente también incrementarán las emisiones de HC debido al exceso de aire y por tanto dificultad de propagación de la llama. Mientras que también pueden producirse emisiones de hidrocarburos en forma directa al evaporarse del tanque de combustible.

- $\text{NO}_x$

Los causantes de estas emisiones son principalmente elevadas temperaturas productos de la combustión y la presencia de residuos de oxígeno. En la figura 1.4, se muestra como disminuyen los niveles de  $\text{NO}_x$  en cuanto mayor sea el dosado (Munoz & de Antonio, 2016, pp. 115-120).

## **1.8. ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES**

Las emisiones producidas por los motores de encendido provocado se generan principalmente por combustiones incompletas y por la mala calidad del combustible, por lo tanto, las estrategias de funcionamiento y de diseño son necesarias para reducir los niveles de contaminación, estas pueden ser de dos tipos:

- Estrategias activas (Previo a la combustión)

Son aquellas que involucran el diseño y el funcionamiento del motor, es decir con estas se logra regular la formación de los diferentes gases contaminantes.

- Estrategias pasivas (Posterior a la combustión)

Estas actúan sobre los gases ya generados antes de ser expulsados al medio ambiente, es decir, ayudan a reducir los niveles de emisiones, este trabajo lo realizan los dispositivos post combustión en los motores a gasolina (Lopez et al., 2020, pp. 135-139).

A continuación en la Tabla 1.1, se muestra varios ejemplos de las estrategias activas y pasivas que se realizan para reducir las emisiones de los gases contaminantes en motores de encendido provocado:

**Tabla 1.1** Estrategias activas y pasivas para reducir emisiones

<b>Estrategias activas (Previo a la combustión)</b>	<b>Estrategias pasivas (Posterior a la combustión)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementación de Cánister (filtro de carbón activo)</li> <li>• Control de dosado</li> <li>• Diseño de la cámara de combustión</li> <li>• Implementación de válvula EGR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Catalizadores de oxidación y desoxidación.</li> <li>• Implementación de sensor de oxígeno (sonda lambda).</li> </ul>

Fuente: (Lopez et al., 2020, p. 130)

## 1.9. CONVERTIDOR CATALÍTICO

El convertidor catalítico es un dispositivo ubicado en el tubo de escape cerca del colector de escape, con el objetivo de disminuir los contaminantes formados por la combustión del Motor; generalmente se utiliza platino (Pt), paladio (Pd), de iridio (Ir) y de rodio (Rh) para los catalizadores de automóviles. El tratamiento de gases de escape se da desde a nivel mundial desde 1989 de forma obligatoria en motores a Gasolina, pero en el Ecuador se implementó hace no más de siete años atrás, para mantener los parámetros normales anuales de circulación obligatorios para cada vehículo (Robalino & Flores, 2018, p. 9).

### 1.9.1. TIPOS DE CATALIZADORES

Los tipos de convertidores catalíticos utilizados en vehículos con motores MEP se diferencian por la oxidación y desoxidación de los gases, como se menciona a continuación:

- Catalizador de oxidación

Oxida los Hidrocarburos (HC) o Monóxido de Carbono (CO) y genera vapor de agua (H<sub>2</sub>O) o dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) no contaminantes.

- Catalizador de desoxidación (Reducción)

Este catalizador extrae el oxígeno del monóxido de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y genera di nitrógeno (N<sub>2</sub>) que no es contaminante.

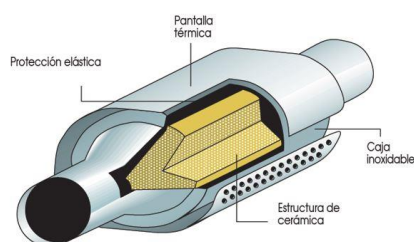
- Catalizador de oxidación / desoxidación (Reducción)



Realizan las dos funciones mencionadas anteriormente. Los catalizadores de oxidación / desoxidación para automóviles se denominan catalizadores de triple acción o tres vías porque transforman tres gases contaminantes ( $\text{CO}/\text{HC}/\text{NO}_x$ ), en gases no contaminantes ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) (Valencia, 2015, p. 20).

### 1.9.2. COMPONENTES DEL CATALIZADOR

El catalizador en la parte exterior es una caja de acero inoxidable, que es provista con una pantalla metálica antitérmica, para protegerlo de las altas temperaturas alcanzadas. En el interior se tiene una estructura cerámica o monolito, con forma cilíndrica, en el que contiene múltiples celdas en forma de panal, aproximadamente posee 70 celdas por centímetro cuadrado. Existen dos tipos de catalizadores monolitos, de cerámica y de metal (aleaciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Cuanto más pequeños sean los agujeros, mejor resultará el proceso de purificación.



**Figura 1.2** Componentes del catalizador

(Pérez, 2001, p. 4)

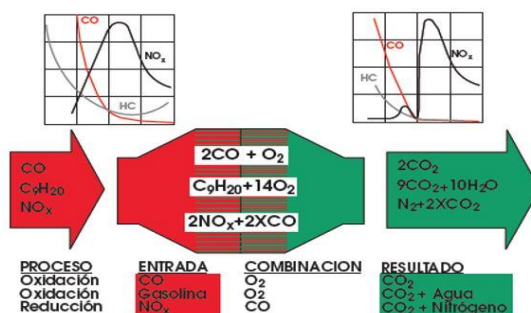
En la Figura 1.2, se señalan los componentes del catalizador, en la superficie de las celdas se encuentran impregnando con una resina elementos, tales como Platino (Pt) y Paladio (Pd), que permiten la oxidación, y Rodio (Rh), que actúa en la reducción. Estos son metales nobles que ejercen como elementos activos y son los que inician y aceleran las reacciones químicas con otras sustancias. Los gases de escape, al entrar en contacto con la superficie activa del catalizador reaccionan transformándose en gases inocuos (Pérez, 2001, p. 2).

### 1.9.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL CATALIZADOR

Los gases de escape pasan por el catalizador en menos de una décima de segundo transformándose en sustancias inocuas como vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), como se mencionó el convertidor tiene múltiples agujeros en forma de panal

impregnado con metales preciosos, al pasar a través del monolito, los gases reaccionan de manera que se separan y se combinan nuevamente sin alterar ni oxidar a los metales. Este proceso es más eficaz mientras mayor sea el contacto de los gases con los metales.

Dependiendo de los modelos de catalizadores, estos poseen dos filtros, el primero con platino (Pt) y rodio (Rh) y el segundo con platino (Pt) y paladio (Pd). Estos metales, reaccionan para producir la oxidación y reducción de los gases, producto de la combustión (García, 2015, p. 29).



**Figura 1.3** Proceso químico interno del catalizador

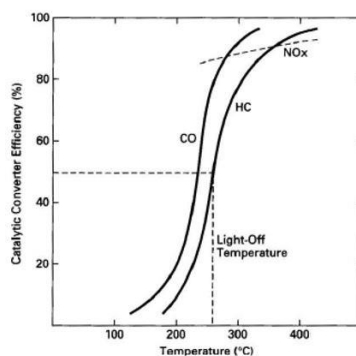
(Toyota Motor Corporation, 2003, p. 7)

En la Figura 1.3, se muestra los procesos químicos dentro del catalizador, en el primer filtro se separa las moléculas de NO<sub>x</sub> dando como resultados el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el Nitrógeno (N<sub>2</sub>), al pasar al segundo filtro y por efecto de la temperatura se separa el oxígeno uniéndose con el monóxido de carbono para formar el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Los hidrocarburos también se mezclan con el oxígeno para formar vapor de agua (H<sub>2</sub>O) (Guevara, 2010, p. 92; Pérez, 2001, p. 7).

#### 1.9.4. RENDIMIENTO DEL CONVERTIDOR CATALÍTICO

La tasa de purificación varía en función de la temperatura y la relación de aire/combustible o factor lambda ( $\lambda$ ) a la que el motor esté trabajando; por esta razón el catalizador está diseñado para mantener la temperatura; como se indica en la figura 0.4, la tasa de purificación se aproxima al 100% cuando la temperatura supera los 400 °C, el catalizador es capaz de remover 98-99% de monóxido de Carbono (CO), el 95% de monóxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), y aproximadamente el 95% de hidrocarburos no quemados (HC) (Solórzano & Vásquez, 2011, p. 15).

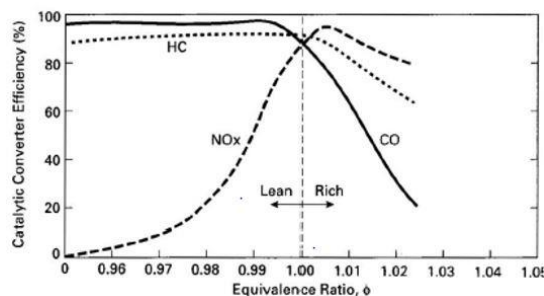
Al momento de arrancar el motor en frío, el catalizador al no tener su temperatura óptima de funcionamiento su eficiencia de catálisis es bastante baja, por tal razón el catalizador está diseñado para trabajar con la temperatura “light-off” en la que se obtiene el 50% de conversión con una temperatura aproximadamente entre 250 y 270 °C.



**Figura 1.4** Eficiencia conversión-temperatura

(Solórzano & Vásquez, 2011, p. 16)

En la Figura 1.4, se muestra el comportamiento de los gases, en función de la temperatura, en donde se indica que el catalizador empieza a trabajar a temperaturas light-off que están entre 250 y 270 °C. Para alcanzar la temperatura light-off se ha desarrollado varios sistemas como el calentamiento eléctrico, calentamiento por medio de llama y precalentamiento por reacciones químicas.



**Figura 1.5** Eficiencia de conversión - Factor lambda

(Solórzano & Vásquez, 2011, p. 39)

En la Figura 1.5, se muestra el comportamiento de los gases de escape, en función de la eficiencia de conversión y el factor lambda, que indica que cuando el motor está trabajando con mezclas pobres, se tiene una conversión efectiva de HC y CO, por el contrario, ocurre con los  $\text{NO}_x$  la conversión es muy baja, por tal razón se requiere que el motor trabaje con relaciones cercanas a la estequiométrica para que la conversión sea eficiente (Rojas, Romero, & Pancha, 2019, p. 28).

### 1.10. TECNOLOGÍA PARA REGENERACIÓN DE CATALIZADORES

La empresa IBERISA junto con la marca “DPF REVIVAL” es en España el principal fabricante de lo último en tecnología de máquinas para limpieza de filtros de partículas y catalizadores automotrices (Iberisa, 2018, p. 1).



**Figura 1.6** Máquina para limpieza de catalizadores Modelo CTW 2000 (Iberisa, 2018, p. 2)

En la Figura 1.6, se muestra la máquina más completa con tecnología para limpieza de todo tipo de catalizadores automotrices. Su funcionamiento se basa en el uso de agua caliente y solventes que se inyectan al catalizador mediante un compresor por medio de mangueras que se conectan a la entrada y salida del dispositivo, el control de presión y temperatura es digital, lo que permite controlar los parámetros de limpieza, además cuenta con un sistema de secado y un registro de condiciones iniciales y finales necesarios para garantizar una regeneración casi total de los catalizadores. El tiempo de regeneración que emplean estas máquinas está entre 45 y 90 minutos, mientras que la temperatura de secado es de 100-150 °C, es decir que estas máquinas garantizan un proceso controlado de hasta un 99% de eficiencia dependiendo del estado que se encuentre el convertidor catalítico. Existen también otros modelos más básicos pero el CTW 2000 es el más completo en cuanto a funcionamiento y resultados de limpieza de filtros de partículas y catalizadores de todo tipo de vehículo.

### 1.11. SUSTANCIAS POLARES

Son aquellas sustancias en las moléculas la distribución de los electrones es asimétrica; de modo que, la molécula tendrá un polo positivo y otro negativo separados por una determinada distancia, siendo generalmente solubles y menos volátiles. El ejemplo común de solvente polar es el agua, como también algunos alcoholes de baja masa molecular (Guardado & Sánchez, 2009, p. 48). Otros ejemplos de sustancias polares son el Ácido clorhídrico (HCl), el Amoníaco (NH<sub>3</sub>) y el dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>).

En la solubilidad, el carácter polar o apolar de la sustancia influye, debido a que, debido a estos la sustancia será más o menos soluble. No todas las sustancias pueden disolverse en un mismo solvente, un ejemplo es el agua, se disuelve el alcohol y la sal, por el contrario, el aceite y la gasolina no se disuelven. La solubilidad del agua al ser molécula bipolar, con dos polos (positivo y negativo), haciendo que se comporte como un imán atrayendo y repeliendo los distintos átomos de otras sustancias (Peón, 2007, p. 4).

