



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Incorporación de un sistema  
ultrasónico en un motor de  
combustión interna**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero mecánico**

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

Aldo Ramón Gayosso Cruz

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Milton Carlos Álvarez Sánchez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



# Contenido

Agradecimientos.....	v
Introducción.....	vii
Capítulo I_Combustión y Motor de combustión interna.....	1
1.1 Motor de combustión interna.....	1
1.2 Combustión.....	2
1.2.1 Aire .....	2
1.2.2 Combustibles .....	3
1.3 Transformación de la energía .....	4
1.3.1 Transformación de energía química en trabajo mecánico .....	4
1.3.2 Ciclo Otto .....	5
1.4 Motores de combustión interna.....	6
1.4.1 Fases de trabajo teórico .....	6
1.4.2 Ciclo de trabajo práctico .....	8
1.4.3 Diagrama práctico.....	11
1.5 contaminación ambiental .....	12
Capítulo 2_Sistemas de inyección .....	16
2.1 Componentes del motor de combustión interna.....	16
2.2 Clasificación de los sistemas de inyección .....	17
2.3 El carburador.....	18
2.4 La inyección indirecta mecánica .....	24
2.5 La inyección electrónica monopunto .....	27
2.6 La inyección indirecta electrónica multipunto .....	29
2.7 La inyección directa electrónica .....	32
Capítulo 3_Sistema de inyección indirecta de mezclado por ultrasonido .....	36
3.1 Desarrollo del uso de transductores.....	36
3.2 Cristales ultrasónicos .....	37
3.3 Cristal sumergible. ....	37
3.4 Cristal con micro poros .....	39

3.5 Antecedentes .....	39
Capítulo 4_Implementación, diseño y análisis del prototipo de un sistema de inyección por ultrasonido.....	47
4.1 Viabilidad del uso de transductores ultrasónicos .....	47
4.2 Banco de pruebas .....	48
4.3 Prototipos y pruebas .....	53
4.4 Resultados preliminares.....	59
4.5 Resultados finales.....	61
Capítulo 5_Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.....	70
5.1 Conclusiones.....	70
5.2 Trabajos futuros .....	72
Bibliografía .....	76
Anexos .....	79
Referencias.....	79
Figuras .....	82
Tablas .....	87
Anexo de figuras .....	88

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) la cual me brindo todo el conocimiento necesario en mis estudios y en donde tuve la oportunidad de conocer diferentes personas las cuales fueron clave en mi vida.

Agradezco a mi familia que me ha apoyado desde los inicios de mis estudios, a mis padres Rocío y Ramón a mi hermana Karen que siempre me dio consejos y apoyo los cuales me ayudaron en diversos momentos que más lo necesite.

A mis abuelitos Flora y Miguel así como Avelina que me apoyaron y estuvieron en los momentos importantes en mi vida y los que me impulsaron a cumplir mis metas con sus ánimos así como toda mi extensa familia por su cariño y ayuda.

A mi asesor, el Dr. Milton Carlos Álvarez cual me dio la oportunidad de trabajar bajo su tutoría y apoyando en todo lo necesario para la realización del proyecto así como mis profesores y al equipo de trabajo UNICE por el apoyo brindado y las asesorías las cuales fueron importantes para que el proyecto se llevara a cabo entre ellos agradecimientos especiales al Dr. Rogelio, M. I. Francisco y Dr. William.

Al proyecto PAPIIT IG101018 "Simulación de la combustión en motores de combustión interna usando biocombustibles y medición de la masa de contaminantes, a fin de estructurar un inventario de emisiones en el Valle de México" por el apoyo brindado para la compra de material así como al proyecto al proyecto PAPIME PE108418 "Desarrollo de equipo y manuales para prácticas de laboratorio de motores de combustión interna" por la beca recibida que permitió el satisfactorio desarrollo del presente proyecto.

A todos mis amigos y compañeros por el tiempo compartido, consejos dados y experiencias vividas, desde los que conocí en los salones de clase hasta los que tuvo la oportunidad de conocer en otros lugares que me acompañaron en esta etapa pero sobre todo por el tiempo que compartimos GRACIAS a Edgar, Mario, Enrique, Adrián y Hugo con los que compartí momentos inolvidables con Leticia, Verónica, Sandra, Bryan y Monserrat con los que me divertí muchas veces y a Andrés, Perla, Fátima grandes compañeros y amigos entre otros que si mencionara a cada uno nunca terminaría.

A la Lic. Josefina Elizabeth Plata García de Unidad de Servicios de Información del Instituto de Ingeniería de la UNAM por su apoyo en la búsqueda de información bibliográfica.

A la oportunidad brindada por parte del Dr. Savage para participar en el proyecto PAPIIT RL100116 “Diseño de microprocesadores”

Para terminar mencionare que aunque faltaron personas que me apoyaron mucho solo puedo decir que en este paso de la vida uno nunca se encuentra solo y lo que uno logra es debido a que otros pusieron sus hombros para que tu llegaras a donde estas hoy en día, así que estén presentes o no gracias a toda la gente que me apoyo.

## Introducción

Uno de los problemas más importantes en la actualidad para la humanidad es la contaminación del aire ocasionada principalmente por la actividad humana, el motivo del problema es la liberación de diversos “contaminantes criterio” (ProAire ZMVM, 2017). de los cuales se encuentran el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), partículas o material particulado (MP), Plomo (Pb), Monóxido de Carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), Compuestos Orgánicos Totales (COT) y ozono (O<sub>3</sub>), el problema es relevante debido a que la contaminación del aire es responsable del 1.4 % de todas las muertes prematuras a nivel mundial y del 0.8% de los años de vida perdidos con gozo de plena salud (ProAire ZMVM, 2017).

Alrededor del mundo se han establecido estrategias para minimizar esta problemática. En México se han ejecutado medidas de control de emisiones y políticas para mejorar la calidad del aire, el área donde más se ha trabajado es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) debido a que es la zona con mayor concentración poblacional, la ZMVM aunque con algunas variantes contempla principalmente 16 delegaciones de la Ciudad de México y 59 municipios del Estado de México, un ejemplo de las medidas de control de emisiones que se han aplicado es el “Programa Hoy No Circula” el cual inicio con ese nombre el año de 1989 (IECM, 2018).

Así como los programas han promovido medidas, también han iniciado normas las cuales promueven que los sectores de contaminación limiten sus emisiones; sectores como el industrial, comercial y el de transporte dentro de los más relevantes. Las emisiones debidas al transporte o emitidas por fuentes móviles representan alrededor del 60%, debido a su gran aporte se han planteado diferentes propuestas y desarrollado nuevas tecnologías para reducir este tipo de contaminantes producidos principalmente por la combustión.

Dentro de este proyecto se plantea aprovechar la atomización ultrasónica como alternativa tecnológica en la minimización de emisiones y reducción en el consumo de combustibles. Para ello se desarrollaron diversos prototipos comprobando su viabilidad aplicativa en motores de combustión interna. Para este proyecto se emplearon diversas técnicas de manufactura y materiales, además de una variada instrumentación y metodologías.





## Capítulo I

### Combustión y Motor de combustión interna

En este capítulo se tratara al motor de combustión interna así como los fenómenos principales que envuelven el proceso de la combustión, transformación necesaria para su funcionamiento y finaliza con las consecuencias del uso del motor.

#### 1.1 Motor de combustión interna

El motor de combustión interna de encendido provocado, fue diseñado por el francés Etienne Lenoir en 1863, este motor consumía gas de alumbrado y apenas podía utilizar una pequeña cantidad de la energía que se producía. Dicho motor fue mejorado por el alemán Nikolaus Otto. (UAM) Quien realizó una modificación del motor en el aparato eléctrico de ignición y la fluidez del combustible así como empleaba aire atmosférico, lo que permitía un mejor control de la compresión. A través del tiempo varias personas han modificado los sistemas del motor de combustión interna, esto debido a novedosos avances tecnológicos. Uno de los grandes avances ha sido la inclusión de dispositivos electrónicos, los cuales han mejorado el control de los diversos sistemas de la rama automotriz, incorporando sensores más precisos, con alta velocidad de obtención de datos y con mejor capacidad. En efecto, esos avances representan una gran mejora en los sistemas de control de los vehículos automotores. Una muestra de ello, es el sistema de inyección, que pasó de ser un sistema totalmente mecánico a uno electromecánico, lo cual constituye una gran ventaja en el control de la admisión de gasolina y aire, esto ha hecho posible incrementar la eficiencia en el proceso de la combustión.

En general, la combustión es un fenómeno por medio del cual un vehículo genera la energía necesaria para su movimiento. Por ese motivo, es importante que se realice de manera eficiente, mediante el diseño de dispositivos que permitan controlar los parámetros que afectan a este fenómeno físico. Entre los parámetros que deben considerarse tenemos la temperatura a la que entra el aire, el calentamiento del motor y la señal de revoluciones, por mencionar sólo algunos de ellos.

## 1.2 Combustión

La combustión es un proceso termoquímico, producto de tres componentes básicos: el combustible, la energía de activación y el comburente. Todos estos elementos son muy importantes, ya que al combinarse generan una cantidad de energía en forma de calor.

