

## Disminución de emisiones contaminantes en un motor de combustión interna de cuatro tiempos encendido por chispa convencional de baja cilindrada.

Daniel Sanchez Alexis Nahir<sup>a\*</sup>, Dos Santos Betiana Soledad<sup>b</sup>, González Santiago Ezequiel<sup>c</sup>, Mattivi Federico Manuel<sup>d</sup>, Reinhermer, Sebastian Roman<sup>e</sup>, Pic Guillermo Atilio<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Alumno Ing. Electromecánica, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> Alumna Ing. Electromecánica, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>c</sup> Alumno Ing. Electromecánica, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>d</sup> Alumno Ing. Electromecánica, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>e</sup> Alumno Ing. Electromecánica, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>f</sup> Director de proyecto Ing. Mecánico, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: [alexis.nahir82@gmail.com](mailto:alexis.nahir82@gmail.com)\*, [betianasoledad2811@gmail.com](mailto:betianasoledad2811@gmail.com), [santiago13102000@gmail.com](mailto:santiago13102000@gmail.com), [fmmattivi@outlook.com](mailto:fmmattivi@outlook.com), [romanreinhermer@gmail.com](mailto:romanreinhermer@gmail.com), [picguillermo@gmail.com](mailto:picguillermo@gmail.com)

---

### Resumen

El artículo provee una visión general de los motores de combustión interna, los sistemas de alimentación y la importancia de la reducción de las emisiones contaminantes. Son remarcables los beneficios de la inyección electrónica en términos de eficiencia y cumplimiento de regulaciones ambientales. Es por ello que se establece la necesidad de cambiar de sistemas de carburación a sistemas de inyección electrónica para reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia del motor.

**Palabras Clave** – Carburación, Combustión Interna, Emisiones, Inyección, Motores.

### 1. Introducción

Las normas que rigen la emisión de gases contaminantes a la atmósfera son cada vez más rigurosas, es por ello que surge la necesidad de buscar alternativas que logren controlar o mitigar de mejor manera dichas emisiones especialmente en motores de combustión interna encendidos por chispa de cuatro tiempos de baja cilindrada, utilizados aún hoy en día en múltiples aplicaciones.

Diversos estudios han demostrado que en el Sistema convencional, cuya dosificación de combustible se realiza con carburador, la combustión incompleta del combustible es debida al suministro con cierto grado de exceso, lo cual promueve a la emisión de partículas de combustible sin quemar, lo que hace cada vez más cuestionado el uso de dicho motor. De acuerdo al sistema de movimiento de gases que se consigue en el motor de cuatro tiempos convencional, ocurre cierto índice de contaminación en los gases emitidos al ambiente.

La gestión electrónica logra disminuir en gran manera la emisión de gases contaminantes como el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, que son gases perjudiciales para los seres vivos y para el aumento de temperatura atmosférica.

Por lo general, la mayoría de motores de combustión interna encendidos por chispa de cuatro tiempos de baja cilindrada aún poseen carburador, lo cual es una desventaja para la emisión de los gases contaminantes, y una posible opción para combatir dicho efecto es modificar el Sistema de encendido y dosificación de combustible, utilizando gestión electrónica para controlar de manera precisa el instante en que se produce el encendido y la cantidad exacta de combustible a proporcionar según sea la condición de carga y régimen de funcionamiento. De esta forma dichas máquinas cumplirán con las exigencias de las normativas vigentes.

## 2. Desarrollo

En la actualidad, podemos encontrar dos tipos de motores, los encendidos por compresión y los encendidos por chispa. Los motores de encendido por chispa funcionan mediante la ignición de una mezcla de combustible y aire por medio de un arco eléctrico (chispa) entre los electrodos de un elemento llamado bujía de encendido. La mezcla es comprimida en el cilindro y luego de producida la chispa, se provoca la combustión de dicha mezcla. El aumento de presión debido a la expansión de los gases producto de la combustión, proponen una fuerza sobre el área superior del pistón produciendo el movimiento lineal, el cual es transmitido a través del cigüeñal y se convierte en movimiento rotativo al eje de transmisión. Estos motores a su vez se pueden clasificar en dos categorías según su ciclo de funcionamiento, en motores de dos tiempos y cuatro tiempos, a continuación se nombra las etapas del motor estudiado para el presente artículo.