### 1.12. FLUÍDOS SUPERCRÍTICOS

Los fluidos supercríticos son toda sustancia que se encuentra a presión y temperatura superiores al punto crítico termodinámico. Las propiedades principales de estos fluidos es su capacidad de difundirse a través de los sólidos en forma de gas y a la vez disolver materiales actuando como líquido. Debido a cambios de temperatura y presión de estos fluidos su densidad varia y esto lo convierte en solventes orgánicos conveniente para procesos de extracción de materiales y limpieza de catalizadores (Velasco, Villada, & Carrera, 2017, p. 55). A continuación, en la Tabla 1.2, se muestran las propiedades de algunos fluidos supercríticos:

**Tabla 1.2** Propiedades de los Fluidos Supercríticos

Fluido	T <sub>c</sub> (°C)	P <sub>c</sub> (bar)	ρ (Kg/m <sup>3</sup> )
Acetileno	36	62.47	232.14
Acetona	235	47.00	278.00
Agua	374	220.90	322.60
Dióxido de Carbón	31	73.86	467.60
Etano	32	48.71	135.75
Etanol	240.4	61.40	276.00
Etileno	9	50.40	195.80
Metano	-83	45.95	161.43
Metanol	239.4	80.90	272.00
Propano	97	42.47	225.64
Propileno	91.8	46.00	232.00

Fuente: (Velasco et al., 2017, p. 56)

## **CAPÍTULO II**

### **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **2.1.METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo se presentan todos los procesos realizados para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación. Se empieza por determinar el estado de los catalizadores antes de ser regenerados y el estado del vehículo mediante un protocolo de pruebas, para ello se detallan cada uno de los equipos y dispositivos utilizados. Además, se presenta el procedimiento y método de regeneración que se escogió para estos dispositivos, y así poder realizar las pruebas de funcionamiento y emisiones, necesarias para determinar la eficiencia y la durabilidad esperada de los catalizadores regenerados luego de un análisis y comparación de los datos obtenidos.

##### **2.1.1. PROPÓSITO INVESTIGATIVO**

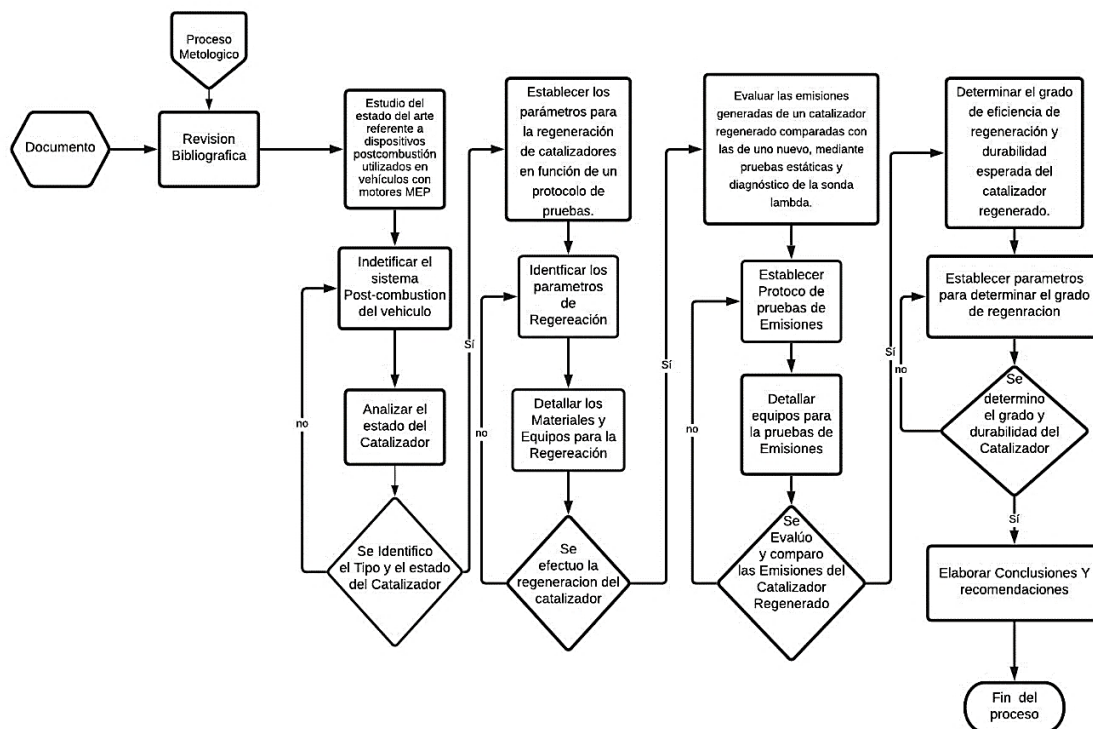
El fin de la regeneración de los catalizadores de motores a gasolina en esta investigación es determinar su grado de eficiencia y durabilidad luego de las pruebas y el método empleado para regenerar los mismos. Esto después de haber realizado un análisis y comparación de datos obtenidos en las pruebas estáticas de emisiones y pruebas de temperatura. Con ello se establecerá el grado de confiabilidad para la utilización de vapor de agua saturado como sustancia polar para la limpieza de convertidores catalíticos.

##### **2.1.2. DETERMINACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

El tipo de investigación utilizada en el presente trabajo es la experimental, debido a que se tienen varios parámetros de medidas para la regeneración y las pruebas de emisiones. Con los datos obtenidos se determina el grado de regeneración y la durabilidad esperada que tendrá el catalizador, mediante una comparación con los resultados de cada uno de los convertidores catalíticos, un catalizador nuevo y la prueba de emisiones sin este dispositivo.

### 2.1.3. PROCESOS METODOLÓGICOS

Para que el todo el proceso de la investigación se lleve a cabo de forma ordenada y eficaz, se debe desarrollar flujogramas de actividades que darán como resultado el cumplimiento de los objetivos planteados.



**Figura 2.1** Flujograma del desarrollo de Objetivos

En la Figura 2.1 se detalla cada una de las actividades para cumplimiento de los objetivos, de inicio a fin del proceso de investigación del presente trabajo de grado.

### 2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Para las diferentes pruebas en esta investigación se hizo el uso de un vehículo a gasolina que cumpla con las especificaciones necesarias para realizar las pruebas de funcionamiento y regeneración de los convertidores catalíticos. Para ello se utilizó un vehículo MAZDA BT-50 CD 4x2 año 2011, en la cual se efectuó las pruebas estáticas de emisiones antes y después de la regeneración de los catalizadores. Para lo cual se utilizaron los diferentes equipos como el analizador de gases Brain Bee AGS 688, scanner Bosch VCM II Mazda y G-SCAN 2, pistola térmica de infrarrojo y la caldera de vapor tipo piro tubular.

### 2.2.1. SUSTANCIA POLAR

El Agua ( $H_2O$ ) es el disolvente más importante en la naturaleza; por ser económico e inocuo y pesar de la elevada temperatura y presión crítica de trabajo da lugar a numerosas aplicaciones. Es ampliamente utilizada en las inmediaciones de su punto crítico tanto como disolvente como medio de reacción debido a que en estas condiciones puede disolver sustancias orgánicas. Las sustancias supercríticas tienen propiedades intermedias entre los líquidos y los gases, su capacidad de transporte es casi igual a las de un gas, baja viscosidad, elevada difusividad y muy baja tensión superficial, y su poder de solubilidad es similar al de los líquidos (Tenorio, 2013, p. 118).

Como sustancia polar se determinó que el vapor de agua saturado es el más conveniente para utilizar en la regeneración porque cumple con las características necesarias como presión y temperatura, lo cual se obtuvo de un caldero de tipo piro tubular, y, además, es más fácil de conseguir y sobre todo fue el método más económico para realizar esta investigación.

En la Tabla 2.1, se muestra las propiedades del vapor de agua saturado, en donde se muestra la relación entre la presión de trabajo de un caldero y la temperatura, que son los factores que se tomó en cuenta para la regeneración de los catalizadores.

**Tabla 2.1** Propiedades del vapor de agua saturado

Temp. °C	Presión absoluta bar	Entalpia específica kWh/kg	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg	Viscosidad dinámica cP	Viscosidad cinemática cSt	Calor específico kWh/kg-K
137	3,32	0,758202	1,814673	0,551084	0,013543	7,463072	0,0006354
138	3,42	0,758567	1,864195	0,536425	0,013578	7,283346	0,0006378
139	3,51	0,758930	1,914796	0,522249	0,013612	7,108911	0,0006397
140	3,62	0,759290	1,966494	0,508519	0,013647	6,939586	0,0006419
141	3,72	0,759648	2,019307	0,495220	0,013681	6,775194	0,0006441
142	3,82	0,760003	2,073251	0,482334	0,013716	6,615567	0,0006464
143	3,93	0,760356	2,128345	0,469849	0,013750	6,460542	0,0006487
144	4,04	0,760707	2,184608	0,457748	0,013785	6,309964	0,0006510
145	4,16	0,761055	2,242057	0,446019	0,013819	6,163682	0,0006533
146	4,27	0,761400	2,300711	0,434648	0,013854	6,021553	0,0006557
147	4,39	0,761743	2,360589	0,423623	0,013888	5,883438	0,0006581
148	4,51	0,762083	2,421709	0,412931	0,013923	5,749203	0,0006606
149	4,63	0,762420	2,484092	0,402562	0,013957	5,618720	0,0006630
150	4,76	0,762755	2,547755	0,392502	0,013992	5,491865	0,0006655

Fuente: (Suarez, 2015, p. 28)



### 2.2.2. CALDERA PIROTUBULAR

Para realizar la regeneración fue necesario determinar el tipo de caldera que cumpla con las especificaciones de presión y temperatura para obtener vapor de agua saturado. Para ello se escogió una caldera de tipo piro tubular.

Las características de una caldera de tipo piro tubular son:

- Presión de trabajo: entre 60 y 80 Psi (5bar)
- Quemador diésel marca BALTUR
- Caudal de vapor 21,1 a 50,6 kg/h
- Temperatura de agua de alimentación: 80°C
- Tipo de vapor: Saturado
- Combustible: diésel



**Figura 2.2** Caldera de vapor de tipo piro tubular

En la Figura 2.2, se muestra la imagen del caldero con que se dispuso para realizar la regeneración de los catalizadores mediante vapor saturado, este caldero tiene una presión de trabajo entre 60 y 80 psi, presión suficiente para realizar este proceso.

### 2.2.3. ANALIZADOR DE GASES BRAIN BEE AGS-688

Es un equipo diseñado para medir las emisiones contaminantes emitidos por el motor de combustión interna y verificar si tiene los valores correspondientes a los de la normativa correspondiente o vigente de los gases de escape y evitar el rechazo por parte de la revisión técnica Vehicular (RTV) con la ventaja que puede trabajar en modo estático y dinámico. A continuación, en la Tabla 2.2, se muestra los campos de medición del analizador de gases.

**Tabla 2.2** Campos de medición del analizador de gases

CAMPOS DE MEDICIÓN					
CO	0	+	9,99	% vol	Res. 0,01
CO <sub>2</sub>	0	+	19,9	% vol	Res. 0,1
HC hexano	0	+	9 999	ppm vol	Res. 1
O <sub>2</sub>	0	+	25	% vol	Res. 0,01
NO <sub>x</sub>	0	+	5 000	ppm vol	Res. 1
Lambda	0.5	+	5		Res. 0,001
Revoluciones Inductancia/ capacitancia	300	+	9 990	rpm	Res. 10
Temperatura del aceite	20	+	150	°C	Res. 1

Fuente: (Brain Bee, pág. 1)

#### 2.2.4. SCANNER BOSCH VCM II MAZDA (VEHICLE COMMUNICATION MODULE)

Este equipo es utilizado para el diagnóstico de vehículos Mazda, que se conecta a puertos OBDII con la función de detectar todas las unidades de control electrónico instaladas en el vehículo, para detectar las posibles fallas de un mal funcionamiento o verificar el rendimiento de los componentes. El equipo se utilizó para el diagnóstico de vehículo y el ABC correspondiente, las características son las siguientes:

- Diagnóstico de sensores y actuadores en tiempo real
- Prueba de actuadores
- Verificación de datos congelados
- Inmovilizador
- Funciones de programación de la ECU (Tecnomax, 2016).



**Figura 2.3** Scanner Bosch VCM II Mazda

En la Figura 2.3, se muestra el scanner utilizado para realizar el ABC al vehículo y que esté en condiciones óptimas para realizar las pruebas de emisiones.

También se empleó el Scanner G-SCAN 2 que es un equipo multimarca, el cual fue utilizado durante las pruebas de emisiones y determinar la eficiencia de los catalizadores, con características similares a las mencionadas anteriormente, incluyendo otras funciones como:

- Software para operar en vehículos de 12 a 24 voltios
- Cable de comunicación de 16 pines OBDII
- Lápiz óptico
- Tarjeta de memoria de 16GB
- Pantalla de 7 pulgadas
- Además, es adecuado para trabajar con vehículos, gasolina, diésel y híbridos (ISK, 2017).