En la actualidad se han desarrollado muchos combustibles: por un lado, la gasolina, el gas natural, el etanol y el metanol, para motores Otto; y por otro, el gasoil, para motores Diésel. En cuanto a la energía de activación, ésta se presenta, por lo general, de dos formas: la primera por medio de un encendido por chispa comúnmente generado por una bujía, y la segunda, por un aumento de presión que incrementa la temperatura del aire. Como tercer componente para la combustión se emplea el oxígeno como comburente universal debido a su gran disponibilidad en el aire de la atmósfera terrestre.

### 1.2.1 Aire

El aire —una mezcla de diversos gases— es uno de los elementos principales de la combustión por contener oxígeno en su composición. Es importante señalar que no es en su mayoría oxígeno, en específico bajo una atmósfera estándar está compuesto por 0,20947 moles de  $O_2$ ; 0,78086 moles de  $N_2$ ; 0,00934 moles de Ar; 0,00033 moles de  $CO_2$  además este tiene un peso molecular de 28,966. Estos valores son importantes en los vehículos contemporáneos ya que con ellos se realizan los cálculos pertinentes dentro de la computadora del motor para regular el acceso de aire o combustible.

Para que la combustión se efectúe de forma eficiente deben presentarse ciertas condiciones de temperatura y presión; adicionalmente, debe existir una buena mezcla entre combustible y comburente. Por lo anterior, es necesario tener un control tanto del aire como del combustible suministrado con la finalidad de tener la relación óptima entre los dos componentes.

Al quemarse el combustible en específico la gasolina (motores Otto) es necesario una combinación de un gramo por cada 14.7 gramos de aire para una combustión completa, en términos de volumen es equivalente a 1 litro de gasolina para aproximadamente 10000 litros de aire,  $\lambda$  (ecuación 1 (Salinas, 2007)) es un valor que se obtiene de la relación de la cantidad de aire que aspira el motor y la cantidad de aire teórico necesario, existe un déficit de aire si  $\lambda$  es menor que 1 y se denomina como mezcla rica, cuando hay un exceso de aire para valores de  $\lambda$  mayores que 1 y se denomina mezcla pobre. El motor ofrece la máxima potencia cuando la mezcla es ligeramente rica, con déficit de aire del 10% y el mínimo consumo se obtiene cuando trabaja con mezclas ligeramente pobres, con un exceso de aire del 5% con respecto al aire teórico sin embargo las condiciones de trabajo del catalizador exigen que la mezcla sea de  $\lambda=1$ .

$$\lambda = \frac{A_{\text{aspirado}}}{A_{\text{teorico}}}$$

*Ecuación 1.*

### 1.2.2 Combustibles

Son muchas las propiedades para que un combustible pueda ser el ideal para un tipo de motor en específico, sin embargo en los motores de combustión interna por sus características y por la forma de obtención, sólo unos cuantos son los combustibles que suelen ser utilizados. Principalmente la forma de obtención del combustible es mediante la destilación fraccionaria del petróleo en la cual se obtienen diferentes compuestos y esto depende de la altura de destilación, para los automóviles el estrato de donde se obtiene su combustible es en donde la temperatura alcanza aproximadamente 140°C, sin embargo al no obtener lo suficiente, el petróleo es sometido a procesos de craqueo y de reformado. El resultado de los procesos es la obtención de combustible conocido como gasolina, esta debe tener ciertas características para ser utilizada, las más importantes son:

- **Poder antidetonante:** La gasolina necesita condiciones específicas para que comience su combustión, entre las condiciones que favorecen la reacción se encuentra el aumento en la presión, dentro de la cámara de combustión la mezcla es sometida a una compresión sin embargo se requiere que la gasolina no auto inflame hasta que la chispa de la bujía salte, esto para que se inflame en el momento preciso, a la capacidad que tiene la gasolina de ser comprimida sin auto inflamarse se denomina poder antidetonante. El poder antidetonante en la gasolina se logra con una mezcla de n-heptano que es 100% detonante, y de isooctano que es 0% detonante. El índice octano indica la proporción de isooctano en la mezcla con n-heptano. Actualmente las gasolinas más comercializadas son de 95 y 98 octanos.
- **Volatilidad:** se traduce como la capacidad de la gasolina de evaporarse a bajas temperaturas sin embargo debe tener una volatilidad que homogenice la mezcla en la cámara de combustión pero que no se evapore fácilmente en el sistema de inyección ya que tiene como consecuencia la percolación.
- **Densidad:** esta propiedad es un factor importante a considerar debido a que entre mayor es su densidad mayor es la cantidad de energía que el combustible contiene y es liberada. Ejemplos de la diferencia de densidades son diésel y gasolina o la gasolina y el etanol siendo en los dos casos más densos los primeros respectivamente y por lo tanto el que tiene mayor

rendimiento. Esta suele medirse en  $\frac{Kg}{m^3}$ . La densidad de la gasolina normalmente está comprendida entre 720 y 775  $\frac{Kg}{m^3}$  a 15°C (González, 2015).

- **Pureza:** la propiedad es un factor a considerar porque al tener una pureza óptima reduce la formación de depósitos además se evita el contenido de azufre ya que tiene repercusiones importantes en la salud y está limitado en las normas.
- **Poder calorífico:** se define como poder calorífico de un combustible a la cantidad de energía o calor, resultado de su combustión, es la máxima energía que se puede obtener de un combustible a presión atmosférica, por cierta unidad de masa o volumen de dicho combustible. Esta energía es obtenida de la energía liberada por la separación de los enlaces menos la energía que se necesitó para formar los nuevos enlaces. Habitualmente el poder calorífico para la gasolina es de 42,000  $\frac{KJ}{Kg}$  (González, 2015). Los poderes caloríficos se pueden distinguir en dos tipos debido al contenido en cierto grado de humedad en su composición; se tiene como resultado un poder calorífico del combustible inferior (PCI) o un poder calorífico del combustible superior (PCS).

### 1.3 Transformación de la energía

El proceso de combustión constituye la primera etapa para la obtención de trabajo útil. Antes de este proceso, la energía almacenada es química, pues al fraccionarse los enlaces y volverse a unir se libera energía en forma de calor. Este flujo calorífico se puede transformar en otra forma de energía. En este caso, lo que se pretende obtener es trabajo mecánico; sin embargo, como existen pérdidas de calor es imposible convertir toda esa energía en su totalidad.

#### 1.3.1 Transformación de energía química en trabajo mecánico

La transformación de la energía química no es perfecta, ya que además de transformarse en calor también se transforma en energía luminosa; asimismo, como los gases poseen una masa, presentan a su vez una inercia, hecho que se refleja en la aplicación de energía en su movimiento para hacer que los gases se muevan a gran velocidad. En general, la energía resultante es transformada continuamente en un ciclo termodinámico por una máquina térmica.

Una máquina térmica es un sistema cerrado que opera continuamente, cuyo propósito es entregar energía en forma de trabajo mecánico útil, obtenido de una diferencia térmica entre un sumidero y una fuente. Las fuentes pueden ser

fuentes de calor generadas, como los combustibles o las fuentes naturales derivadas de fuentes geotérmicas. Los sumideros, por su parte, son lugares de baja temperatura, en donde la energía puede ser depositada.

Al operar continuamente en ciclos transportando energía de un lugar a otro, las máquinas térmicas son capaces de generar trabajo: un trabajo neto, resultado de un proceso donde, en un momento, la sustancia o fluido realiza trabajo y, en otro, se le aplica trabajo. La eficiencia térmica es dependiente en gran parte de la manera de realizarse cada uno de los procesos dentro del ciclo. El ciclo termodinámico con mejor rendimiento y más básico es el ciclo de Carnot, aunque se trata sólo de un caso teórico ya que no hay ningún sistema que pueda operar bajo estas condiciones. Básicamente se compone por una expansión isotérmica, una expansión adiabática, una compresión isotérmica y una compresión adiabática.

### 1.3.2 Ciclo Otto

Por otro lado, está el ciclo Otto que recibe el nombre en honor a Nikolaus A. Otto, el ciclo se considera el ideal para las máquinas de encendido por chispa, las máquinas de encendido por chispa pueden ser descritas por cuatro procesos. Los procesos que se producen en el ciclo son: compresión isotrópica, aportación de calor a volumen constante, expansión isotrópica y extracción de calor a volumen constante (Çengel & Boles, 2009).

En el ciclo ideal el trabajo se transforma desde un embolo el cual contiene aire, para desplazar el embolo y aumentar el volumen ingresa calor, este entra de manera instantánea y sin pérdidas, seguido del ingreso ocurre una expansión del aire y termina en un aumento máximo, a continuación al aire se le extrae el calor suministrado para regresarlo a su estado original este proceso también es instantáneo como en su ingreso, como resultado el aire se contrae y el embolo se mueve, listo para empezar el ciclo nuevamente otra idealización que se toma en cuenta es que la temperatura de entrada es igual a la temperatura de salida. En la realidad las máquinas de encendido por chispa no pueden lograr este ciclo ideal y en general funcionan en ciclos abiertos.

Algunos de los dispositivos que han funcionado con encendido de chispa son el motor Wankel y los motores de combustión interna recíprocos. La diferencia entre ambos es que el primero es rotativo y el segundo su movimiento es rectilíneo y alternativo, sin embargo el segundo ha tenido más éxito, esto porque los motores rotativos presentaron problemas que fueron: la estanqueidad y la fiabilidad a largo plazo (Salinas, 2007), actualmente los problemas en los motores Wankel son mayores ya que las normas para mantener en el límite las emisiones son muy estrictas y no logran alcanzar las emisiones permitidas. Dentro de los motores de combustión interna recíprocos están los de cuatro tiempos y dos tiempos.