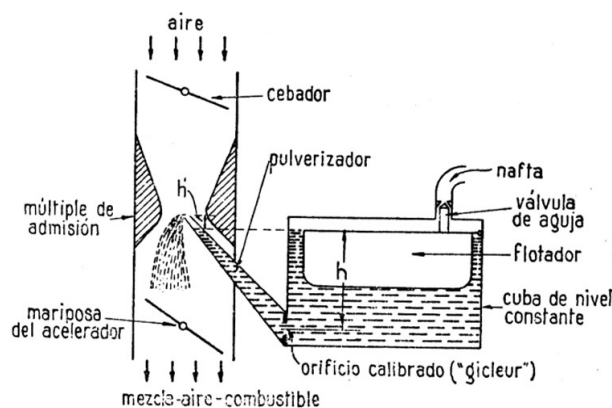
El ciclo de cuatro tiempos consta de las siguientes etapas:

- Admisión: se introduce la mezcla de combustible al interior del cilindro, durante esta etapa la válvula de admisión permanece abierta.
- Compresión: el trabajo del émbolo se transforma en aumento de presión y temperatura de la mezcla, cabe destacar que durante esta etapa, ambas válvulas permanecen cerradas.
- Expansión: la combustión de la mezcla en el interior de la cámara de combustión provoca cierta diferencia de presión respecto al exterior del cilindro, la cual se transforma en trabajo realizado por el Sistema pistón - biela.
- Escape: los gases de escape son expulsados del cilindro por medio del sistema de escape.

Los sistemas de alimentación de los motores de encendido por chispa más utilizados en la actualidad son los siguientes:

- Carburador: es el encargado de dosificar el combustible dentro de la corriente de aire en la relación requerida, el mismo se encuentra diseñado para responder de manera automática al cambio de necesidades del motor. Su principio de funcionamiento se centra en un tubo de Venturi el cual acelera el flujo de un fluido, generando una disminución de presión en la sección más estrecha, esta disminución de presión produce la succión del combustible de la cuba que se encuentra al lado del tubo de Venturi, tiene su salida en la garganta del Venturi como forma de tubo capilar.

Si bien los carburadores son muy utilizados (aún en la actualidad), su principal desventaja es que presentan dificultades para controlar las emisiones de gases contaminantes.



### **Fig. 1. Carburador elemental**

- b. Inyección: el sistema de inyección de combustible es un mecanismo de alimentación de los motores de combustión interna, en los que el carburador ha sido sustituido por los inyectores debido a la necesidad de reducir las emisiones generadas. Su funcionamiento consiste en unos inyectores, encargados de dosificar el combustible de manera exacta para realizar la combustión en el motor según la demanda del vehículo.

Para su funcionamiento, es necesario un sistema de control que procese todos los parámetros leídos por una serie de sensores, regulando así el tiempo y la cantidad de combustible a inyectar para poder obtener una combustión más eficiente.

Según la disposición de los inyectores, el sistema de inyección se clasifica en:

- b.1.1 Indirecta: en este caso el combustible se inyecta en el conducto de admisión donde se mezcla con el aire antes de ingresar a la cámara de combustión.
- b.1.2 Directa: este sistema pasaría a ser una versión mejorada y más compleja de la inyección indirecta donde el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión. En este caso, los inyectores tienen una mayor precisión que en el caso anterior pudiendo controlar de mejor manera la dosificación, logrando reducir las emisiones y obtener una mezcla más eficiente.

Según la cantidad de inyectores, el sistema de inyección se clasifica en:

- b.2.1 Monopunto: un solo inyector.
- b.2.2 Multipunto: más de un inyector (cada cilindro posee su propio inyector).

Los principales componentes que conforman un sistema de inyección son los siguientes:

- b.3.1 Bomba de combustible: es la encargada de elevar la presión del combustible, permitiendo su transporte desde el tanque del combustible hasta la rampa de inyectores.
- b.3.2 Inyectores de combustible: es el elemento principal del sistema de inyección y pulverización del combustible, ubicado en el colector de admisión (inyección indirecta) o en el interior de la cámara de combustión (inyección directa).
- b.3.3 Regulador de presión de combustible: mantiene y controla la presión del combustible constante en el sistema de alimentación, manteniendo constante el funcionamiento general del sistema para diferentes regímenes de trabajo. Está ubicado en general en el conducto de distribuidor o junto a la bomba de alimentación de combustible.
- b.3.4 Rampa de inyectores (en algunos casos contiene el regulador de presión de combustible): está encargado del transporte de combustible hacia los inyectores y del retorno de combustible al depósito.
- b.3.5 Circuito de admisión: es el conjunto de elementos que proveen de aire limpio al sistema, su componente principal es la mariposa de admisión, que controla el caudal de aire del sistema.
- b.3.6 Bobinas de encendido: su función es elevar la tensión con la finalidad de crear la chispa eléctrica en la bujía.