#### **2.2.5. PISTOLA TÉRMICA DE INFRARROJO “Dr. Meter Ir-20”**

Este equipo puede medir las temperaturas de diferentes superficies, que fue empleado para realizar un diagnóstico de la eficiencia de cada uno de los catalizadores antes y después de su regeneración. Este medidor de temperatura cuenta con las siguientes características:

- Precisión de 98% y en superficies emisivas del 95%
- Rango de medición: desde -50 hasta 650°C
- Las temperaturas se muestran en °C y en °F
- Tiempo de respuesta de 500ms (Forest, 2020).



**Figura 2.4** Pistola térmica Dr. Meter Ir-20

En la Figura 2.4, se muestra la pistola térmica de infrarrojo necesaria para realizar las pruebas de temperatura de cada uno de los catalizadores y evaluar su estado de funcionamiento.

### 2.2.6. CATALIZADORES UTILIZADOS PARA LA REGENERACIÓN

Para seleccionar los catalizadores utilizados en esta investigación, se consideró el cilindraje de la camioneta BT50 que es de 2,2 L por lo cual lo más recomendable fue realizar las pruebas con convertidores catalíticos con estas especificaciones para llevar a cabo una comparación de datos, antes, y después de la regeneración.

En la Tabla 2.3, se muestran los catalizadores utilizados para las pruebas de emisiones y regeneración:

**Tabla 2.3** Lista de catalizadores utilizados

#	Catalizador	Cilindraje (L)
1	SERVINTEC Universal	1.8 a 2.2
2	Mazda 3 Original	1,8 a 2,2
3	INDIMA Universal	3.5
4	BT50 Original	2.2
5	SERVINTEC BT50 (Alternativo)	2,2

### 2.3. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL CATALIZADOR

Para evaluar el estado de los catalizadores se empezó con una inspección visual de la estructura externa e interna para verificar que no existan daños físicos como roturas, golpes o deformaciones causadas por altas temperaturas, como también, la presencia saturación de material particulado en el monolito del catalizador. Una vez realizado este análisis se determinó si el convertidor catalítico es óptimo para ser regenerado.

Para realizar la inspección visual del estado de los catalizadores se toman en cuenta los criterios mostrados en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Inspección visual del estado del catalizador y sistema de escape

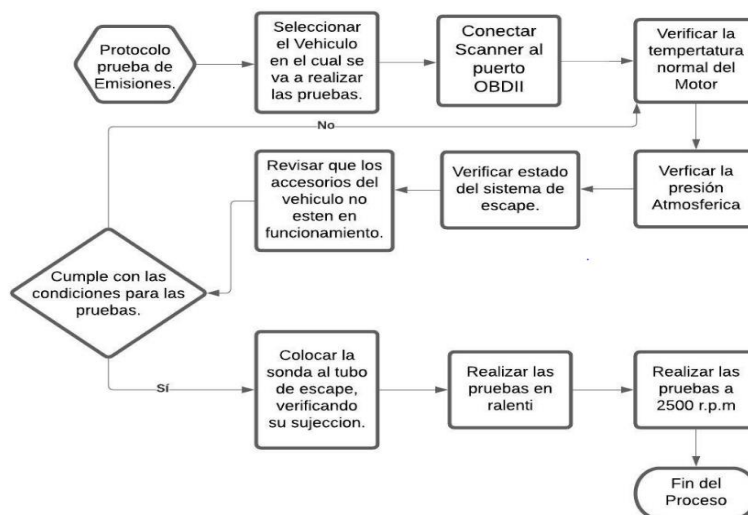
Inspección visual del estado del catalizador y sistema de escape	
Puntos de inspección	Tubos de escape, empaques, catalizador.
Verificaciones	Estado e integridad de tubo de escape
Interpretación de defectos	Corrosión excesiva, rupturas en cualquier parte del dispositivo, falla de empaques que garanticen estanqueidad.

Criterio de aplicación de fallas	- Fallas leves: golpes, abolladuras, saturación, emisiones, ruidos. - Fallas graves: Rupturas del catalizador, falta de estanqueidad por rupturas en el tubo de escape o ausencia de empaques.
Decisión	Asegurar el funcionamiento del catalizador y determinar si es apto para ser regenerado.

Fuente: (Marza, 2015, p. 8)

## 2.4. PROTOCOLO DE PRUEBAS DE EMISIONES

El protocolo de prueba de emisiones sirve de guía para que el proceso de pruebas se lo realice de manera ordenada, eficaz y controlada, para que los datos obtenidos sean precisos y no varíen con respecto a los parámetros como: presión atmosférica y temperatura del aire, además, tomando en cuenta las medidas de seguridad, como el uso del equipo de protección personal y el manejo adecuado de los equipos. Los datos obtenidos en estas pruebas que se realizó antes y después de la regeneración, sirvieron para hacer un análisis de eficiencia y durabilidad de cada uno de los catalizadores.



**Figura 2.5** Flujograma del Protocolo de Pruebas de Emisiones

En la Figura 2.5, se muestra el diagrama de flujo del proceso realizado para prueba de emisiones, necesario para obtener los datos de estado inicial de los catalizadores proceder a la regeneración.

Para llevar a cabo las pruebas de emisiones, inicialmente se preparan los equipos necesarios, determinar los siguientes parámetros:

- Parámetros del lugar donde se realizaron las pruebas

Presión atmosférica, temperatura del ambiente y altura del lugar.

- Parámetros de condiciones del vehículo

Temperatura del motor, temperatura del aire de admisión, relación aire/combustible, kilometraje y tipo de combustible

Para realizar las pruebas de emisiones se debe encender el analizador de gases, esperando que se calibre automáticamente y luego proceder a colocar la sonda a la salida del tubo de escape, para realizar la medición de gases en ralentí y a 2500 rpm con cada uno de los catalizadores.

Al mismo tiempo que se realiza las pruebas de emisiones, se procede a medir la temperatura de entrada y salida del catalizador, necesario para poder determinar la eficiencia general de cada uno de los catalizadores para comparar con los datos de emisiones.



**Figura 2.6** Medición de temperatura con termómetro infrarrojo

Como se indica en la Figura 2.6, mediante el termómetro de infrarrojo se mide la temperatura de entrada y salida de cada uno de los catalizadores, este proceso es necesario para determinar el funcionamiento del catalizador y saber que tan saturado se encuentra.

En el Ecuador está vigente la normativa técnica NTE INEN 2204, mediante la cual se regula los límites admitidos para automotores que usan específicamente gasolina como combustible. En la revisión técnica vehicular se realizan pruebas estáticas, de acuerdo con el año del modelo de cada vehículo, para evaluar que las emisiones de CO y HC estén dentro de los límites permitidos que se indican en la Tabla 2.5, a continuación:

**Tabla 2.5** Límites máximos permisibles para emisiones de motores a gasolina

Año modelo	% CO <sup>a</sup>		ppm HC <sup>a</sup>	
	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

<sup>a</sup> Volumen  
<sup>b</sup> Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

**Fuente:** NTE INEN 2204 (INEN, 2017, p. 4)

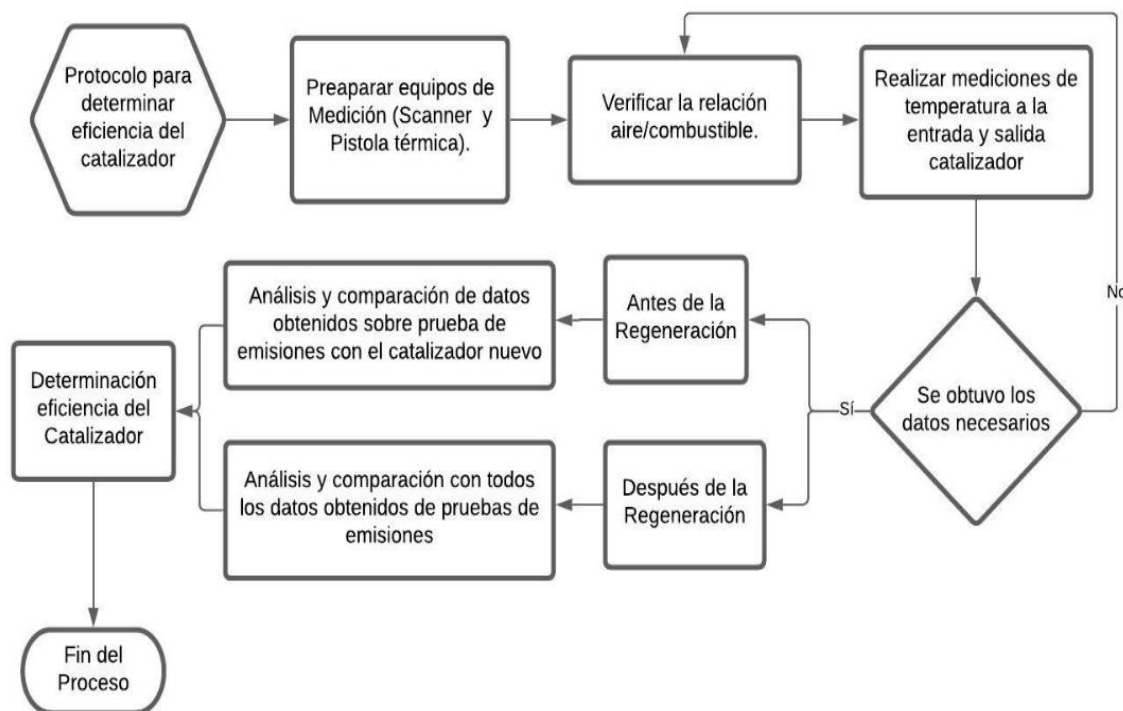
## 2.5. PROTOCOLO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL CATALIZADOR

Con este protocolo se obtuvo los datos necesarios para determinar la eficiencia de los catalizadores antes y después de ser regenerados, teniendo en cuenta que el análisis se lo realizó con los datos obtenidos de las pruebas de emisiones y de temperaturas con el que posteriormente se concluye si es factible o no realizar este método de regeneración.

De acuerdo con los datos obtenidos en este proceso, se estableció la eficiencia de regeneración de cada uno de los catalizadores mediante una comparación entre los datos de cuatro usados, con los datos de uno nuevo. Teniendo en cuenta que todas las pruebas se realizaron en el mismo vehículo y que se utilizó catalizadores originales y alternos. Esto permitió evaluar para cuales de los dispositivos puestos a prueba se obtuvo mejores resultados al aplicar este método de regeneración mediante vapor saturado.

Además, con la diferencia de temperaturas de entrada y salida del catalizador se puede determinar el posible estado general en el que se encuentra. Tomando en cuenta que la temperatura de salida es mayor a la temperatura de entrada.

Si la diferencia de temperatura está entre 45 y 70 °C, está en funcionamiento correcto, si la diferencia es mayor 70 °C posiblemente existe un problema con el catalizador o algún sistema del vehículo, y si es menor a 30 °C, se debe sustituir el catalizador (Robalino & Flores, 2018, p. 10).



**Figura 2.7** Flujograma del Protocolo para determinar la eficiencia del catalizador

Para determinar la eficiencia de los catalizadores antes y después de la regeneración, se estableció el proceso descrito en la Figura 2.7, en donde se toma en cuenta la temperatura de entrada y salida, además de las pruebas de emisiones de cada uno de los convertidores catalíticos con lo que se obtendrá la eficiencia específica para cada uno de los gases.

Otro método más preciso para la evaluar la eficiencia específica de cada uno de los gases es el cálculo mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$EF_M = \frac{A_S - A_C}{A_S} * 100 \quad [2.1]$$

Donde:

- $EF_M$ : Eficiencia del Convertidor catalítico respecto a M, (M representa la medición de  $CO_2$ , CO,  $NO_x$  y HC).
- $A_S$ : Medida en volumen de la emisión registrada del gas escogido sin el convertidor catalítico.
- $A_C$ : Medida en volumen de la emisión registrada de uno de los gases (Marza, 2015).



## 2.6. PROTOCOLO PARA LA REGENERACIÓN DEL CATALIZADOR

La regeneración consiste en la restauración de la condición activa del catalizador. Es decir, tratar de restaurar las condiciones iniciales del catalizador sin alterar ninguno de sus componentes (Heck & Farrauto, 2001, p. 4).

La desactivación química se produce principalmente por contaminantes que se disuelven formando ácidos, por tal razón la mayoría de las técnicas de regeneración se basan en la utilización de ácidos orgánicos débiles para desplazar estos contaminantes de la superficie del catalizador. Los ácidos frecuentemente utilizados son el acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), oxálico ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ) y el cítrico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ). El ácido oxálico es muy eficaz para la eliminación de fósforo (P) y cobre (Cu), mientras que el ácido cítrico es mejor para eliminar Zinc (Zn), Plomo (Pb) y Níquel (Ni). Por esta razón, el tratamiento con ácidos orgánicos débiles podría ser una técnica eficaz para reactivación de catalizadores, con la problemática de que genera contaminación y el uso de numerosas tecnologías afecta la fiabilidad económica el proceso de regeneración.