## 1.4 Motores de combustión interna

Desde la aparición de los motores de combustión interna han cambiado agregando o removiendo componentes en su construcción pero los principios físicos y químicos siguen siendo los mismos, el motor de combustión interna transforma la energía calorífica en trabajo mecánico y la forma de analizarlo son las 4 fases de trabajo teórico.

### 1.4.1 Fases de trabajo teórico

Los motores de combustión interna realizan un ciclo el cual consta de 4 fases denominadas admisión, compresión, explosión y escape en donde en cada una de ellas el cilindro realiza un desplazamiento, mientras que el cigüeñal realiza dos giros completos y el árbol de levas la mitad.

Admisión: en este desplazamiento el pistón desciende desde el PMS (punto muerto superior) al PMI (punto muerto inferior) como resultado se obtiene un aumento en el volumen y por lo tanto una depresión. Al tener estas condiciones y tener la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada la mezcla entra consumiendo parte del trabajo (Figura 1).

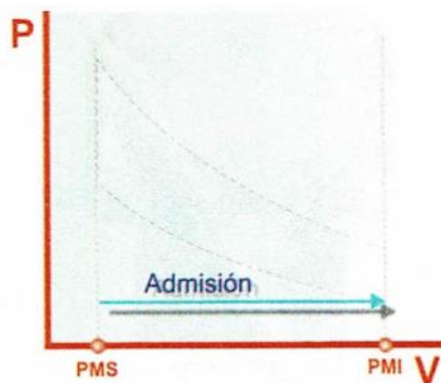


Figura 1. Primer tiempo: admisión [1].

Compresión: durante esta fase el pistón asciende del PMI al PMS disminuyendo su volumen y aumentando la presión debido a que las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas. La mezcla se comprime hasta alcanzar un volumen entre 9 y 11 veces más pequeño que el inicial (figura 2), por lo que aumenta en consecuencia su temperatura; en esta fase también se consume energía.

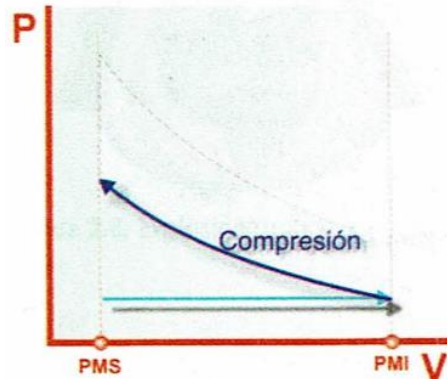


Figura 2. Segundo tiempo: compresión [2].

Explosión: inicia en el PMS y termina hasta el PMI. El proceso comienza con las válvulas cerradas y el sistema de encendido manda la señal para que la bujía genere una chispa la cual provoca la combustión de la mezcla. Al presentarse la combustión la presión aumenta lo que provoca el descenso del pistón y por consiguiente la entrega de energía y obtención de trabajo (figura 3).

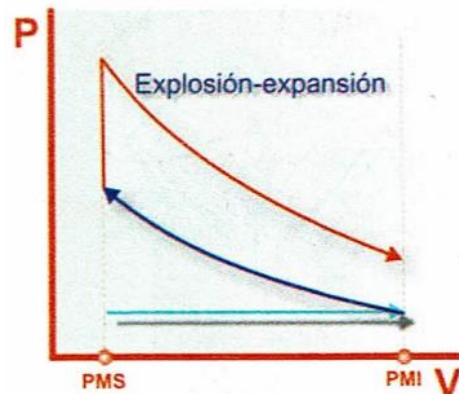


Figura 3. Tercer tiempo: explosión [3].

Escape: el ciclo culmina y el pistón se mueve desde el PMI al PMS permaneciendo la válvula de admisión cerrada pero la válvula de escape abierta resultando en una evacuación de los gases hacia el exterior de la cámara de combustión (figura 4).



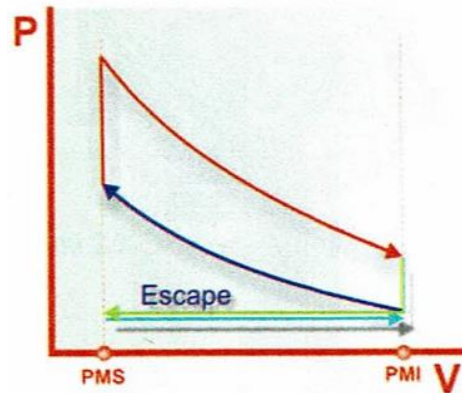


Figura 4. Cuarto tiempo: escape [4].

### 1.4.2 Ciclo de trabajo práctico

El proceso dentro del motor puede ser idealizado bajo consideraciones físicas sin embargo el proceso real es diferente ya que es imposible realizar el ciclo bajo las mismas consideraciones entre ellas, el tiempo de aberturas de válvulas o de salto de chispa, pérdidas de calor a través de las paredes del motor, el tiempo que tarda en realizarse la combustión no es instantánea, la mezcla y los gases de escape tardan en entrar y salir debido a que la inercia afecta la velocidad con la que se desplazan, etc.

**Admisión:** en esta fase la válvula de admisión se abre cuando el pistón está ascendiendo dentro de la fase de escape, el resultado de este movimiento es que al expulsar los gases a alta velocidad superior a los 350 km/h por la válvula de escape generando succión debida a la gran inercia, de esta forma, la mezcla está ya en movimiento cuando el pistón inicia el desplazamiento hacia el PMI. Después de expulsar los gases se genera depresión dentro del cilindro, debido al progresivo aumento de volumen y que tiene un valor aproximado de 200 pa. esto se termina al llenar el cilindro por lo que se cierra la válvula de admisión.

Debido a que el llenado depende de la inercia de la entrada y salida de aire, esto es considerado en el diseño del colector de admisión para que en un número de revoluciones bajo se tenga un movimiento rápido y esto se logra con conductos estrechos y largos así como en un elevado número de revoluciones se tenga conductos amplios y estrechos. Además de esto es posible ver otras consideraciones como aumentar el número de válvulas, incrementar el recorrido de éstas o incorporar un sistema de distribución variable. Pero a pesar de todo, difícilmente el llenado de la cámara supera el 80% (figura 5). Esta cantidad solo aumenta recurriendo a soluciones que impulsan el aire con una sobrepresión, como el turbocompresor rotativo, etc.



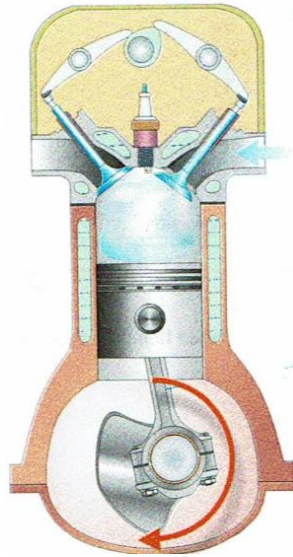


Figura 5. Admisión [5].

Compresión: al ascender el pistón a el PMS las válvulas permanecen cerradas provocando que la presión aumente y por lo tanto la temperatura. El cambio de temperatura y el diseño de la cámara de compresión promueven la volatilización de la gasolina y con ello la mejora en la homogenización de la mezcla. La diferencia del volumen inicial y final se denomina como relación de compresión y esta es limitada por el autoencendido de la mezcla (figura 6).

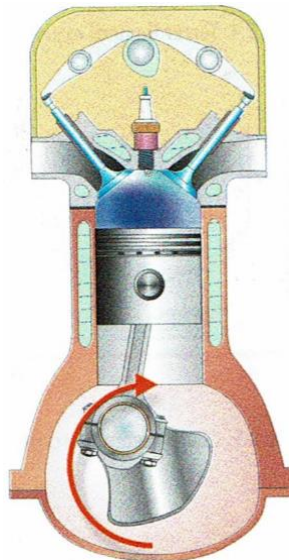


Figura 6. Compresión [6].

Explosión: la fase comienza con la generación de la chispa en la bujía que genera una explosión, esta explosión produce un aumento superior de 2000 °C y una presión que puede superar los 6 Mpa. El cambio con respecto al ciclo teórico

es que la chispa es generada con anticipación al ascenso del pistón al PMS, esto es debido a que la explosión no es instantánea ya que depende de diversos factores y en general el avance del encendido se define procurando que este tiempo coincida con el que el pistón tarda en alcanzar el PMS para después iniciar el descenso (figura 7), al realizarse de esta manera existe una mayor presión posible en la cámara de compresión.

La razón de esta sincronización de tiempos en el avance de encendido con respecto al arribe del pistón al PMS es que a partir de 3000 r.p.m., el pistón y el frente de llama avanzan a velocidades similares, además durante los 2 milisegundos de tiempo promedio en que la explosión sucede el pistón ya ha realizado buena parte de su recorrido. El mayor volumen de la cámara en ese momento impide presiones elevadas, y sin éstas, la transformación de calor en trabajo es menor que la posible. De hecho, la potencia que genera el motor depende de la presión media sobre el pistón y las revoluciones a las que este gira.