- b.3.7 Sensores de temperatura: son los encargados de medir la temperatura en diversos puntos o elementos del motor y comunicar esta información a la unidad de control electrónica. Son esenciales para la protección del motor a sobre temperaturas.
- b.3.8 Sensor de masa de aire: mide la cantidad de aire que ingresa al motor y son utilizados por la unidad de control electrónico para determinar el caudal de inyección.
- b.3.9 Sensor de posición del acelerador (TPS): su función es determinar la posición del acelerador o de la mariposa de admisión de aire al motor, comunicando esta información a la unidad de control electrónica.
- b.3.10 Sensor de posición del cigüeñal: es utilizado para determinar la posición del cigüeñal, enviando a la unidad de control electrónica una señal que le permite sincronizar tanto la inyección de combustible como la chispa de encendido en el instante correcto.
- b.3.11 Sensor de oxígeno (sonda lambda): se encuentra ubicado en el sistema de gases de escape del motor y su función es enviar una señal a la unidad de control electrónica permitiendo a la misma determinar la relación aire/combustible. Este sensor permite conocer en todo momento el estado de los gases de escape, permitiendo optimizar la combustión para reducir al mínimo las emisiones de gases contaminantes lo que a su vez mejora el rendimiento del motor.
- b.3.12 Unidad de control electrónica (ECU): es quizás la parte más importante de todo sistema de inyección, ya que se encarga de recibir las señales de todos los sensores, procesarlas y luego enviar señales de salida a los actuadores (inyectores, bobinas, mariposa electrónica, etc) optimizando el funcionamiento del motor y logrando reducir las emisiones generadas.

La importancia de nombrar estos sistemas es conocer las ventajas, desventajas y componentes de cada uno, ya que lo que se pretende lograr es identificar qué tan factible es convertir de un sistema a otro, en una primera instancia, de carburador a inyección indirecta teniendo como principal objetivo la reducción de las emisiones contaminantes.

Cabe resaltar que los contaminantes generados por los motores son: dióxidos de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos no quemados (HC), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) donde todos son nocivos en mayor o menor medida para la salud de las personas.

Según estudios, los valores normales que se miden utilizando un analizador de gases conectado al escape de un vehículo con inyección electrónica suelen ser:

$$\text{CO} < 2 \% \quad - \quad \text{O}_2 < 2\% \quad - \quad \text{CO}_2 > 12\% \quad - \quad \text{HC} < 400 \text{ ppm.} \quad [2]$$

El nitrógeno por lo general actúa como elemento inerte en el proceso de combustión, por lo tanto, si el motor no se encuentra bajo carga por lo general no forma óxidos de nitrógeno. A continuación, se presenta un análisis de cada gas en particular que se genera en un motor de combustión interna, los cuales tienen efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente, como por ejemplo:

- a. CO (monóxido de carbono): se forma como consecuencia de una combustión incompleta. Es un gas tóxico, incoloro e inoloro que puede causar asfixia, dolores de cabeza, mareos, náuseas y hasta la muerte en altas concentraciones. Los valores relativamente altos de CO dan una idea de que la mezcla se realiza con un alto grado de riqueza o combustión incompleta.
- b. CO<sub>2</sub> ( dióxido de carbono): este gas, es el producto del proceso de combustión, es uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global del planeta, no es tóxico siempre y cuando se encuentre a bajos niveles. Sin embargo, el motor obtiene un mejor desempeño cuando el CO<sub>2</sub> posee un nivel alto (15%). Por lo general, valores bajos de CO<sub>2</sub> indican una combustión mala y encendido defectuoso.
- c. HC (hidrocarburos no quemados): este compuesto es debido a los hidrocarburos que salen del motor sin quemar. Son compuestos orgánicos volátiles que pueden provocar irritación en los ojos, la nariz y la garganta, así como problemas respiratorios, alergias y cáncer . Debido a que la concentración en el gas de escape es muy pequeña para su medición se utiliza el ppm. Una medida alta de HC indica: mezcla rica (CO también da un valor alto), mala combustión de mezcla pobre, escape o aceite contaminado, el valor suele estar comprendido entre 100 y 400 ppm.
- d. O<sub>2</sub> (oxígeno): es el oxígeno del aire que sobra del proceso de combustión. Un valor alto de oxígeno puede ser consecuencia de una mezcla pobre, de combustiones que no se producen o un escape roto. En la medición, un valor del 0% significa que se agotó el oxígeno; sin embargo un valor alto de CO indica que la mezcla es rica.
- e. NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno): los óxidos de nitrógeno se simbolizan como NO<sub>x</sub>, donde “x” corresponde a la cantidad de átomos de nitrógeno. Estos óxidos son muy nocivos y la emisión de los mismos se encuentra regulada, son gases que contribuyen a la formación de smog, lluvia ácida y ozono troposférico. El ozono troposférico es un contaminante que puede dañar los pulmones, el sistema inmunológico y las plantas. Los NO<sub>x</sub> se producen cuando el nitrógeno y el oxígeno del aire reaccionan a altas temperaturas en el motor.
- f. Las partículas sólidas (PM): son pequeñas partículas de hollín, cenizas y metales que pueden penetrar en el sistema respiratorio y causar enfermedades cardiovasculares, pulmonares y cáncer. Las PM se generan por la combustión incompleta del combustible y por el desgaste de los componentes del motor.

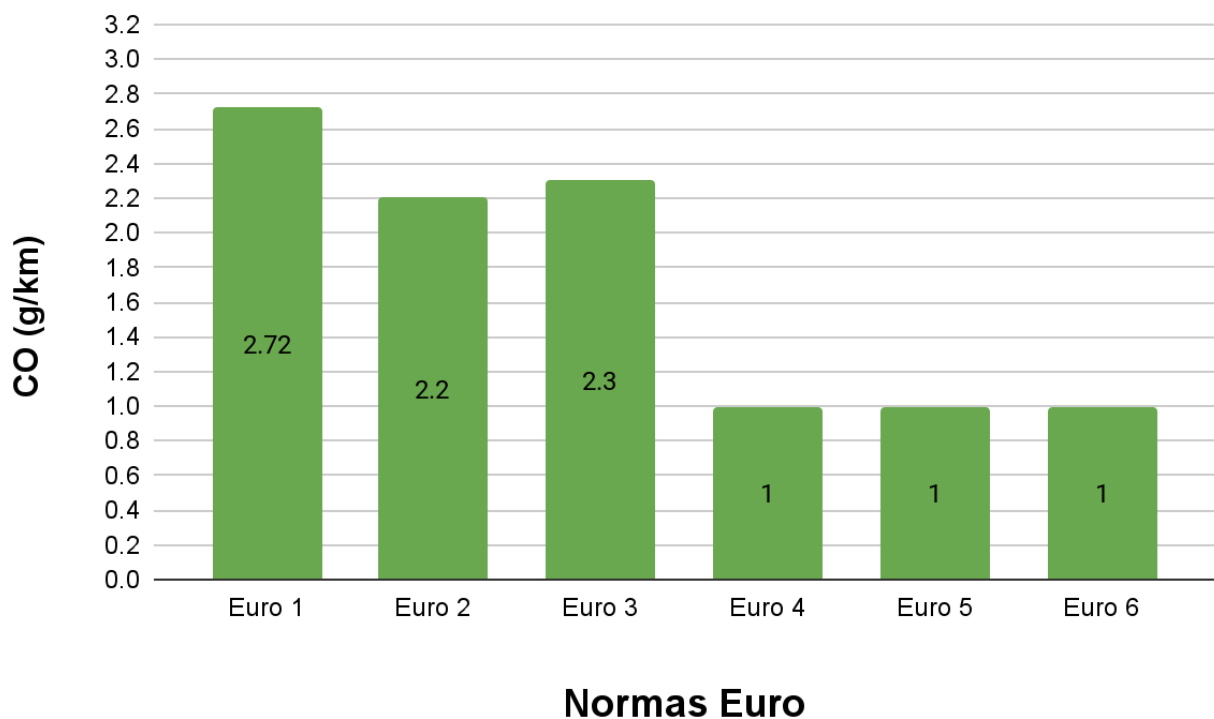
Constantemente la industria automotriz está cambiando, a medida que va pasando el tiempo han aparecido normas y regulaciones sobre la importancia del control de emisiones de los gases contaminantes que generan los motores.