La desactivación en el Catalizador está relacionada con las severas condiciones de funcionamiento a las que se encuentran sometidos, como también las propiedades fisicoquímicas de los combustibles utilizados; y que se las puede clasificar en: químicas, térmicas y mecánicas; y pueden presentarse individuales o en combinación; dando siempre como resultado la pérdida de actividad catalítica (Ávila, 2012, p. 7). La desactivación química es reversible, ya que es causada por incrustaciones en la superficie del monolito que la vuelven parcialmente inactiva, obstruyendo las celdas, y que puede deberse a sustancias contenidas en el combustible, aceite o aditivos como Azufre (S), plomo (Pb), fósforo (P) o Zinc (Zn) modificando la estructura de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) por fosfato de aluminio ( $\text{AlPO}_4$ ), causando tasas reducidas de reacciones de oxidación y reducción y pérdida de eficiencia de conversión (Asencio, Rincón, Camarillo, & Martín, 2008, p. 3; Ocsachoque, 2012, p. 34).

Como alternativas de regeneración se usan fluidos supercríticos por sus condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico, haciendo que se comporte como un híbrido entre un gas y un líquido, en otras palabras, puede extenderse como un gas (efusión), y disolver sustancias como un líquido (disolvente). Este tipo de regeneración se realiza en la industria petrolera en los diferentes tipos de catalizadores con resultados prometedores y con

la ventaja de que el proceso puede repetirse múltiples veces, apuntan que también puede utilizarse en catalizadores automotrices, con la principal ventaja económica y medioambiental (Christou & Efstathiou, 2013, p. 6; Morgan, 2015, p. 4).

### **2.6.1. MÉTODOS DE REGENERACIÓN DE CATALIZADORES**

En la actualidad ya existen máquinas equipadas con alta tecnología para limpieza de filtros de partículas y catalizadores, sin embargo, existen metodologías como las que se menciona a continuación:

- Tratamientos térmicos

Este método emplea agua a altas temperaturas combinada con solventes como Dióxido de carbono, Etanol, Metanol utilizados como fluidos supercríticos que no son contaminantes en comparación a otros. La desventaja es que el proceso depende de varias máquinas para controlar presión y temperatura y además realizar el secado del dispositivo, también está el riesgo de dañar la cerámica y afectar el funcionamiento del catalizador.

- Uso de aditivos químicos

Existen aditivos que deben ser pulverizados mediante una bomba en el sistema de admisión, sirve para limpiar válvulas y las cámaras de combustión, también evita la obstrucción de hollín en el catalizador, pero que no son recomendables porque no logran una limpieza eficiente y es más bien un método preventivo.

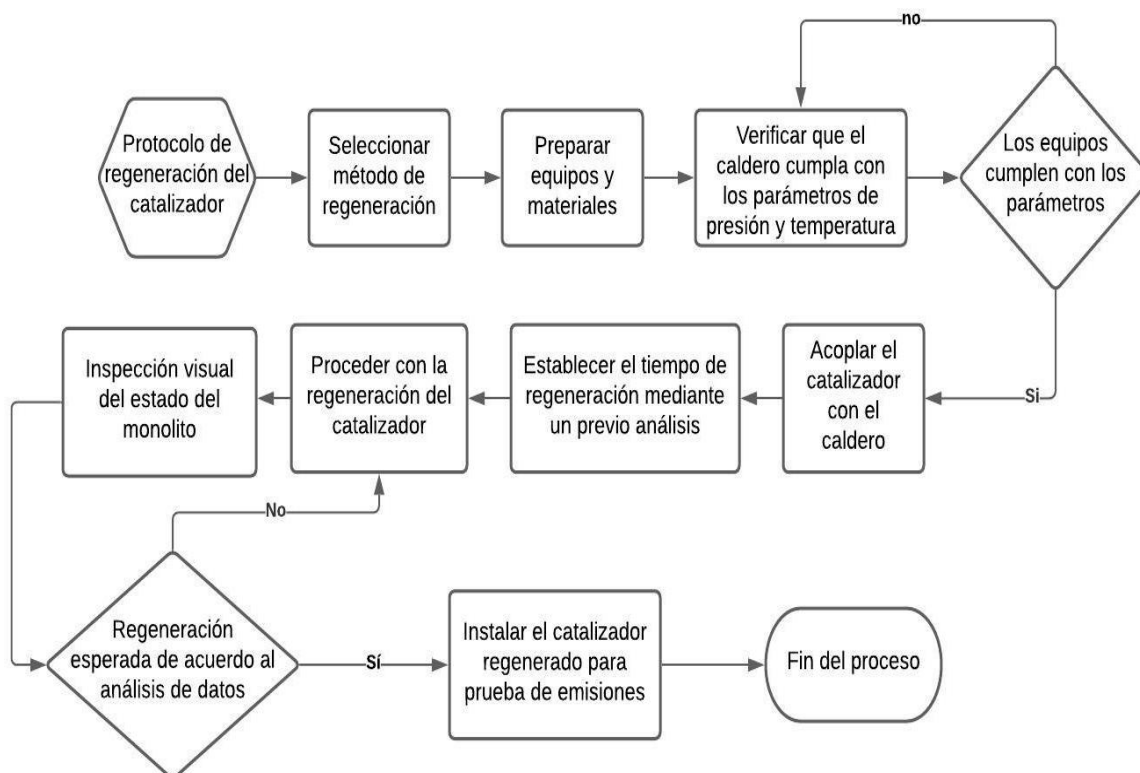
- Aplicación de Ultrasonido

Este método tiene un tiempo de regeneración de 60 a 90 minutos, se trata de provocar vibraciones por ultrasonido a una temperatura de 60°C y sumergir en solventes como el etanol, con esto se logra remover los sedimentos acumulados en la cerámica, sin embargo, las desventajas son que solo desprende el hollín de las paredes y no las evacúa del catalizador, es decir que es necesario un lavado, lo que implica la utilización de varias máquinas para realizar el proceso de limpieza y de secado.

- Limpieza con vapor saturado

Este es un método menos costoso y una gran alternativa porque no necesita de tantas máquinas o equipos para realizar la limpieza del catalizador, y el agua es un recurso que se lo puede conseguir en grandes cantidades. Además, a temperaturas críticas actúa como

sustancia polar, por lo tanto, tiene propiedades disolventes y adherentes lo que es ideal para la limpieza de catalizadores. Una de las mayores ventajas es que no es contaminante y se puede obtener de un caldero piro tubular que es más accesible en el medio, debido a que no se utilizan aún en el Ecuador máquinas para limpieza de estos dispositivos (Iberisa, 2018, pp. 1-7).



**Figura 2.8** Flujograma del Protocolo de regeneración del catalizador

Para realizar la regeneración de los catalizadores, se siguieron los siguientes pasos descritos en la Figura 2.8, de acuerdo con el método seleccionado, luego de realizar la regeneración, se evaluó las emisiones de cada uno de los dispositivos, este proceso es necesario para determinar la eficiencia y posteriormente la durabilidad de regeneración.

Para el proceso de regeneración se estableció un protocolo en el cual se detalla cada uno de los pasos y los equipos que se utilizaron, como el caldero piro tubular, herramientas manuales, además, se determinó el periodo de tiempo al que se sometieron los catalizadores al vapor saturado según los datos obtenidos en las pruebas de emisiones y eficiencia de los catalizadores, con la finalidad de obtener el resultado esperado después de la regeneración.

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se exponen los datos obtenidos de las pruebas tanto de emisiones como de la regeneración planteados anteriormente. Además, se muestra el proceso para determinar la eficiencia de los catalizadores. Por último, se describe el desarrollo de cada uno de los protocolos y posteriormente se muestra el resultado final de esta investigación.

#### 3.1. ACONDICIONAMIENTO DEL VEHÍCULO

Para obtener datos más precisos y controlados en esta investigación, se efectuó un ABC en el vehículo, para que se encuentre en condiciones óptimas de funcionamiento y así realizar las pruebas de emisiones.

##### 3.1.1. ABC DEL VEHÍCULO

Para el ABC vehículo se realizó una revisión de los componentes, que a continuación se detallan:

- Revisión de filtro de aire

Este componente se encontraba en pésimas condiciones, es decir, completamente saturado, por lo cual fue reemplazado por uno nuevo de la marca ACDelco de tipo rectangular.



**Figura 3.1** Estado del filtro de aire

En la Figura 3.1, se muestra claramente que el filtro de aire está en mal estado, por lo tanto, se procedió a reemplazarlo por un filtro nuevo de las mismas características.

- Revisión del filtro de combustible

El filtro de combustible había terminado su vida útil, ya que presentaba exceso de suciedad en el papel filtrante, por lo tanto, se lo reemplazo por uno nuevo de la marca AC Delco adecuado para Mazda BT50.

- Revisión bujías

Para estos componentes solo se realizó una inspección visual de estado para determinar si es necesario su reemplazo.



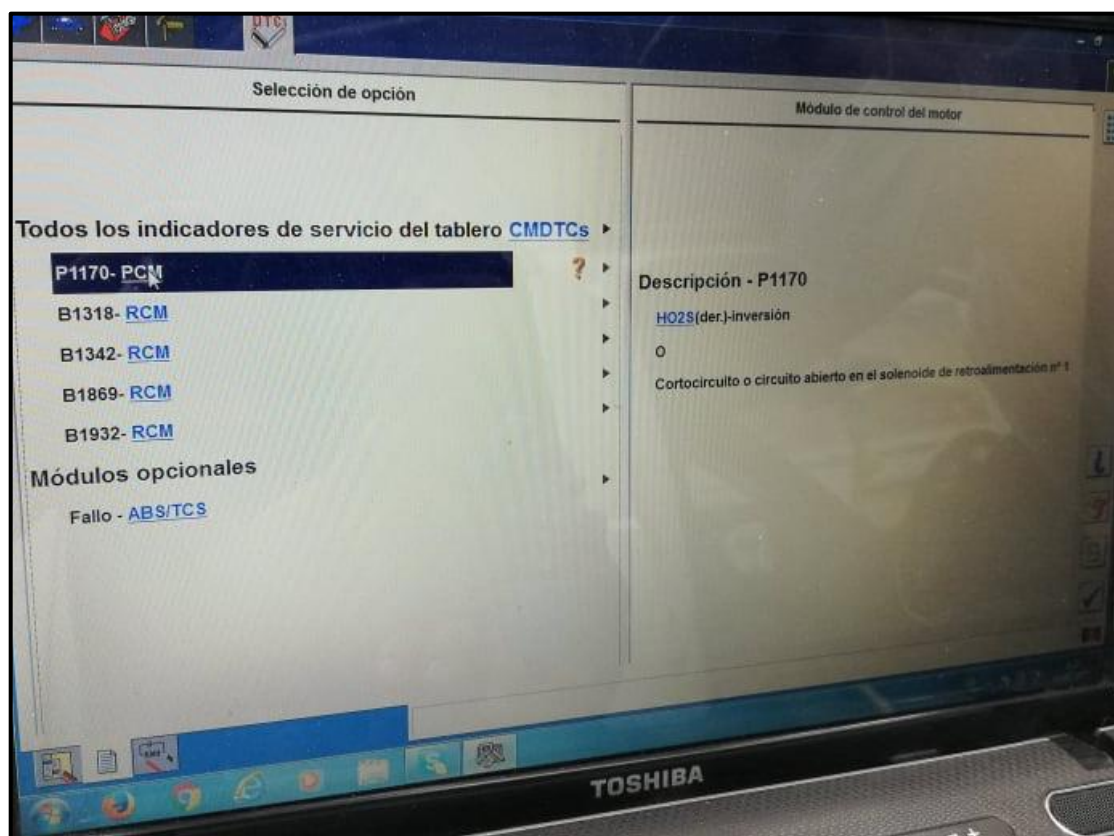
**Figura 3.2** Estado de bujía

En la Figura 3.2, se puede observar el estado de las bujías de encendido, estas se encontraban en un estado aceptable, por lo tanto, se realizó una limpieza de estas.

Se realizó el respectivo cambio de aceite de motor y filtro para obtener datos más precisos en las pruebas de emisiones. Para el filtro de aceite la marca que se utilizó fue AC Delco y el aceite que se utilizó fue de la marca Valvoline con especificaciones siguientes:

- Viscosidad: SAE 15W40
- Calidad: API SN
- Cantidad: 1.25 GL

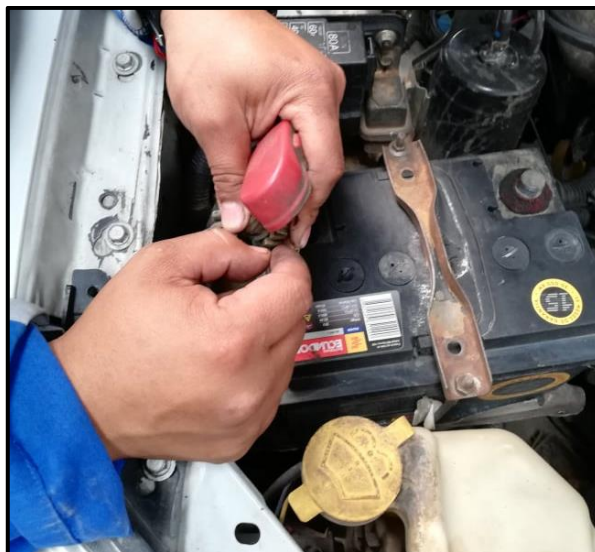
En la revisión del estado de sensores y actuadores, se empleó el escáner para determinar el estado inicial de las condiciones del vehículo y posteriormente se realizó una calibración, en la cual se borró los DTC (Códigos de falla), como también se procedió a reiniciar la ECU del motor para verificar si existe la necesidad de reparar o reemplazar algún elemento.