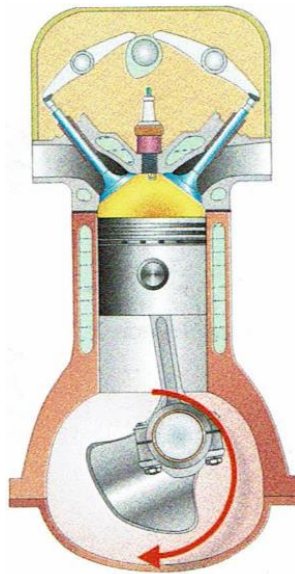


Figura 7. Explosión [7].

Escape: en el descenso del pistón, en la fase de explosión hay una etapa en donde la presión es alta debido a la temperatura alcanzada sin embargo después de esta etapa existe una segunda etapa en donde la presión efectiva aporta poco trabajo, es por esto que antes que el pistón llegue a el PMI la válvula de escape se abra. La presión en la segunda etapa se utiliza para la contrapresión que obstaculiza la salida de los gases y esta contrapresión es debida a aditamentos como lo son silenciadores, catalizadores, filtros de partículas entre otros (figura 8). En el diseño de estos componentes, además de tener en cuenta su principal

misión, se procura que el valor de la contrapresión sea de aproximadamente de 200 Hpa y este dentro de determinados márgenes (Salinas, 2007).

La válvula de escape se mantiene abierta después de que el pistón alcanza el PMS, esto tiene el propósito de aprovechar la inercia de los gases de escape y ayudar a succionar la nueva mezcla, a este periodo de tiempo en donde las dos válvulas se mantienen abiertas se denomina traslape valvular. Como consecuencia se consigue una mejor refrigeración y un llenado más completo de la cámara de compresión, lo que repercute directamente en el rendimiento del motor.

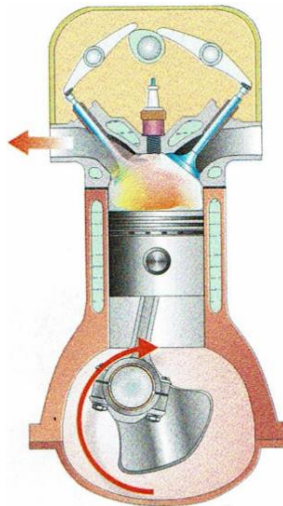


Figura 8. Escape [8].

### 1.4.3 Diagrama práctico

Al superponer el diagrama del ciclo teórico contra el diagrama del ciclo práctico, estos presentan diferencias notables, debido principalmente a que en el ciclo teórico los cambios son instantáneos mientras que en el práctico la explosión y el escape requieren tiempo para llevarse a cabo, estas diferencias de áreas se interpretan como pérdidas de rendimiento provocadas por distintos factores, en la [figura 9](#) se puede observar la gráfica del ciclo teórico y práctico así como los motivos de cada diferencia.

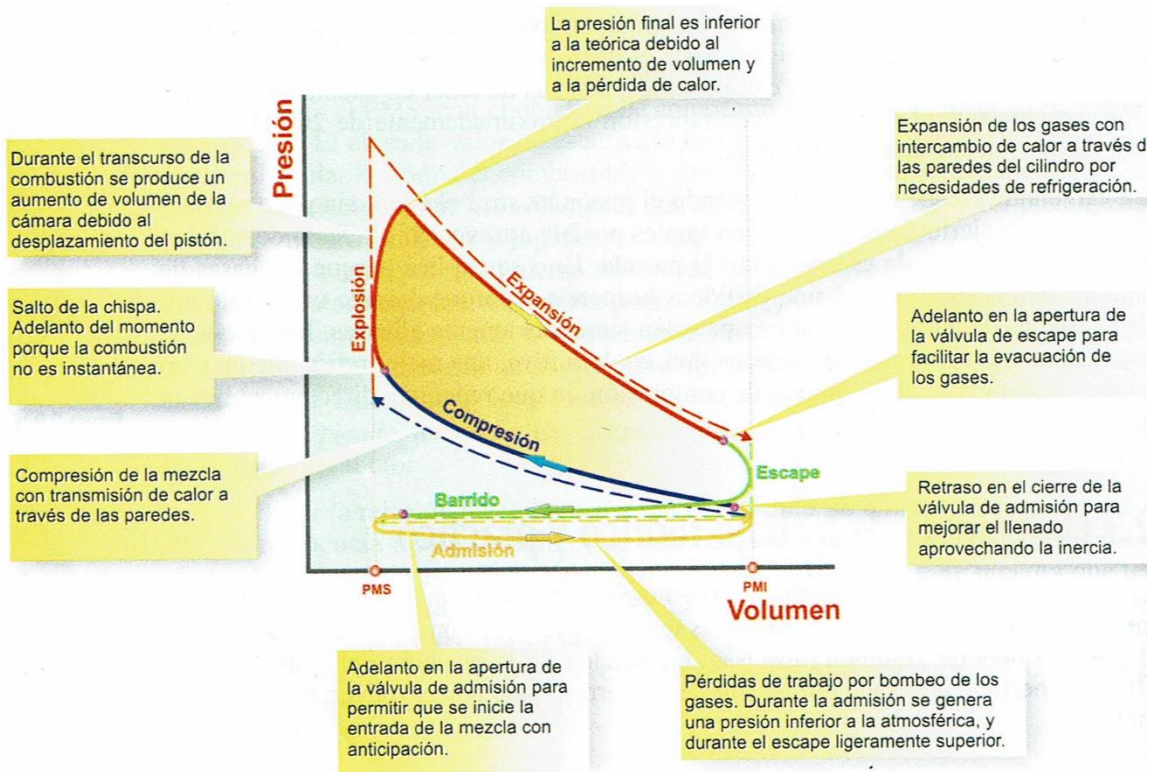


Figura 9. Superposición del ciclo práctico Otto [9].

### 1.5 contaminación ambiental













La contaminación es la presencia en el medio ambiente de sustancias o elementos tóxicos que son perjudiciales para el hombre y los ecosistemas. De las diferentes formas en que se presenta la contaminación en el aire es una de ellas y uno de los principales problemas principalmente en las ciudades o zonas urbanas del mundo, la forma en que se mide ha cambiado con el tiempo y actualmente se puede dividir los contaminantes principalmente en tres grupos mostrados en la figura 10 los cuales son contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero.

Contaminantes criterio	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV y NH <sub>3</sub>
Tóxicos	Benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, otros
CEI	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFC y Carbono Negro

Figura 10. Tipos de contaminantes [10].

En México se ha estudiado el efecto en la población y se estima que en el 2015 hubo cerca de 29,000 muertes y casi 558,000 DALY (años de vida ajustados por discapacidad) atribuibles a la mala calidad del aire (INECC, 2017). En México la zona con mayores problemas de contaminación en el aire se encuentra en la ZMVM esto como consecuencia de la intensa actividad económica y la dinámica urbana y poblacional de esta región, en la zona existen sectores causantes de contaminación entre los que se encuentran: el transporte, la industria, comercios y servicios, doméstica y misceláneos sin embargo gran parte de la contaminación emitida la produce el transporte ya que se necesita quemar combustible y solo para el año 2016 el transporte demandó 234 PJ lo que equivalió al 61% de la energía de ese año, en la [tabla 1](#) se puede ver qué tipo y la cantidad de cada parque vehicular que compone al sector transporte en la CDMX y que combustible consume cada uno, en los datos se observa como la gran parte de los vehículos usan gasolina y son de uso particular.

**Tabla 1**  
**Flota vehicular de la CDMX 2016**

	CDMX 2016	%	GASOLINA	DIESEL	GAS LP	GAS NATURAL
	<b>2,322,423</b>	<b>Contribución</b>	<b>2,160,227</b> 93.02%	<b>148,584</b> 6.40%	<b>13,239</b> 0.56%	<b>373</b> 0.02%
 Automóviles	1,302,591	56.09%	1,300,350	2,100	15	126
 SUV	351,180	15.12%	346,407	4,725	40	8
 Taxis	133,956	5.77%	133,649	260	31	16
 Combis	7,989	0.34%	5,856	2,055	78	N/A
 Microbuses	14,019	0.60%	1,178	98	12,592	151
 Pick Up	73,657	3.17%	72,236	1,292	129	N/A
 Vehículos ≤ 3.8 t	13,576	0.58%	9,057	4,462	57	N/A
 Tractocamiones	67,386	2.90%	N/A	67,386	N/A	N/A
 Autobuses	38,465	1.66%	137	38,220	36	72
 Vehículos > 3.8 t	51,578	2.22%	23,916	27,401	261	N/A
 Motocicletas	267,441	11.52%	267,441	N/A	N/A	N/A
 Metrobús	585	0.03%	N/A	585	N/A	N/A

En esta tabla es posible observar la cantidad de cada sector del transporte en la CDMX <sup>[7]</sup>.

De lo anterior mencionado se deduce que el problema de la contaminación del aire es de suma importancia y existe una relación importante con la contaminación emitida por el transporte ya que tomando datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) del parque vehicular para el Estado de México junto con la CDMX y calculando una tendencia del parque total este tiende a aumentar de forma considerable para los siguientes años, estos datos pueden verse en la [figura 11](#) (INEGI, 2019) en dónde se proyecta una gráfica con tendencia a 3 años.