Los estándares y regulaciones internacionales para motores de combustión interna tienen como objetivo controlar y reducir las emisiones producidas por los motores de combustión interna, como también promover la eficiencia y seguridad de los mismos. Una de las regulaciones destacadas es la de estándares de emisión “Euro”[3], establecidos por la Unión Europea, las cuales establecen límites para los contaminantes mencionados en el apartado anterior, CO<sub>2</sub>, CO, HC, O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. El último estándar es la Euro 6d, que impone límites más estrictos a las mediciones. La normativa mencionada anteriormente entra en vigencia en el año 2020 y busca regular principalmente la cantidad de emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por cada vehículo. Establece que los mismos pueden emitir 1,5 veces más de lo reflejado en la ficha técnica, (anteriormente esto era 2,1) quedando el límite en 80 miligramos de NO<sub>x</sub> por cada kilómetro recorrido.

Las normas y regulaciones que controlan estas emisiones exigen cada vez más la reducción de ellas, sin embargo en la República Argentina aún rige la Norma “Euro 3”, en la Tabla 1 se presentan valores límites establecidos.

Tabla 1. Valores límites de emisiones según norma Euro 3				
CO (g/km)	HC (g/km)	HC + NOx (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
2,3	0,2	-	0,15	-

En cuanto a motores de encendido por chispa, las limitaciones exigidas radican en las emisiones de CO, ya que esta es la principal variable a controlar en cuanto a reducción de emisiones se refiere, a diferencia del motor de encendido por compresión, donde el indicativo limitante radica en la emisión de NOx. En la Fig. 2 se presenta la regulación de emisiones de CO según la versión de la norma.



**Fig. 2. Emisiones máximas permitidas de CO para motores de encendido por chispa según la norma “Euro” [3]**

Pasar de un sistema de carburación a uno de inyección indirecta o directa es importante para disminuir los agentes contaminantes procedentes de un motor de combustión interna de cuatro tiempos convencional de baja cilindrada. Dado a que, el mismo contribuye a la reducción de los agentes contaminantes nombrados anteriormente, mejorando la dosificación del combustible de acuerdo con las condiciones de funcionamiento del motor, lo que reduce las emisiones en las fases de arranque, ralentí y aceleración, adaptándose a las condiciones ambientales y a las normativas vigentes sobre emisiones. El sistema de inyección electrónica se basa en la implementación de la electrónica para medir y controlar la cantidad, el momento y la forma de inyectar el combustible en los cilindros del motor.

El funcionamiento del sistema de inyección electrónica varía según el tipo de motor (gasolina o diésel) y el tipo de inyección (directa o indirecta). En general, se puede resumir en los siguientes pasos:

- a. Cuando arranca el motor, los pistones comienzan su movimiento, el sensor de rotación envía una señal a la unidad electrónica de control indicando que el motor está en marcha.
- b. Cuando el pistón baja, se produce la aspiración del aire del medio ambiente por el colector de admisión, que pasa por un medidor de flujo y una válvula de mariposa que regula la aceleración.
- c. El medidor de flujo informa a la unidad electrónica de control la cantidad de aire que ha entrado al motor. La unidad electrónica calcula entonces la cantidad óptima de combustible que debe inyectarse para obtener una mezcla adecuada con el aire.
- d. A su vez la unidad envía una señal a los inyectores para que abran durante un tiempo determinado y suministren el combustible al motor. El combustible puede inyectarse directamente en la cámara de combustión o indirectamente en el colector de admisión.
- e. El combustible se mezcla con el aire y es comprimido por el pistón. La chispa producida por la bujía (en motores gasolina) o la alta temperatura generada por la compresión (en motores diésel) provoca la ignición y la combustión del combustible.
- f. La combustión genera una expansión del gas que empuja al pistón hacia abajo, produciendo trabajo mecánico. Los gases resultantes salen por el escape cuando el pistón sube nuevamente.