**Figura 3.3** Lectura de DTC's del vehículo

En la Figura 3.3, se muestra los resultados obtenidos con el scanner, para ello se conectó el scanner al puerto OBDII del vehículo y se procedió a verificar los DTC existentes. Después de una lectura de códigos de falla, el scanner arrojó un DTC que indica que hay un cortocircuito o circuito abierto en el cableado del sensor de oxígeno.

Se procedió a reparar la falla del DTC, para luego borrar este código mediante un reinicio de la ECU, desconectando primero el borne positivo y negativo de la batería para luego conectarlos durante 30 segundos.



**Figura 3.4** Reinicio de la ECU

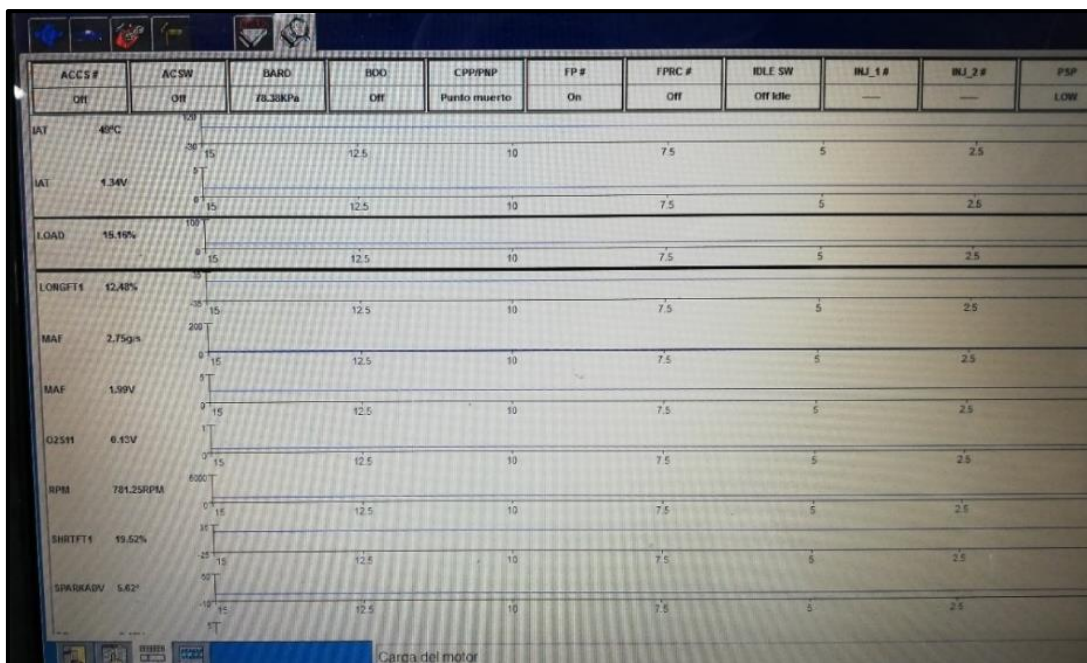
En la Figura 3.4, se muestra cómo se debe realizar el reinicio de la ECU para borrar los códigos de falla y verificar si se debe reparar algún componente.

Para verificar las señales de los sensores y actuadores se procedió a efectuar una lectura de flujo de datos, mostrados en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Tabla de datos de sensores y actuadores

<b>Sensor y actuadores</b>	<b>Valores</b>	
ECT	78°C	0.68 V
IAT	49° C	1.34 V
MAF	2.75 gt/s	1.99 V
O2	0.13 V	
CKP	718 RPM	
TPS	0.43 V	
BARO	3.08 V	
IAC	2.57 ms	
Inyector	2.92 ms	
Consumo a largo plazo	16.47 %	
Consumo a corto plazo	19.52%	

Se comprobó la corrección del código de fallo, en el cual indica que el voltaje de señal del sensor de oxígeno es de 0,13, es decir que el sensor ya se encuentra funcionando. Además, se verificó que los valores y señales de cada uno de los sensores y actuadores se encuentran en parámetros aceptables para realizar las pruebas de emisiones en este vehículo.



**Figura 3.5** Lectura de flujo de datos

En el flujo de datos mostrados en la Figura 3.5, se puede verificar que el DTC detectado inicialmente fue corregido.

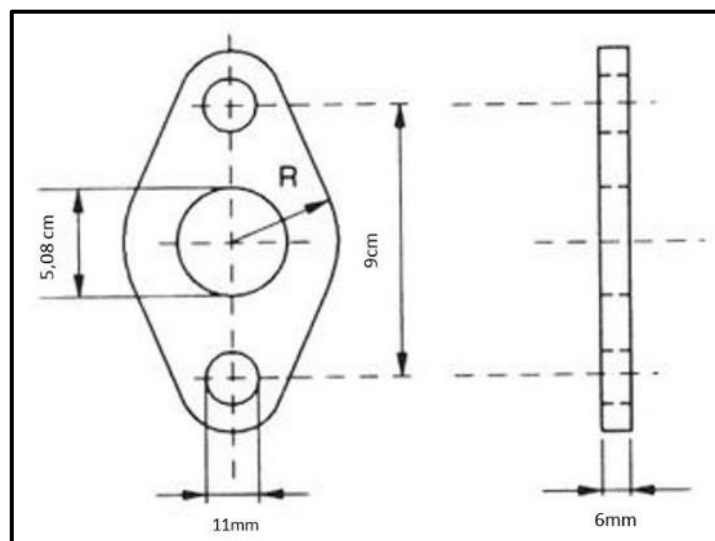
### 3.2.FABRICACIÓN DE BRIDAS PARA LOS CATALIZADORES

Para mayor eficacia en las pruebas de emisiones y regeneración se fabricó bridas que facilitaron el montaje y desmontaje de los catalizadores. Para ello, se utilizó los siguientes materiales y equipos:

- 2 metros de tubo de escape de 2 pulgadas.
- Plancha de acero de 6mm de espesor.
- Amoladora
- Cortadora eléctrica
- Esmeril
- Torno
- Sueda MIG-MAG



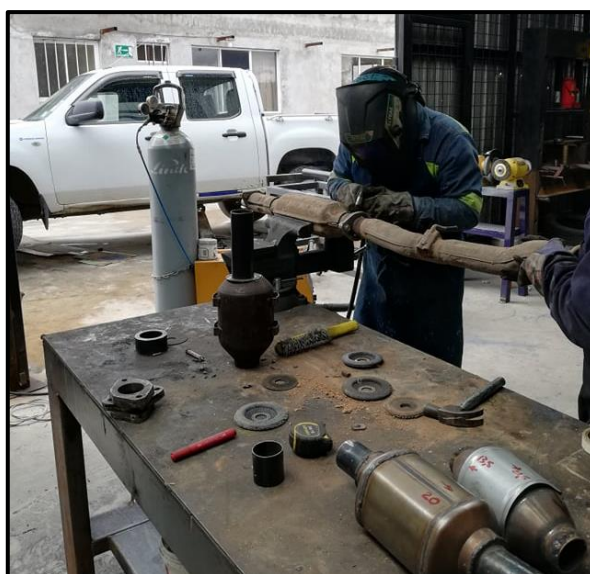
A continuación, se muestra el esquema realizado para la fabricación de las bridas para los acoples de cada uno de los catalizadores:



**Figura 3.6** Plano para construcción de bridas

La Figura 3.6, es el esquema para la fabricación de las bridas necesarias para realizar los acoples de los catalizadores y para realizar la regeneración.

Los parámetros que se tomó en cuenta para la construcción de las bridas fueron las dimensiones del catalizador y longitud del tubo de escape del vehículo para realizar los acoples con mayor precisión. Para ello fue necesario desmontar el catalizador y parte del tubo de escape para realizar las mediciones correspondientes.



**Figura 3.7** Dimensionamiento de acoples y bridas

En la Figura 3.7, se observa que es necesario el desmontaje de todo el tubo de escape junto con el catalizador, para realizar con precisión los acoples y bridas. La fabricación de los acoples para los catalizadores es fundamental para agilizar el proceso de pruebas de emisiones ya que el estudio se realizó con varios catalizadores y esto permitió que el montaje de estos sea más rápido.



**Figura 3.8** Diseño de bridas

Además, para asegurar que haya hermeticidad con los acoples, se diseñó un acabado en forma de empaque en cada una de las bridas con la ayuda de un torno, como se muestra en la Figura 3.8.

### **3.3. PRUEBA DE EMISIONES Y EFICIENCIA DE LOS CATALIZADORES**

Para llevar a cabo las pruebas de emisiones, inicialmente se preparan los equipos necesarios, luego se procede a conectar el scanner al puerto OBD II del vehículo, teniendo en cuenta los parámetros del lugar donde se realizaron las pruebas:

- La presión atmosférica: 11 psi
- Temperatura del ambiente: 23°C
- Altura ciudad de Ibarra: 2220 m.s.n.m

Análisis de Datos(Seleccionar elemento)			
Artículo(1/6)	Valor	Unidad	
Temperatura del aire de admisión 2	44	'C	▲
Temperatura del agua del motor	78	'C	▲▲
Presión atmosférica	11	psi	▲▲▲
RPM del motor	781	rpm	▲▲▲▲
Cantidad de aire de admisión	3	g/sec	▲▲▲▲▲
Sensor de O2 frontal	0.17	V	▲▲▲▲▲▲
			▼
			▼▼
			▼▼▼
			▼▼▼▼

Función	Normal		Gráfico	Registro	todos los Artículo
---------	--------	--	---------	----------	--------------------

**Figura 3.9** Datos de condiciones del vehículo

En la Figura 3.9, se muestran los datos se obtuvieron con el scanner G-SCAN 2 necesarios para saber las condiciones del vehículo, y verificar el funcionamiento del sensor de oxígeno. también se establecieron los parámetros de control del vehículo tales como:

- Temperatura del motor: 78°C
- Temperatura del aire de admisión: 44°C
- Relación aire/combustible: 14,7:1
- Kilometraje: 218613
- Combustible: Gasolina de 87 octanos (RON) "Extra"

Con los datos obtenidos de las emisiones y temperaturas de cada uno de los catalizadores, se realizó respectivo análisis antes de su regeneración. Estos datos sirven para posteriormente comparar los resultados de las pruebas hechas a los catalizadores regenerados y los resultados de emisiones sin catalizador que para hidrocarburos no quemados (HC) es de 180ppm y para monóxidos de carbono (CO) es de 0,62%. Con estos datos se calculó la eficiencia de cada catalizador aplicando la Ecuación 2.2, planteada en el Capítulo I.