En México se han aplicado diferentes medidas para controlar las emisiones, para la ZMVM con el fin de proteger la salud de los habitantes, la secretaria de salubridad y asistencia publicó por primera vez los criterios de la calidad del aire en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1982. Los trabajos de monitoreo se contaban desde 1971 sin embargo no fue hasta 1986 cuando se instaló la Red Automática de Monitoreo Atmosférico para tener un registro sistemático de la contaminación del aire en la ZMVM (ProAire ZMVM 2011-2020). la red se utilizó para futuros programas como el “Programa de Contingencias Ambientales” en el año 1989 el cual se modificó y dio paso a el “programa hoy no circula” en 1989, el primer programa formal contra la contaminación del aire se denominó “Programa Interna Contra la Contaminación Atmosférica” (PICCA) el cual inicio en 1990.

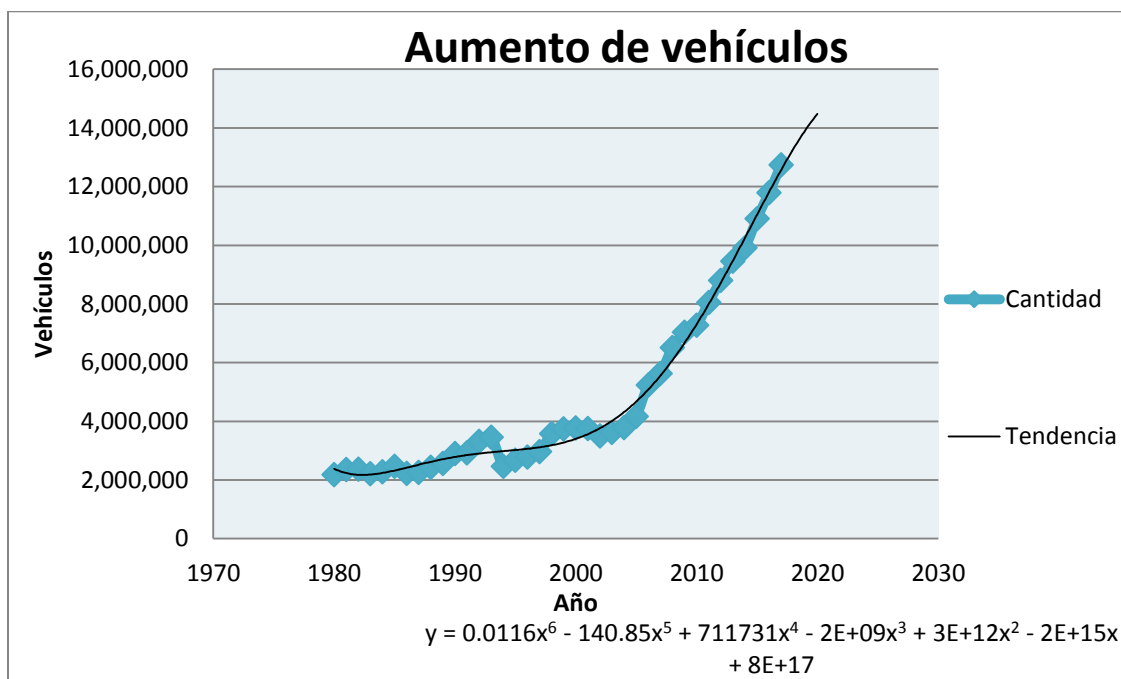


Figura 11. Sector transporte en la CDMX.

Actualmente el programa encargado de la disminución de la contaminación del aire se llama “PROAIRE 2011-2020” el cual sigue promoviendo medidas así como iniciativas como el uso de ECOBICI mejorando hasta cierto punto la calidad del aire en la ciudad. Las medidas para controlar las emisiones son estrictas debido a que causan daños atmosféricos, aumentan el efecto invernadero, dañan la salud humana, animal y vegetal. Cada componente químico daña en diferente medida entre ellos los más importantes son:

**Carbono:** Es uno de los contaminantes con más consideración debido a las cantidades de emisión. El acuerdo de Kioto es un acuerdo a nivel mundial que se



llevó a cabo el 11 de diciembre de 1997, este tiene como objetivo reducir gases efecto invernadero en donde el  $\text{CO}_2$  es el principal de ellos sin embargo este componente es un residuo inevitable de la combustión. En el caso que el  $\text{CO}_2$  no se complete se forma monóxido de carbono  $\text{CO}$ , este es toxico incluso puede causar la muerte por envenenamiento en pocos minutos, para disminuir estos gases los vehículos están equipados con catalizadores que completan hasta un 90% la combustión liberando  $\text{CO}_2$  y agua.

**Azufre:** El azufre es un elemento natural de los combustibles fósiles, hoy en día el combustible en venta, contiene una menor cantidad debido al mejoramiento de los procesos de refinación. Las consecuencias que los combustibles contengan azufre es su oxidación resultando en la formación  $\text{SO}_2$ , al ser expulsados salen a la atmosfera. Al tener contacto con el agua el  $\text{SO}_2$  pasa a formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), como consecuencia de esta formación es la precipitación en forma de lluvias acidas dañando directamente a la vida vegetal, a la vida acuática ríos y lagos.

**Nitrógeno:** A condiciones normales el nitrógeno tiene un comportamiento de una sustancia inerte pero en la combustión dentro del motor existen altas temperaturas por lo que el nitrógeno se oxida, existen siete posibilidades de óxidos de los cuales en general se denominaran  $\text{NO}_x$ , la gran mayoría reacciona formando óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ . Los  $\text{NO}_x$  causan smog y reacciones en cadena formando incrementos de ozono a bajo nivel, esta familia de óxidos son evitados usando el catalizador, el cual separa el oxígeno y nitrógeno, expulsándolos hacia la atmosfera de manera segura.

Es debido a los problemas generados en la salud y medio ambiente que es de importancia los estudios con el propósito de reducir el impacto de los motores de combustión, esto para que desde varios aspectos disminuya la cantidad de gases emitidos, algunos de los aspectos que impactan directamente en la generación de emisiones son: eficiencia del motor, calidad de la gasolina, mantenimiento del motor, calidad de la mezcla, entre otros.

## Capítulo 2

### Sistemas de inyección

Uno de los sistemas del motor de combustión interna que más evolución ha tenido es el sistema de admisión de combustible. Dicha evolución ha permitido disminuir las emisiones contaminantes e incrementar el desempeño de este tipo de máquinas térmicas. En este capítulo se explican algunas generalidades de este sistema.

#### 2.1 Componentes del motor de combustión interna

Para el funcionamiento del motor en particular en un vehículo automotor, este requiere de diferentes componentes que cumplen con diversas funciones específicas y complementarias, estos componentes regularmente son agrupados en sistemas; los principales son el sistema de entretenimiento y confort, el sistema eléctrico, el sistema del chasis y el sistema del motor. El sistema del motor es el encargado de suministrar la potencia para el movimiento del vehículo y debido a su complejidad se subdivide en el sistema de enfriamiento, de lubricación, de admisión de combustible y de inyección, este trabajo se enfocara en desarrollar una alternativa de este último sistema. El primer sistema de inyección para vehículos fue el carburador atribuido al norteamericano Samuel Morey y el abogado inglés Erskine Hazard creando un carburador para un motor tipo atmosférico el cual funcionaba sin compresión con un precalentamiento, para favorecer la evaporación (MAF<sup>1</sup>, 2009).

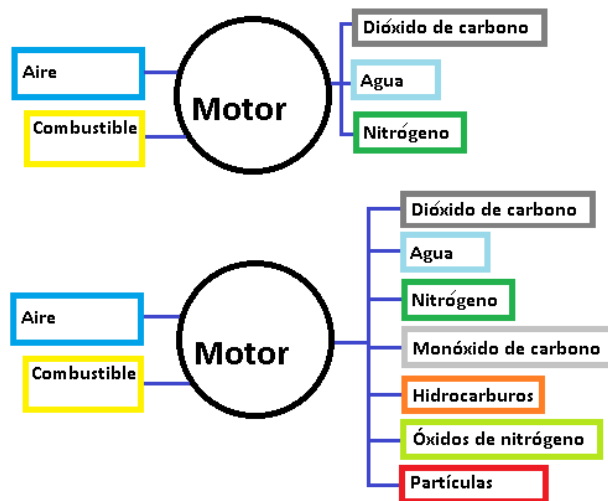


Figura 12. Combustión (ideal) arriba e incompleta (abajo) [12].



Como se trató anteriormente una combustión ideal es la que tiene las proporciones justas de combustible y de aire para así tener una relación de 14.7 de aire a 1 de combustible (Denton, 2017), de esto se encarga el sistema de inyección con el único fin de obtener una combustión ideal de lo contrario si las proporciones no corresponden se desarrollara una combustión incompleta con la cual los subproductos serán diferentes y se obtiene como resultado compuestos más dañinos para la salud en la [figura 12](#) se observa las diferencias entre ambas.

### 2.2 Clasificación de los sistemas de inyección

Con el fin de mantener una combustión completa y limpia los sistemas de inyección de gasolina se han desarrollado y evolucionado. Las variaciones de los sistemas de inyección son diversas, por lo que en la literatura existen distintas formas de clasificarlos según distintos criterios. Una clasificación puede ser el lugar en donde se inyecta, dividiéndose en: directa e indirecta, en los de tipo de inyección directa se habla de una inyección de combustible en la cámara de combustión por otra parte en la indirecta introduce el combustible antes de la válvula de admisión en el múltiple de admisión (MAF<sup>2</sup>, 2009).