La implementación del sistema de inyección electrónica requiere de un diseño adecuado tanto del hardware como del software del sistema. El hardware incluye los componentes electrónicos, mecánicos e hidráulicos necesarios para realizar las mediciones y las acciones sobre el motor. El software incluye los algoritmos y las rutinas que permiten procesar las señales, realizar los cálculos y enviar las órdenes a los actuadores. La implementación del sistema de inyección electrónica implica también una supresión o adaptación de algunas partes y piezas convencionales del motor, como por ejemplo:

- a. El carburador, que es sustituido por los inyectores y sus componentes asociados.
- b. La bomba de succión mecánica de combustible, que es reemplazada por una bomba eléctrica.
- c. El distribuidor de encendido, que es eliminado por el control electrónico del encendido.
- d. El filtro de aire, que debe ser modificado para permitir el paso del medidor de flujo.
- e. El colector de admisión, que debe ser diseñado para alojar los inyectores (inyección indirecta) y evitar la formación de depósitos de combustible.

Según ensayos realizados por otros investigadores [4], al adaptar un motor de carburador a inyección es posible reducir alrededor de un 68% el CO, 85% los HC, 63% de NO y un 20% el consumo del combustible. Además, como consecuencia de la adaptación, el motor puede aumentar su potencia máxima en un 156% y el torque máximo en un 135%, es decir, un incremento superior al doble de las prestaciones base. En ralentí la emisión de HC puede descender un 5,78% y la del CO un 43%, mientras que a 2400 rpm la emisión del HC un 45% y la del CO un 81%. El consumo de combustible dado en kilómetros recorridos por litros consumidos aumenta, es decir que, con la misma cantidad de combustible se logra recorrer más kilómetros.

En un 90 % de los casos existe una diferencia entre los gases emitidos por el motor a carburador en comparación con los emitidos por el motor a inyección electrónica programable, mediante investigaciones citadas se logra comprobar que las emisiones de gases contaminantes disminuyen notablemente, indicando que se encuentra trabajando dentro de los valores óptimos, así como también el aumento de dióxido de carbono con una media de 15,09 %, indicando que la eficiencia en la combustión es excelente.

### **3. Conclusiones y discusiones**

Los sistemas de inyección electrónica han permitido la implementación de controles más sofisticados, como la gestión del motor, lo cual ha contribuido como se enfatiza en numerosas ocasiones a la reducción de emisiones, el cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas y cómo consecuencia a esto un aumento en las prestaciones del motor, como lo son su rendimiento y potencia. Además brinda gran capacidad y flexibilidad, contribuyendo a la reducción de la utilización de los combustibles fósiles.

Basado en esto, se invita a futuros investigadores interesados en esta problemática a implementar las modificaciones que propone el presente artículo a motores de diferentes cilindradas realizando el correspondiente análisis de las emisiones producidas por el mismo, con el fin de cuantificar la mejora obtenida.

### **4. Referencias**

- [1] Edward F. Obert, "Motores de combustión Interna", Vigésima quinta reimpresión, México 1999.
- [2] Fernando Augeri, "Análisis de los gases de escape de los motores de combustión interna", Enero 2011.
- [3] Unión Europea, "REGLAMENTO (CE) No 715/2007 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos", Junio 2007.
- [4] Steeven Efraín Rodríguez Tapia & William Germánico Plasencia Caiza, "Adaptación de un motor de combustión interna a carburador a un sistema de inyección y verificación del torque y potencia en un dinamómetro", 2021. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1TFNi-D27nvOG69bv4ZMOyEPRTsekI3WJ/view?usp=sharing>
- [5] Danilo Fabián Cajías Chávez, "Adaptación de un motor de cuatro tiempos monocilíndrico a carburador a un sistema de inyección electrónica programable y comprobación mediante un análisis comparativo de emisiones a una relación estequiométrica ideal", 2021. Disponible en: [https://drive.google.com/file/d/1\\_2NBpjHILnMBCquKIFTr56CYE9hW4oC-/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1_2NBpjHILnMBCquKIFTr56CYE9hW4oC-/view?usp=sharing)



- [6] Diego Fernando Armas Vásquez & Alberto Esteban Vallejo Delgado, “Implementación de un sistema de inyección multipunto programable en un vehículo a carburador”, Noviembre 2013. Disponible en:  
[https://drive.google.com/file/d/1Sm3uOC5IUtBQJHQBEMmZer1b\\_lgRhwxU/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1Sm3uOC5IUtBQJHQBEMmZer1b_lgRhwxU/view?usp=sharing)