### 3.3.1. DATOS DEL CATALIZADOR SERVINTEC

Para el catalizador SERVINTEC, la eficiencia antes de la regeneración es menor al 50% en general ya que su diferencia de temperatura es de 17°C y al determinar para cada uno de los gases se obtuvo una eficiencia de 18,8 % para HC y del 0% para CO. Con estos datos se deduce que el catalizador debe ser reemplazado.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 146}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 18,88\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,62}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 0\%$$

En la Tabla 3.2, se muestra los resultados de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.2** Resultados de emisiones del catalizador SERVINTEC

Catalizador SERVINTEC	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	146	83	0,62	0,61	17	18,88	0

### 3.3.2. DATOS DEL CATALIZADOR MAZDA XK

Para el catalizador Mazda XK, la eficiencia antes de la regeneración es menor al 50% ya que su diferencia de temperatura es de 21°C y al determinar para cada uno de los gases se obtuvo una eficiencia de 19,4 % para HC y del 3,2% para CO. Con estos datos se deduce que el catalizador debe ser reemplazado.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 145}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 19,44\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,60}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 3,2\%$$

En la Tabla 3.3, se muestran los datos de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.3** Resultados catalizador Mazda XK

Catalizador Mazda 3	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	145	86	0,60	0,62	21	19,4	3,2

### 3.3.3. DATOS DEL CATALIZADOR INDIMA

Para el catalizador INDIMA, la eficiencia antes de la regeneración es menor al 50% ya que su diferencia de temperatura es de 13°C y al determinar para cada uno de los gases se obtuvo una eficiencia de 13,88 % para HC y del -12,9 % para CO. Con estos datos se deduce que el catalizador presenta retención de gases y esto hace que se genere un aumento de emisiones de CO.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 155}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 13,88\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,70}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = -12,9\%$$

En la Tabla 3.4, se muestran los datos de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.4** Resultados catalizador INDIMA

Catalizador INDIMA	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	155	96	0,70	0,63	13	13,88	-12,9

### 3.3.4. DATOS DEL CATALIZADOR BT50 ORIGINAL

Para el catalizador BT50 original, la eficiencia antes de la regeneración es menor al 50% ya que su diferencia de temperatura es de 23°C y al determinar para cada uno de los gases se obtuvo una eficiencia de 28,8 % para HC y del 30,6 % para CO. Con estos datos se deduce que es necesario cambiar el catalizador, como lo indica el fabricante.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 128}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 28,8\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,43}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 30,6\%$$

En la Tabla 3.5, se muestran los datos de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

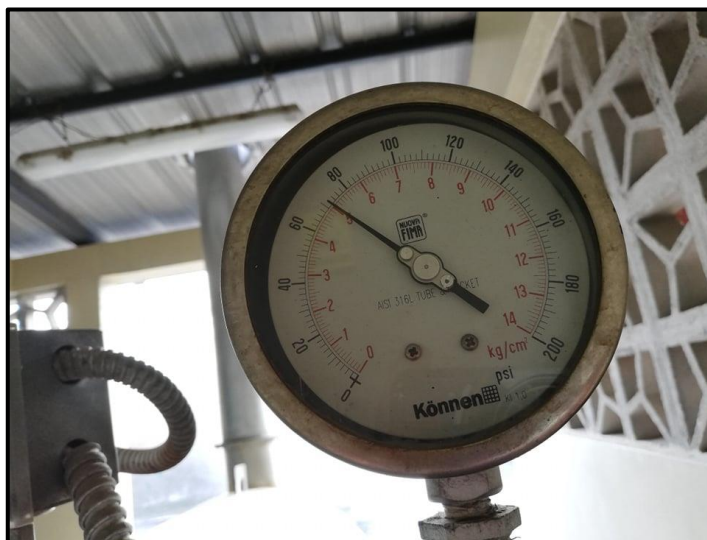
**Tabla 3.5** Resultados catalizador BT50 original

Catalizador BT50 Original	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	128	82	0,43	0,63	23	28,8	30,6

### 3.4. REGENERACIÓN DE LOS CATALIZADORES

Como se mencionó en el anterior capítulo, se empleó un caldero de tipo piro tubular para la regeneración de los catalizadores, mediante vapor saturado. Para ello, se encendió el caldero verificando que cumpla con los parámetros necesarios para su funcionamiento, tales como:

- Presión de: 70 Psi
- Temperatura: 150 a 160° C



**Figura 3.10** Presión de trabajo del caldero

En la Figura 3.10 presentada a continuación, se muestra como el caldero se estabilizó a una presión de 70 Psi, tomando en cuenta que la presión debe mantenerse entre los rangos de 60

a 80 Psi porque si la presión es menor a 60, se enciende el quemador del caldero y no generaría suficiente vapor para la regeneración de los catalizadores.

Al utilizar la válvula de purga para la regeneración, y tomando en cuenta que después de un intervalo de 1 a 3 minutos, esta deja de purgar vapor debido a que el quemador se apaga y baja el nivel de agua. Esta condición fue de gran importancia para determinar el tiempo de exposición al vapor de cada uno de los catalizadores, además de otros parámetros como los resultados de las pruebas de emisiones y temperaturas antes de la regeneración, y también con base en investigaciones realizadas anteriormente en las que indican que el tiempo de regeneración es de aproximadamente 30 minutos, por lo tanto, en esta investigación se vio conveniente establecer tiempos entre 20 y 30 minutos con intervalos de 1 a 3 minutos, tomando en cuenta que mientras más saturado se encuentre, más tiempo será expuesto el convertidor catalítico.

A continuación, en la Tabla 3.6 se especifica los tiempos que fueron expuestos cada uno de los catalizadores:

**Tabla 3.6** Intervalos de tiempo de regeneración

#	Catalizador	Tiempo de regeneración
1	SERVINTEC Universal	20 minutos con intervalos de 2 minutos.
2	Mazda XK Original	20 minutos con intervalos de 2 minutos.
3	INDIMA Universal	30 minutos con intervalos de 3 minutos.
4	BT50 Original	30 minutos con intervalos de 3 minutos.

Una vez determinado el tiempo y los intervalos para la regeneración, se procedió a colocar el acople al catalizador verificando que tenga hermeticidad, y posteriormente conectar a la salida de la válvula de purga del caldero.





**Figura 3.11** Acoplamiento catalizador - válvula de purga

En la Figura 3.11 se muestra la forma en que se acopló el catalizador con la válvula de purga de la caldera de vapor para proceder a la regeneración.

Después de realizar los acoples a la salida del vapor, se procedió a abrir la válvula de purga y efectuar la regeneración del catalizador, de acuerdo con el tiempo e intervalos establecidos. Luego de cada intervalo se realizó una inspección visual del monolito, para hacer un seguimiento de la regeneración. Finalmente, este proceso se lo llevó a cabo con cada uno de los catalizadores.

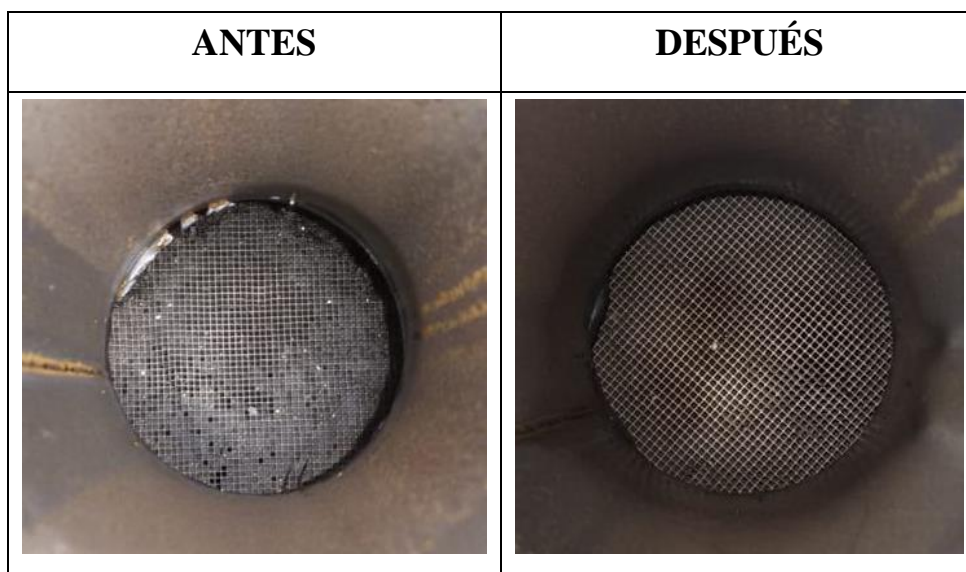


**Figura 3.12** Catalizador regenerándose

En la Figura 3.12 mostrada se observa el momento en que el catalizador se está regenerando mediante vapor saturado, acoplado a la salida de la válvula de purga de la caldera.

Después de haber efectuado todo el proceso con cada uno de los catalizadores, se volvió a realizar las pruebas de emisiones y temperaturas, para comparar con los datos obtenidos antes de la regeneración y determinar el grado de eficiencia que se obtuvo de cada uno de

los catalizadores. A continuación, se muestra una comparación del estado del monolito, antes y después de la regeneración, del catalizador original Mazda XK.



**Figura 3.13** Comparación de estado de monolito, antes y después de la regeneración

En la Figura 3.13, se muestra claramente el resultado de la regeneración con vapor de agua saturado, se puede apreciar en la primera imagen que el catalizador se encuentra con mucha saturación, mientras que en la imagen del lado derecho está el monolito libre de saturación, resultado de la regeneración.

Una vez realizado el proceso de regeneración, se procedió a efectuar las pruebas de emisiones de cada uno de los catalizadores, para su posterior análisis de eficiencia.

#### 3.4.1. ANÁLISIS DE DATOS DEL CATALIZADOR SERVINTEC

Después de la regeneración, la eficiencia sigue siendo menor al 50% en general porque la diferencia de temperatura es de 34°C y para la eficiencia en emisiones de HC sigue siendo 18,8%, mientras que para el CO hay una mejoría del 6,6%. Con lo que se determina que no existe una mejora considerable.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 146}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 18,88\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,58}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 6,6\%$$

En la Tabla 3.7, se muestra los datos obtenidos de las pruebas de emisiones después de la regeneración, para realizar un análisis de los resultados.

**Tabla 3.7** Resultados catalizador SERVINTEC

Catalizador SERVINTEC	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	146	83	0,62	0,61	17	18,88	0
Después de regeneración	146	87	0,58	0,65	34	18,8	6,6

### 3.4.2. ANÁLISIS DE DATOS DEL CATALIZADOR MAZDA XK

Después de la regeneración, la eficiencia resultó alrededor del 50% en general porque la diferencia de temperatura fue de 32°C y en el resultado de emisiones de HC mejoró en un 6,7% mientras que del CO de 22,6 %.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 133}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 26,11\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,46}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 25,8\%$$

En la Tabla 3.8, se muestran los datos de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.8** Resultados catalizador Mazda XK

Catalizador Mazda XK	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	145	86	0,60	0,62	21	19,4	3,2
Después de regeneración	133	75	0,46	0,59	32	26,11	25,8

### 3.4.3. ANÁLISIS DE DATOS DEL CATALIZADOR INDIMA

Después de la regeneración, la eficiencia resultó ser menor al 50% en general porque la diferencia de temperatura fue de 19°C y para la eficiencia en emisiones de HC hay una mejora del 12,62%, mientras que para el CO hay una mejoría del 11,3%. Reflejando también que se redujo la retención de gases y por tal razón una mejoría en las emisiones.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 134}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 25,5\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,63}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = -1,6\%$$

En la Tabla 3.9, se muestran los datos de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.9** Resultados catalizador INDIMA

Catalizador INDIMA	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	155	93	0,70	0,63	13	13,88	-12,9
Después de regeneración	134	83	0,63	0,71	19	25,5	-1,6

#### 3.4.4. ANÁLISIS DE DATOS DEL CATALIZADOR BT50 ORIGINAL

Después de la regeneración, la eficiencia resultó alrededor del 50% porque la diferencia de temperatura fue de 60°C y los resultados en las emisiones de HC mejoraron un 32,3%, mientras que el CO tuvo una mejora de un 39,81%.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 70}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 61,1\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,14}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 77,41\%$$

En la Tabla 3.10, se muestran los datos de la eficiencia y pruebas de emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.10** Resultados catalizador BT50 original

Catalizador BT50 Original	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	128	82	0,43	0,63	23	28,8	30,6
Después de regeneración	70	73	0,14	0,38	60	61,1	77,41

### 3.4.5. RESULTADOS DE LOS DATOS DE EMISIONES DEL CATALIZADOR NUEVO

Los valores obtenidos del catalizador nuevo permitieron realizar una comparación con cada uno de los resultados de los demás catalizadores antes y después de la regeneración, y ayudar a tener datos más precisos para la investigación.

- Cálculo de eficiencia para emisiones de HC:

$$EF_M(\text{HC}) = \frac{180 - 122}{180} * 100$$

$$EF_M(\text{HC}) = 32,2\%$$

- Cálculo de eficiencia para emisiones de CO:

$$EF_M(\text{CO}) = \frac{0,62 - 0,40}{0,62} * 100$$

$$EF_M(\text{CO}) = 35,4\%$$

A continuación, en la Tabla 3.11, se muestra los datos obtenidos de las pruebas de eficiencia y emisiones de este catalizador:

**Tabla 3.11** Resultados catalizador Servintec (nuevo)

Catalizador SERVINTEC (Nuevo)	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Resultados	122	83	0,40	0,64	70	32,2	35,4

### 3.5. ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

Para este análisis se tomaron en cuenta todos los datos obtenidos antes y después de la regeneración, para tener un mejor enfoque de los resultados y así determinar que catalizador fue el que tuvo mayor eficiencia de regeneración.

Con el análisis de temperaturas de los catalizadores se determinó que ninguno llega a los 400°C, por tal razón ninguno trabaja al 100%, esto puede ser debido a factores como, temperatura ambiente, relación aire combustible, altura y presión atmosférica, además, de la calidad de los metales que contienen los catalizadores.

Los resultados reflejan que el catalizador INDIMA es el que presentó mayor deficiencia de catálisis de acuerdo con los datos teóricos y que además tenía mayor saturación del monolito produciendo retención de gases, mientras que el catalizador BT50 original es el que presentó inicialmente una mayor eficiencia.

Teniendo en cuenta que los catalizadores Servintec e Indima son alternos, se determinó inicialmente que los catalizadores originales presentan un mejor desempeño en cuanto a catálisis de HC y CO.