Otra alternativa es según el criterio de número de inyectores en donde pueden clasificarse en monopunto o multipunto, en el primero hay solamente un inyector que suministra combustible en el colector de admisión antes de la mariposa de gases mientras que en la inyección multipunto existe un inyector por cada cilindro lo que permite una mejor dosificación de la mezcla aire – combustible (MAF<sup>2</sup>, 2009).

Una tercera alternativa que se emplea para clasificar a los sistemas de inyección es la que se enfoca en el número de inyecciones dividiéndose en continua e intermitente. En la inyección continua los inyectores introducen sin pausa la gasolina a los colectores por otro lado la inyección intermitente introduce el combustible con pausas, esto lo hace abriendo y cerrando los inyectores dependiendo de la señal recibida por la unidad de control y dependiendo la secuencia puede ser secuencial, semisequencial o simultánea (Cárcamo E., García F. & Medina J., 2014) esto se puede ver en la [figura 13](#).

- Secuencial: el combustible es inyectado con la válvula de admisión abierta es decir los inyectores funcionan de uno en uno y de manera sincronizada.
- Semisequencial: los inyectores actúan de manera que dos inyectores inyectan combustible a su correspondiente cilindro de manera simultánea.

- Simultanea: en este tipo de secuencia de inyección todos los inyectores depositan el combustible de manera simultánea abriendo y cerrando sin importar en que parte del ciclo se encuentre el cilindro.

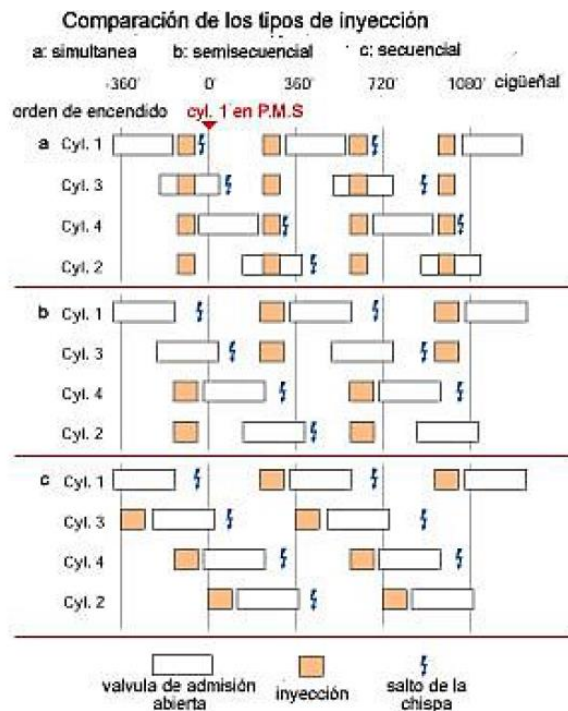


Figura 13. Tipos de inyección intermitente [13].

En este trabajo se explicara otra clasificación que corresponde la secuencia en que aparecieron empezando por el carburador ya que aunque es posible que existieran otros tipos de inyección de gasolina fue el más utilizado en los primeros automóviles.

### 2.3 El carburador

El carburador es un sistema de alimentación en donde se mezcla la gasolina y el aire de la mejor manera posible, y el parámetro que se utiliza para saber cuánta mezcla ingresa es la entrada de aire con este dato es posible modificar el régimen de giro del motor.

#### Funcionamiento

El funcionamiento de un carburador puede ser descrito por el principio de continuidad, este describe que debido a la conservación de masa, si a una sección se le induce una reducción de área y por este conducto existe un flujo como se muestra en la figura 14, se establece que toda la masa de este fluido que entra es igual a toda la masa que sale esto se desarrolla como:

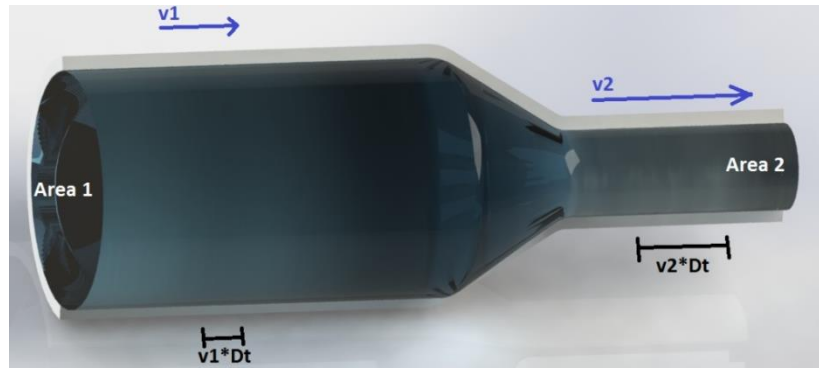


Figura 14. Reducción de áreas <sup>[14]</sup>.

$$m_1 = \rho \Delta V_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t_1$$

$$m_2 = \rho \Delta V_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t_2$$

Para comenzar el análisis es necesario suponer que el fluido que pasa por el tubo es incompresible y que la masa que entra es igual a la que sale, entonces se puede decir que:

$$\text{como } m_1 = m_2 \text{ y } \rho = \text{cte}$$

$$A_1 v_1 \Delta t_1 = A_2 v_2 \Delta t_2$$

Además se considera que el movimiento del flujo transcurre en el mismo tiempo

$$\Delta t_1 = \Delta t_2$$

Por lo que queda como:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Ya que  $A_1 > A_2$  se deduce que para mantener la igualdad  $v_2 > v_1$

Dónde:

$V$  = velocidad del fluido en la sección considerada.

$\rho$  = densidad del fluido.

$m$  = masa del fluido de trabajo.

$\Delta t$  = gradiente de tiempo.

$A$  = área de la sección.

$\Delta V$  = gradiente de volumen.

El propósito del carburador es emplear el aumento de velocidad para crear una mezcla de gasolina aire y así alimentar el motor, el funcionamiento del carburador está basado en el uso del tubo de Venturi desarrollado por el físico italiano Giovanni Battista Venturi. Con el principio de continuidad se demuestra que un fluido de trabajo aumenta su velocidad al pasar por una reducción de área sin embargo lo importante a resaltar es que al aumentar la velocidad se crea una diferencia de presión y esto es demostrado con la ecuación de Bernoulli.

$$\left(\frac{V^2 * \rho}{2}\right) + P + (\rho * g * z) = \text{cte}$$

Dónde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada.

$\rho$  = densidad del fluido.

P = presión a lo largo de la línea de corriente.

g = aceleración gravitatoria.

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

La ecuación de Bernoulli describe las propiedades del fluido bajo un movimiento lineal para la sección de la [figura 14](#) entonces se tiene que:

$$\left(\frac{V_1^2 * \rho}{2}\right) + P_1 + (\rho * g * z_1) = \text{cte}$$

$$\left(\frac{V_2^2 * \rho}{2}\right) + P_2 + (\rho * g * z_2) = \text{cte}$$

Al igualarse las ecuaciones (González, 2015) debido a que la masa que entra es igual a la que sale, se tiene que:

$$\left(\frac{V_1^2 * \rho}{2}\right) + P_1 + (\rho * g * z_1) = \left(\frac{V_2^2 * \rho}{2}\right) + P_2 + (\rho * g * z_2)$$

Al tener que  $\rho = \text{cte}$ , g es la misma y  $z_1 = z_2$ .

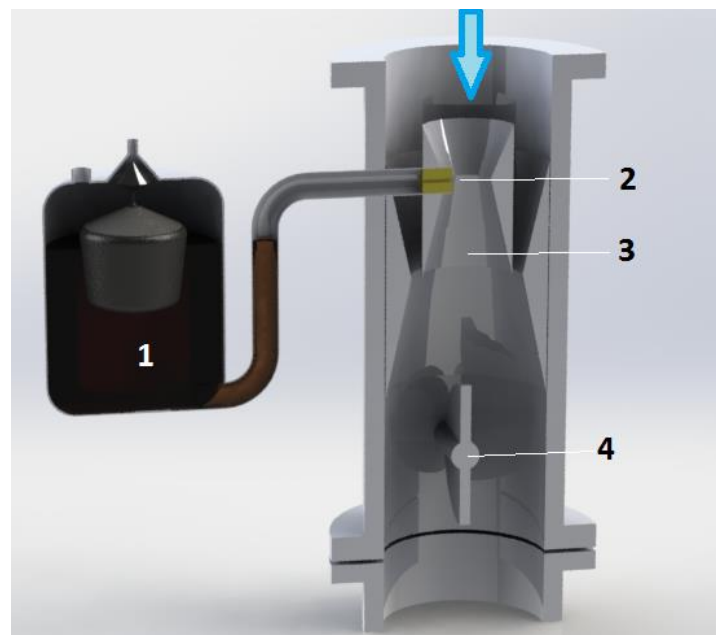
$$\left(\frac{V_1^2 * \rho}{2}\right) + P_1 = \left(\frac{V_2^2 * \rho}{2}\right) + P_2$$

Se tiene por lo tanto que como  $V_2 > V_1$  y al ser  $\rho = \text{cte}$  entonces para mantener la igualdad queda que  $P_1 > P_2$ .