A continuación, en la Tabla 3.12, se muestra los resultados de todos los catalizadores antes de la regeneración:

**Tabla 3.12** Resultados antes de la regeneración

Catalizadores	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
SERVINTEC	146	83	0,62	0,61	17	18,88	0
Catalizador Mazda XK	145	86	0,60	0,62	21	19,4	3,2
Catalizador INDIMA	134	83	0,63	0,71	13	13,88	-12,9
Catalizador BT50 Original	128	82	0,43	0,63	23	28,8	30,6

También para esta investigación se tomó en cuenta la normativa vigente de emisiones para vehículos a gasolina de la ciudad de Ibarra y según los datos obtenidos en las pruebas, todos los catalizadores pasarían la revisión técnica. Por otro lado, se logró reducir las emisiones en la mayoría de los catalizadores lo cual es un aporte para reducir la contaminación del aire.

De acuerdo con los datos obtenidos después de la regeneración, se obtuvo que los catalizadores alternos de Servintec e Indima no son aptos para realizar este tipo de procedimientos de regeneración, porque no superan el 30% de eficiencia en los resultados de emisiones, esto puede ser debido a la calidad de metales que los componen, mientras que los catalizadores originales como el Mazda XK y BT50 tuvieron una buena regeneración que fue alrededor del 50% que es comparable con los datos de un catalizador alternativo nuevo. Con estos resultados se puede concluir que es más factible realizar la regeneración solo con catalizadores originales ya que estos presentan mayor calidad de los metales que contiene en



el monolito. Comparando las eficiencias con las pruebas de emisiones del catalizador Servintec nuevo y el original del vehículo, es más eficaz realizar este tipo de procedimiento que comprar un catalizador alterno nuevo.

Con los resultados generales de todos los catalizadores después de la regeneración, se compara la eficiencia de cada uno de ellos y los datos del catalizador nuevo, determinando si este proceso es viable para realizarlo y en qué tipo de catalizadores se obtiene mejores resultados.

En la Tabla 3.13, se muestran los resultados después de la regeneración de cada uno de los catalizadores:

**Tabla 3.13** Resultados después de la regeneración

Catalizadores	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
SERVINTEC	146	87	0,58	0,65	34	18,8	6,6
Catalizador Mazda XK	133	75	0,46	0,59	32	26,11	25,8
Catalizador INDIMA	155	96	0,70	0,63	19	25,5	-1,6
Catalizador BT50 Original	70	73	0,14	0,38	60	61,7	77,41
Catalizador SERVINTEC (Nuevo)	122	83	0,40	0,64	70	32,2	35,4

### 3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE DURABILIDAD DEL CATALIZADOR ORIGINAL BT50

De acuerdo con los datos obtenidos de temperatura y emisiones después de 50 días y 2823 km recorridos después de la regeneración del catalizador Original BT50, los resultados de emisiones de HC disminuyeron un 8,9 %, mientras que del CO mantuvo la eficiencia, con estos resultados se puede determinar que la durabilidad de este proceso de regeneración si es eficaz y recalando que sigue siendo mejor opción que un catalizador alterno nuevo.

En la Tabla 3.14, se muestran los resultados de todo el proceso al cual fue sometido el catalizador:

**Tabla 3.14** Resultados de pruebas de durabilidad

Catalizador BT50 Original	HC (ppm)		CO (%)		$\Delta$ Temperatura (°C)	Eficiencia (%)	
	Ralentí	2500rpm	Ralentí	2500rpm		HC	CO
Antes de regeneración	128	82	0,43	0,63	23	28,8	30,6
Después de regeneración	70	73	0,14	0,38	60	61,1	77,41
Pruebas después de 50 días (2823 Km)	86	80	0,14	0,48	42	52,2	77,41

### 3.7 ANÁLISIS DE COSTOS DE PROCESO DE REGENERACIÓN

Luego de haber ejecutado el proceso de regeneración de catalizadores, se analizó el costo estimado, tanto de mano de obra, materiales e insumos, con la finalidad de calcular si es factible o no la aplicación de esta alternativa para vehículos con motores a gasolina.

En la Tabla 3.15, se muestra el costo total para la fabricación de bridas que es de \$102. Mientras que para un solo catalizador el costo es de \$25.5.

**Tabla 3.15** Costos de fabricación de bridas de los catalizadores

Materiales y Mano de obra	Detalle	Cantidad	Costo Unitario	Costo Final (\$)
Tubo de escape	6 metros	1	12	12
Plancha de acero	610x1220x6 mm	1	20	20
Fabricación bridas	Soldadura MIG	14	5	70
Costo final				\$102

En la Tabla 3.16, se muestra el costo total para la regeneración de cuatro catalizadores que es de \$37,78, mientras que para un solo catalizador el costo es de \$9.44.

**Tabla 3.16** Costo de regeneración de catalizadores

Materiales y mano de obra	Detalle	Cantidad	Costo Unitario	Costo Final (\$)
Empaques de sujeción	Empaque de asbesto	4	1,5	6
Teflón	Para acople entre catalizador y caldero	1	0.50	0.50
Combustible	Diésel Industrial 2	5 gal	1.718084	8.59042
Mantenimiento	Mantenimiento diario promedio	1 día	7.69	7.69
Mano de obra	Costo de operación maquinaria	2 horas	7.5	15
Costo Final				\$ 37.78

Sin tomar en cuenta los costos de cada uno de los catalizadores que se utilizaron para esta investigación, se realizó el cálculo del valor aproximado para regenerar un catalizador.

En la Tabla 3.17, se muestra el costo total para realizar pruebas de emisiones de 4 catalizadores que es de \$72, mientras que para un solo catalizador el costo es de \$ 18.

**Tabla 3.17** Costo de pruebas de emisiones y temperatura de los catalizadores

Equipos y materiales	Detalle	Cantidad	Costo Unitario	Costo Final (\$)
Empaque de sujeción	Empaque para tubo de escape	8	3	24
Alquiler equipo	Analizador de gases Brain Bee y pistola termina	2	48	48
Costo Final				\$72

Finalmente, se obtiene la suma costos de todo el proceso de regeneración para 4 catalizadores que es de un aproximado de \$ 212, mientras que el costo de regeneración para un catalizador es de \$52 aproximadamente. Con estos resultados se puede hacer una comparación entre el costo de comprar un catalizador alterno nuevo y el costo de regeneración.

En la Tabla 3.18, se muestra el costo total de regeneración, sin tomar en cuenta el valor de cada catalizador, y el costo de regeneración de un catalizador:

**Tabla 3.18** Costo total de regeneración

Descripción	Costo Total (\$)
Regeneración de 4 los catalizadores	211,78
Regeneración de 1 catalizador	52,9

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- Se estableció que los convertidores catalíticos son eficaces en el tratamiento de gases de escape siempre y cuando se encuentren en los parámetros de funcionamiento, de acuerdo con la relación aire/combustible (14,7:1) y temperatura (250° a 400°C). Teniendo en cuenta que la vida útil de los catalizadores originales es de 80000 km o 5 años y no todos son aptos para realizar un proceso de regeneración, debido a que depende de su estado físico y la causa de su desactivación.
- En el protocolo de regeneración se estableció el tiempo, presión de trabajo y temperatura, además del equipo y materiales necesarios, para tener un proceso ordenado y controlado, en el cual se utilizó una caldera de vapor de tipo piro tubular. También con los datos obtenidos en las pruebas de emisiones y estado de cada uno de los catalizadores, se determinó que el tiempo a los cuales se sometió cada uno de ellos, que fue de 20 a 30 minutos, con intervalos de 1 a 3 minutos.
- De acuerdo con los datos obtenidos en las pruebas de emisiones y de temperaturas de cada uno de los catalizadores, la eficiencia de estos aumentó un 30% en emisiones de HC y CO para catalizadores originales, mientras que en alternos mejoró un 10% en las emisiones de CO y en HC se mantuvo. Y en comparación con datos del catalizador alternativo nuevo, los resultados indican que el catalizador original regenerado es un 30 % más eficaz.
- Luego del análisis de datos para determinar la durabilidad del catalizador regenerado, se realizó nuevamente pruebas de emisiones, después de 50 días con un recorrido de 2823 km del vehículo, se concluyó que la eficiencia bajó un 10% para emisiones de HC, mientras que en las de CO se mantuvo y sigue siendo más eficiente que comprar un catalizador alternativo. Por lo tanto, este método de regeneración si es una propuesta viable para aplicarla solamente en catalizadores originales, desactivados químicamente

(saturado). Además, con un análisis de costos para realizar este proceso, se obtuvo que la regeneración de un catalizador tendría un valor aproximado de 50 dólares, lo cual es más económico que comprar un catalizador alterno nuevo u original.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Tomar en cuenta, que los tipos de tecnología de pre combustión y post combustión en los vehículos influyen directamente en los resultados de las pruebas de emisiones, por lo tanto, se debería realizar más investigaciones con diferentes tipos de tecnologías y verificar su estado antes de realizar un proceso de regeneración y así el proceso sea controlado.
- De acuerdo con los resultados de regeneración, es recomendable exponer los catalizadores a mayor tiempo al vapor saturado, para obtener una mayor eficiencia, además, utilizar agua destilada y equipo especializado para producir solamente vapor y evitar intervalos en el proceso de regeneración, porque la presencia de agua puede generar daños en el monolito. También se puede utilizar otro tipo de sustancias para determinar su eficacia y el costo para la recuperación de catalizadores.
- Utilizar solamente catalizadores originales para este tipo de proceso de regeneración para tener un resultado más eficaz, debido a la calidad de materiales que integran estos dispositivos, que en catalizadores alternos no presentan y que su vida útil es alrededor de 16000 km o un año. Además, se podría realizar esta investigación con catalizadores automotrices de motores diésel para determinar si este proceso tiene la misma eficacia que con catalizadores de motores a gasolina.
- Para determinar un grado de durabilidad más preciso del catalizador regenerado se debería realizar más pruebas de emisiones, en diferentes condiciones de presión atmosférica, altura (m.s.n.m), temperatura ambiente y un mayor recorrido del vehículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANT. (2017). *Reglamento relativo a los procesos de la revision de vehículos a motor.* (070), 12. Recuperado de <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/03NOR2017-REGLAMENTO-PROCESOS-DE-REVISION-VEHICULOS-MOTOR.pdf>
2. Asencio, I., Rincón, J., Camarillo, R., & Martín, A. (2008). *Reciclado de catalizadores de automóviles. análisis de las técnicas actuales y propuestas de futuro.* (2), 23-24.
3. Ávila, A. D. P. (2012). Desactivación del catalizador. *Wordpress*, 5. Recuperado de <https://quimiart.files.wordpress.com/2012/05/desactivacic3b3n-catalc3adtica.pdf>
4. Barbosa, S., & Gutierrez, T. J. (2016). *Termodinamica para ingenieros.* Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/40432>
5. Christou, S. Y., & Efstathiou, A. M. (2013). Regeneration of aged commercial three-way catalysts using CI-containing reagents. *Topics in Catalysis*, 56(1-8), 255-260. <https://doi.org/10.1007/s11244-013-9963-y>
6. García, C. A. S. (2015). *Análisis Teórico Práctico Y Comparación En El Tiempo Para Determinar El Rendimiento De Un Convertidor Catalítico De Tres Vías Implementado En Un Vehículo Público Que Utiliza Gasolina Extra En El D.M.Q.*
7. Guardado, B., & Sánchez, R. (2009). *Elaboración de una guía práctica para determinar la solubilidad de las sustancias basandose en el tipo de enlace químico y de acuerdo a la posición de los elementos en la tabla periódica.* 50-51.
8. Guevara, H. M. G. (2010). *Metodología de pruebas para la evaluación de convertidores catalíticos en motores a gasolina.*
9. Heck, R. M., & Farrauto, R. J. (2001). Automobile exhaust catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 221(1-2), 443-457. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00818-3](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00818-3)
9. Iberisa, D. R. (2018). *LAVADORA PARA FILTROS DPF Reviv al filtro de.*
10. INEN. (2016). *Productos derivados del petróleo. Gasolina. Requisitos.* 9. Recuperado de <http://www.controlhidrocarburos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/06/nte-inen-935-9.pdf>