## Sistemas de inyección

En un carburador el principio del tubo de Venturi es aplicado en aire y dentro de la reducción, se posiciona un surtidor de gasolina en el estrangulamiento de donde la gasolina será arrastrada introduciendo una mezcla en el circuito debido a la diferencia de presiones, este es mostrado en la [figura 15](#) en donde el surtidor esta calibrado con un determinado diámetro.

Además del surtidor de gasolina y tubo de Venturi el carburador requiere también de una cuba la cual servirá para suministrar el combustible y se mantenga a un nivel constante, esto se logra con un flotador; finalmente para controlar el flujo de aire que pasa a través del difusor se utiliza una mariposa, en la [figura 15](#) se observa un carburador elemental.



*Figura 15.* Carburador elemental [15].

1. cuba de combustible
2. surtidor de combustible
3. tobera
4. mariposa de gases

El carburador tiene subsistemas o circuitos, los cuales ayudan a que se cambie la cantidad de dosificación y funcione con ciertos requerimientos, entre los cuales se encuentran:

● **El circuito de elemental o de régimen normal:** el circuito tiene como objetivo empobrecer la mezcla cuando el motor funciona a cargas parciales y varía su régimen de giro, esto lo logra por un tubo con orificios calibrados a diferentes alturas llamado tubo emisor. El circuito de régimen normal proporciona un

mezclado económico ahorrando combustible. Cuando el motor trabaja bajo cargas parciales el dosado absoluto suele ser de  $F \approx \frac{1}{18}$  (González, 2015).

● **El sistema de enriquecimiento en aceleraciones transitorias:** cuando el vehículo es sometido a aceleraciones puede existir cambios bruscos en la entrega de combustible, como consecuencia de esto hay cambios rápidos en la cantidad de aire que entra, lo que resulta en un empobrecimiento de la mezcla y ocasiona un salto repentino en la velocidad o bache, esto se evita con el sistema de enriquecimiento momentáneo con esta medida las aceleraciones con carburador son más estables.

● **Sistema de enriquecimiento a plena carga:** cuando se requiere que el motor tenga un mismo régimen de giro pero a la vez se le demande más carga es necesaria una mezcla enriquecida para evitar calentamiento en el motor, el sistema detecta este cambio gracias a la depresión generada detrás de la mariposa y se soluciona permitiendo un aporte de gasolina suplementario al circuito de alimentación.

● **Sistema de enriquecimiento a plena potencia:** la plena potencia se consigue cuando el motor está a altos regímenes de giro pero a su vez se encuentra en condiciones de plena carga. Bajo estas condiciones se necesita un dosado absoluto de  $F \approx \frac{1}{12}$  (González, 2015). El cual es mayor al normal y puede obtenerse de dos maneras: una simple en donde se conecta un conducto extra a la cuba y este entra en funcionamiento solo cuando hay una elevada entrada de aire o la otra forma es por medio del comando, este a comparación del anterior es independiente al circuito principal pero con ventajas debido a que es estable con los cambios por desaceleración.

● **Circuito de ralentí y de progresión:** el sistema entra en acción cuando el motor gira a bajo número de revoluciones, bajo estas condiciones la mariposa permanece casi cerrada, la consecuencia de la ausencia del sistema es que pararía el motor debido a la falta de aspiración del combustible, esto se soluciona produciendo la aspiración de mezcla debajo de la mariposa la cual es regulada con un tornillo de riqueza. Otro elemento importante es el orificio de irreversibilidad que transmite la depresión del difusor al circuito de ralentí, haciendo que siempre este lleno y cebando el circuito en cualquier momento en que la mariposa se cierre.

● **Sistema de arranque en frio:** este sistema se ideo a consecuencia de las condiciones en el arranque del motor, en donde el motor de arranque es

insuficiente además debido también a problemas provocados por la condensación del combustible en el colector de admisión, haciendo escaso el combustible que llega al cilindro, para solucionarlo se debe enriquecer la mezcla y esto se logra de dos formas una de ellas es la administración de combustible adicional y la segunda que es la más utilizada, es restringir el aire con una válvula de mariposa llamada estrangulador o estárter.

● **Sistema amortiguador del cierre de la mariposa:** el sistema funciona cuando hay interrupciones rápidas de aire las cuales ocasionan una mezcla excesivamente rica en combustible. Los cambios bruscos en la mariposa repercuten en un aumento de hidrocarburos sin quemar, es por eso que en los carburadores se les suma un sistema amortiguador así cuando la mariposa es cerrada lo hace de manera progresiva.

Aparte de los sistemas anteriores existen otros como la electroválvula que abre el compresor si se utiliza el aire acondicionado además de los que evitan problemas de congelación y la percolación. En la [figura 16](#) se muestra la configuración de un carburador Solex F-32 BICSA.

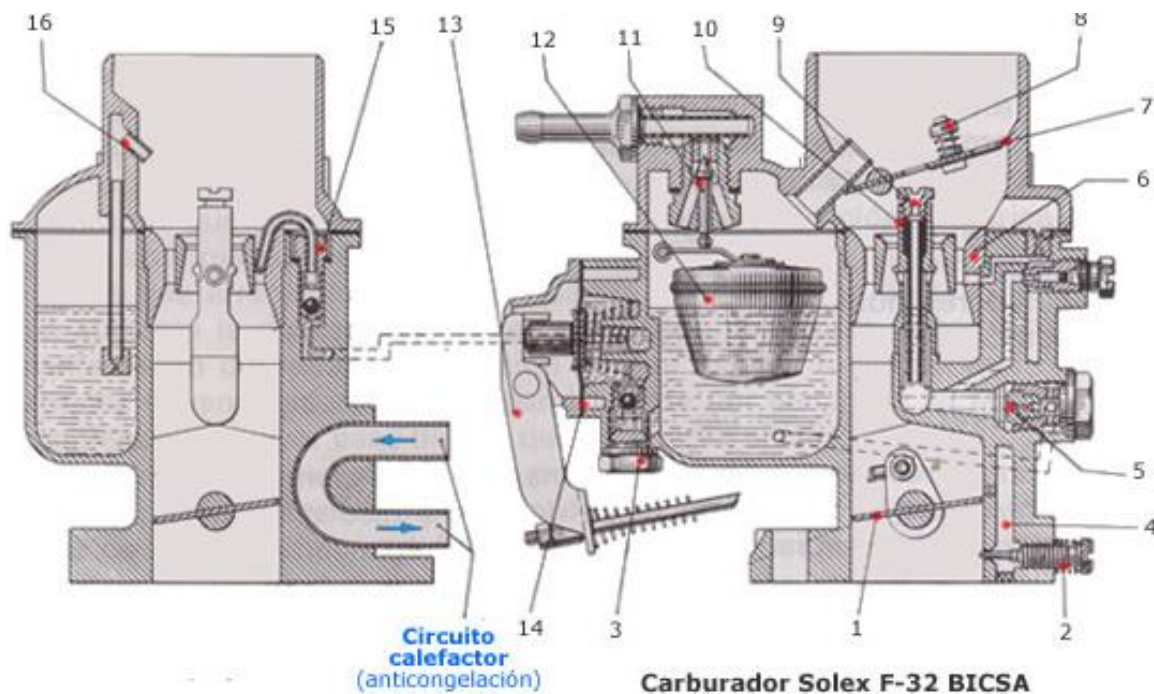


Figura 16. Ejemplo de un carburador [16].

1. Mariposa de gases
2. Tornillo regulación riqueza de ralentí
3. Válvula antirretorno
4. Circuito de ralentí
5. Calibre principal
6. Difusor



## Sistemas de inyección

7. Mariposa estranguladora
8. Válvula (arranque en frío)
9. Calibre de aire o soplador
10. Surtidor principal más compensador
11. Válvula de nivel (aguja)
12. Flotador
13. Palanca de mando
14. Bomba de aceleración
15. Tubo inyector
16. Econostato simple

## Evoluciones y variaciones

En motores de altas prestaciones superiores a 1300 cm<sup>3</sup> se requieren implementar carburadores de doble cuerpo y doble (González, 2015), el primero se compone de dos carburadores con el ángulo de la mariposa independiente abriéndose la segunda cuando se necesita mayor potencia. El de doble es una implementación donde las dos mariposas se abren al mismo tiempo con el mismo ángulo.

Debido a las aplicaciones existe una demanda de motores que sean capaces de entregar una mayor potencia, también existe una evolución constante de las normativas anticontaminantes y la necesidad de perfeccionar el arranque en frío y calentamiento. Lo anterior incentiva al desarrollo de mejoras en los carburadores, un ejemplo de ello es el sistema Ecotronic de la marca Bosch el cual incorpora una unidad de control y dependiendo de las señales de sensores envía una respuesta a los actuadores.

### 2.4 La inyección indirecta mecánica

Una de las empresas dedicadas a los desarrollos de los sistemas de inyección es la empresa Bosch de sus primeros desarrollos realizados fueron dentro de la inyección directa mecánica, esta es derivada de las bombas de inyección en línea de los motores diésel, empleando el sistema en el Mercedes Benz 300 SL. El sistema de inyección indirecta mecánica más conocida es el K-Jetronic también de Bosch mostrada en la [figura 17](#), el cual es un sistema importante dentro de esta categoría y se usa como ejemplo para explicar la inyección de gasolina.