11. INEN. (2017). *ECUATORIANA NTE INEN 2204*.
12. Linares, C., Montero, J. C., & Mancha, C. (s. f.). *Contaminación*. (November 2014).
13. Lopez, S., Salvador, R. J. J., & Novella, R. F. (2020). *Cuestiones y problemas resueltos de motores de combustion interna alternativos (2a. ed.)*. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/129683>
14. Marza, J. C. (2015). Mantenimiento, reciclaje y renovación de catalizadores de automóviles. *Revista Tecnológica*, 11, 5-11.
15. Morgan, K. (2015). Metal redispersion strategies for recycling of supported metal catalysts: A perspective. *ACS Catalysis*, 5(6), 3430-3445. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b00535>
16. Munoz, D., & de Antonio, M. (2016). *Motores de combustion interna*. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/48846>
17. Ocsachoque, M. A. (2012). *Desarrollo de catalizadores metalicos soportados para la obtención de gas de sintesis*. 191.
18. Peón, J. P. (2007). El agua, una sustancia tan común como sorprendente. *Ciencia*, 58(3), 17-25.
19. Pérez, A. (2001). *En qué consiste el catalizador Catalizador y accesorios opcionales Pantalla Térmica superior Catalizador Pantalla Térmica inferior*.
20. Querol, X. (s. f.). *La calidad del aire en las ciudades*.
21. Rincón, J., Asencio, I., Camarillo, R., & Martín, A. (2008). Reciclado de catalizadores de automóviles. *Ingeniería Química*, 40(455), 182-189.
22. Robalino, P. S., & Flores, P. J. (2018). Eficiencia Térmica de los Catalizadores. *Artículo Investigación para la obtención del Título de Ingeniería en Mecánica Automotriz*, 0(0).
23. Rojas, E. V. R., Romero, V. J. H., & Pancha, J. M. R. (2019). Análisis del comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y del factor lambda de un vehículo con sistema de inyección convencional con catalizador y sin catalizador. *Ingenius*, (23), 23-29. <https://doi.org/10.17163/ings.n23.2020.02>

24. Sanchez, N. C. (2011). *Teoria de la combustion*. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/85139>
25. Secundino, E. (2011). *Motores*. Recuperado de <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/101844>
26. SENPLADES. (2017). Plan Nacional del Buen vivir 2017-2021. *Educational Research, 1*, 150. Recuperado de <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/07/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
27. Solórzano, F., & Vásquez, P. (2011). Estudio de factibilidad para la construcción de carcasas y ensamblaje de convertidores catalíticos. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3832/1/CD-3603.pdf>
28. Suarez, L. Y. T. (2015). *Tablas de Propiedades Termodinámicas del vapor de agua*. 1-27.
29. Tenorio, M. (2013). *NANOESTRUCTURADOS METAL – SOPORTE EN CO 2 SUPERCRÍTICO* Albertina Cabañas Poveda Concepción Pando García-Pumarino.
30. Toyota Motor Corporation. (2003). Manual sistema control emisiones gases nocivos escape inspeccion ajuste-co-hc-convertidores-cataliticos. *Manual sistema control emisiones-gases-nocivos-escape-inspeccion ajuste-co-hc-convertidores-cataliticos*, 2(6), 1-28.
31. Valencia, W. D. L. (2015). *Medición Y Comparación De Los Índices De Deterioro De Dos Catalizadores Operados Con Mezclas De Etanol-Gasolina*.
32. Velasco, R. J., Villada, H. S., & Carrera, J. E. (2017). Aplicaciones de los fluidos supercríticos en la agroindustria. *Informacion Tecnologica, 18*(1), 53-66. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642007000100009>

## **ANEXOS**

## ANEXO I

**NORMATIVA TÉCNICA ECUATORIANA PARA PRODUCTOS DERIVADOS  
DEL PETRÓLEO (GASOLINA) (NTE INEN 935, 2016)**

**TABLA AI.1.** Requisitos que establece la Normativa ecuatoriana para la Gasolina de 87 octanos (RON) "Extra"

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Número de octano Research (RON) <sup>a</sup>	—	87	—	NTE INEN 2102
Destilación: 10 %	°C	—	70	ASTM D86
50 %	°C	77	121	ASTM D86
90 %	°C	—	189	ASTM D86
Punto final	°C	—	220	ASTM D86
Residuo de destilación	% <sup>b</sup>	—	2	ASTM D86
Relación vapor – líquido a 80 °C	—	—	20	ASTM D5188
Presión de vapor	kPa	—	60	ASTM D323 ASTM D4953 ASTM D5191
Corrosión a la lámina de cobre (3 h a 50 °C)	—	—	1	ASTM D130
Contenido de gomas	mg/100 mL	—	3	ASTM D381
Contenido de azufre	% <sup>c</sup>	—	0,065	ASTM D2622 ASTM D4294 ASTM D5453
Contenido de aromáticos	% <sup>b</sup>	—	30	ASTM D1319
Contenido de benceno	% <sup>b</sup>	—	1	ASTM D3606 ASTM D5580 ASTM D6277 ASTM D6730
Contenido de olefinas	% <sup>b</sup>	—	18	ASTM D1319
Estabilidad a la oxidación	min	240	—	ASTM D525 ASTM D7525
Contenido de oxígeno	% <sup>c</sup>	—	2,7	ASTM D4815 ASTM D5845
Contenido de plomo	mg/L	—	No detectable	ASTM D3237 ASTM D5059 ASTM D5185
Contenido de manganeso	mg/L	—	No detectable	ASTM D3831 ASTM D5185
Contenido de hierro	mg/L	—	No detectable	ASTM D5185
<p>NOTA. En el caso que las gasolinas contengan etanol anhidro la presión de vapor, este puede llegar hasta 62 kPa.</p> <p><sup>a</sup> Para determinar el número de octano Research en ciudades de altura, se debe considerar la ecuación descrita en NTE INEN 2102.</p> <p><sup>b</sup> % corresponde a fracción de volumen expresada en porcentaje.</p> <p><sup>c</sup> % corresponde a fracción de masa expresada en porcentaje.</p>				

## ANEXO II

### NORMATIVA DE EMISIONES PARA MOTORES A GASOLINA EN EL ECUADOR NTE INEN 2204

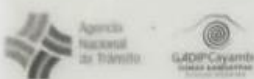
**TABLA AII.1.** Límites máximos permisibles para emisiones de motores a gasolina

Año modelo	% CO <sup>a</sup>		ppm HC <sup>a</sup>	
	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>	0 - 1500 <sup>b</sup>	1500 - 3000 <sup>b</sup>
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

<sup>a</sup> Volumen  
<sup>b</sup> Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

## ANEXO III

### MATRÍCULA DEL VEHÍCULO UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS DE EMISIONES

 <b>REPÚBLICA DEL ECUADOR</b> GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO INTERCULTURAL Y PLURINACIONAL DEL MUNICIPIO DE CAYAMBE			
PLACA ACTUAL PBQ8911	PLACA ANTERIOR FACTURA	AÑO 2018	
NÚMERO VIN (CHASIS) 8LFJNY02GBM003976	NÚMERO MOTOR F2870639	RAMV / CPN M-106762	
MARCA MAZDA	MODELO BT-50 CD 4X2 RAUDA GAS 2.2	CILINDRAJE 2200	AÑO MODELO 2011
CLASE DE VEHÍCULO CAMIONETA	TIPO DE VEHÍCULO CABINA DOBLE	PASAJEROS 5	TONELADAS 1.25
PAIS DE ORIGEN ECUADOR	COMBUSTIBLE GAS	CARROCERÍA MET	TIPO DE PESO LIVIANO (<= 3,5 T)
COLOR 1 BLANCO	COLOR 2 BLANCO	ORTOPÉDICO ----	REMARCADO NO

**Figura AIII.1.** Matrícula de camioneta Mazda BT50 a gasolina

## ANEXO IV

### ELABORACIÓN DE BRIDAS Y ACOPLEROS DE LOS CATALIZADORES

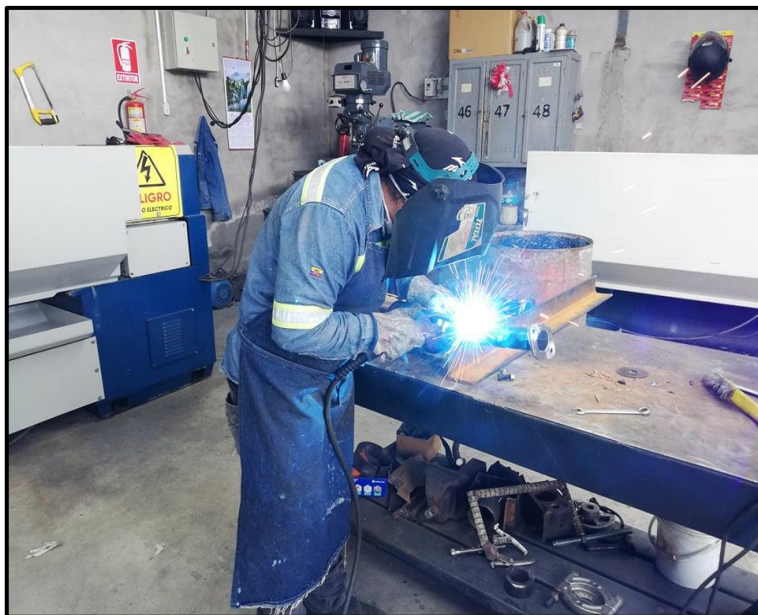


Figura AIV.1. Elaboración de bridas y acopleros de los catalizadores

### CATALIZADORES UTILIZADOS PARA LA REGENERACIÓN Y PRUEBAS DE EMISIONES



Figura AIV.2. Elaboración de bridas y acopleros de los catalizadores

## ANEXO V

### RESULTADOS DE PRUEBAS DE EMISIONES DEL CATALIZADOR ORIGINAL MAZDA BT50 ANTES DE LA REGENERACIÓN



**Figura AV.1.** Resultados de emisiones antes de regeneración del catalizador Mazda BT50 (Ralentí).



**Figura AV.2.** Resultados de emisiones antes de regeneración del catalizador Mazda BT50 (2500rpm).

## ANEXO VI

### ASESORAMIENTO TÉCNICO PARA USO DE LA CALDERA DE VAPOR EN EMPRESA REPROAVI - IBARRA



**Figura AVI.1.** Asesoramiento técnico: Ing. Byron López (jefe de mantenimiento)



**Figura AVI.2.** Acoplamiento del catalizador con la válvula de purga de la caldera





## ANEXO VII

### REGENERACIÓN DEL CATALIZADOR MEDIANTE VAPOR DE AGUA SATURADO (SUSTANCIA POLAR)



**Figura AVII.1.** Regeneración del catalizador mediante vapor de agua saturado

### RESULTADO DE LA REGENERACIÓN DEL CATALIZADOR

Catalizador Original Mazda XK	
ANTES	DESPUÉS
	

**Figura AVI.2.** Comparación de estado de monolito, antes y después de la regeneración

## ANEXO VIII

### RESULTADOS DE PRUEBAS DE EMISIONES CATALIZADOR ORIGINAL BT50 PARA DETERMINAR DURABILIDAD



**Figura AVIII.1.** Resultados de emisiones, durabilidad del catalizador Mazda BT50 (Ralentí).



**Figura AVIII.2.** Resultados de emisiones, durabilidad del catalizador Mazda BT50 (2500rpm).

## ANEXO IX

## ORDEN DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO DE CALDERA DE VAPOR

**Minser**

Materiales Industriales y Servicios  
**RUC: 0201300761001**  
**MERCEDES JUDITH CHORA**  
ENRIQUE CONCHA De 41 EL ROBLE 2 CASA 80  
TELF: (02)4524301 - 0986054250  
QUITO - ECUADOR

CALDERAS A VAPOR Y AGUA CALIENTE - TRABAJOS ELECTRICOS  
Y MECANICOS - QUEMADORES A DIESEL BALTOR - WEINE  
EMPAQUETADURAS DE ASBESTO VARIAS MEDIDAS MANO MOLES  
PROGRAMADORES-BOMBAS REPIESTOS EN GENERAL  
CALDERAS-TABLEROS ELECTRICOS-AUTOMATICOS CONTROL  
INDUSTRIAL-ACCESORIOS Y EQUIPOS A VAPOR DE 1000 KG

**COTIZACION N° 01049**

CLIENTE : SRS : REPROAVI.CIA.LTDA

DIRECCION :

FECHA DE EMISION : Quito, 2020/07/07      FECHA CADUCIDAD : 200/07/22

EN ATENCIÓN A SU PETICIÓN, ES GRATO INDICARLE EL SIGUIENTE PRESUPUESTO


CANT	DESCRIPCION	V. UNIT	V. TOTAL
01	Control de nivel eléctrico CNC 220v		268,00
01	Tubo de vidrio 3/8 alta presión Mac donall Miller		36,00
01	Siemens LMO 44,255C2		235,00
01	Fotocelda ORB1BL		59,00
01	Electrodo bifilare		48,00
02	Toberas de 4 y 5 GPH x 60	24,00	48,00
02	Transformador de encendido 220V		128,00
02	Cavos silicón	11,00	22,00
02	Supresores	21,00	42,00
01	Acople parastrappo goma		36,00
01	Electroválvula		125,00
01	Bomba suntec AN77A		296,00

<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 1343</b>
<b>IVA : 12%</b>	<b>\$ 161,16</b>
<b>VALOR TOTAL</b>	<b>\$ 1504,16</b>

INQUIETUD ALGUNA, HAGANOS SABER  
SERA UN GUSTO PODER AYUDARLE

TIEMPO DE ENTREGA : STOC BODEGA, SALVO VENTA PREVIA

FORMA DE PAGO : CONTADO, VIA TRANSFERENCIA

  
WASHINGTON CAUTULLIN ESTRADA  
Electromecánico

Email: minser.wachon@hotmail.com

Figura AIX.1. Orden de trabajo de mantenimiento de caldera de vapor