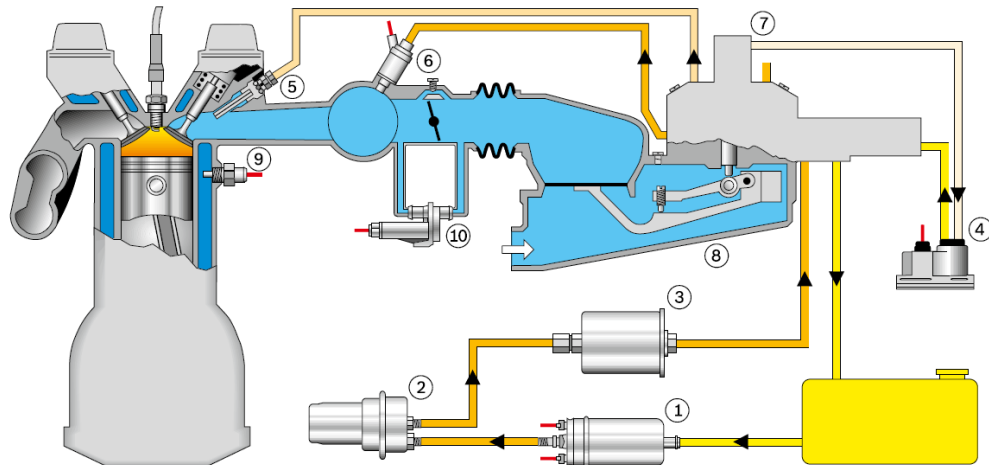


Figura 17. Inyección directa mecánica K-Jetronic [17].

1. Electrobomba de combustible
2. Acumulador de combustible
3. Filtro de combustible
4. Regulador de calentamiento
5. Válvula de inyección
6. Electroválvula de arranque
7. Distribuidor-dosificador de combustible
8. Medidor de caudal de aire
9. Interruptor térmico de tiempo
10. Válvula de aire adicional

### Funcionamiento

El sistema K-Jetronic es un sistema mecánico, multipunto, indirecta, continua y simultánea. En la [figura 17](#) se encuentra una representación de los elementos que conforman al sistema K-Jetronic el cual consta de dos circuitos trabajando en conjunto: el circuito de gasolina y el circuito de aire interactuando para juntos ingresar la mezcla gasolina-aire.

El circuito de aire está compuesto de una entrada de donde el aire pasa hacia un filtro y de ahí a un medidor de caudal, este flujo estará regulado por una mariposa de gases siendo la encargada de regular la carga del motor.

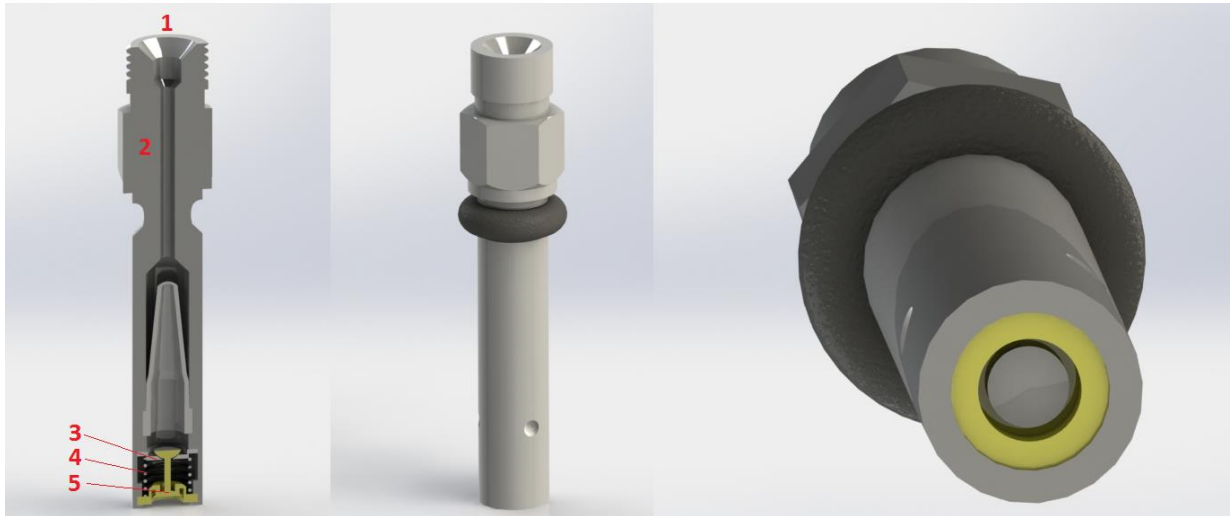


Figura 18. Inyector del sistema de inyección mecánica [18].

1. Entrada de combustible con presión
2. Cuerpo del inyector
3. plato
4. Muelle
5. Aguja

El circuito del combustible comienza el proceso en el depósito y mediante una bomba este será impulsado hacia un acumulador encargado de evitar la percolación y la formación de burbujas en el circuito así como la amortiguación de las variaciones de presión debidas al funcionamiento de la bomba. Después de que el combustible pasa por el acumulador va a un filtro y de ahí a un regulador de presión, el regulador mantiene constante la presión del sistema a unos 5 bar, tras el regulador de presión, el combustible ingresa al conjunto dosificador-distribuidor el cual regulara el caudal previo con ayuda de otros sistemas, finalmente cuando la presión supera los 3,3 bar (González, 2015) el inyector mediante un mecanismo libera el combustible, es importante mencionar que los inyectores mecánicos no tienen una función dosificadora. En la [figura 18](#) se muestra un ejemplo de los inyectores.

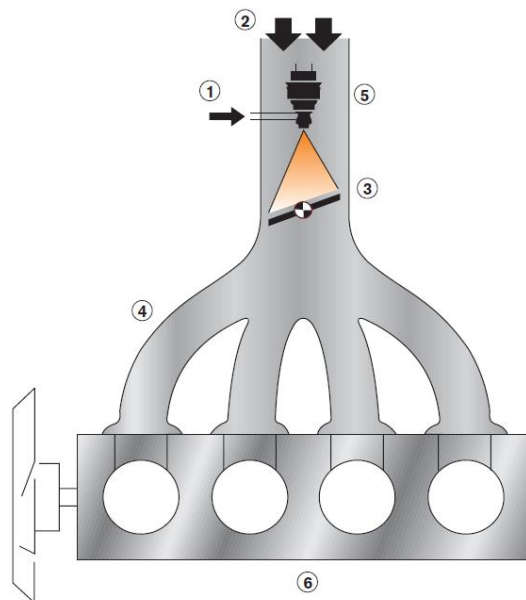
### Evoluciones y variaciones

La evolución más importante en los sistemas de inyección mecánica es el sistema KE-jetronic el cual incorpora un sistema de regulación gracias a la sonda Lambda sin embargo la sonda está diseñada solo para vehículos con catalizador. Además de los valores de la sonda Lambda, también se recibe señales de régimen de giro y posición de mariposa así como la temperatura del motor es por estas señales y otras que fue posible el control de la presión diferencial de las cámaras, los datos se reciben por la unidad electrónica de control (UCE) (Águeda, 2009).

Otro cambio es la sustitución de la fase de calentamiento por un actuador electrohidráulico, con esto la unidad de control interviene con mejores resultados en la dosificación, el sistema KE-jetronic ha sufrido diferentes evoluciones KE1-jetronic en el cual la electrónica de la unidad es analógica, KE2-jetronic añade regulación lambda y la válvula de estabilización ralentí, para el KE3-jetronic el sistema de control es de electrónica digital, KE-Motronic este último dispone de una unidad de control única que gestiona conjuntamente el sistema de inyección y el de encendido, además cuenta con la posibilidad de funciones de autodiagnosís así como la incorporación de un sensor de detonaciones.

### 2.5 La inyección electrónica monopunto

La inyección electrónica monopunto utiliza un solo inyector el cual tiene la capacidad de inyectar mezcla a todos los cilindros, otra característica importante es el control del aire debido a una mariposa de gases ubicada después del inyector como muestra esquemáticamente la [figura 19](#). La apertura del inyector es realizada de forma electrónica y como su nombre lo indica es una inyección indirecta por que introduce el combustible fuera del cilindro.



*Figura 19.* Disposición del inyector en un sistema de inyección electrónica monopunto <sup>[19]</sup>.

1. Entrada de combustible
2. Aire
3. Mariposa de aceleración
4. Múltiple de aceleración
5. Válvula de inyección
6. Motor

## Funcionamiento

El funcionamiento del sistema de inyección monopunto tiene importantes cambios, igualmente como los anteriores es relevante separar el sistema de inyección en dos circuitos, estos serán el circuito de aire y el circuito de gasolina.

El circuito de aire comienza con los conductos de admisión y filtro de aire, después de esto el aire entra al colector de admisión en donde el inyector dosifica la mezcla, la dosificación dependerá de algunos datos entre ellos de la apertura de la mariposa de gases que en esencia se encargan de controlar la carga del motor.

En cuanto al circuito de combustible, este comienza en el depósito de gasolina después ingresa a una primera bomba que lleva el combustible al acumulador de combustible en donde se encuentra una segunda bomba la cual le da una presión positiva final pasando al filtro y finalmente a la unidad central de inyección, si la presión excede a la necesitada el regulador de presión de gasolina se encargara devolver el combustible al depósito, cuando el sistema de control lo indique la válvula en el inyector se abrirá permitiendo el pulverizado de combustible.

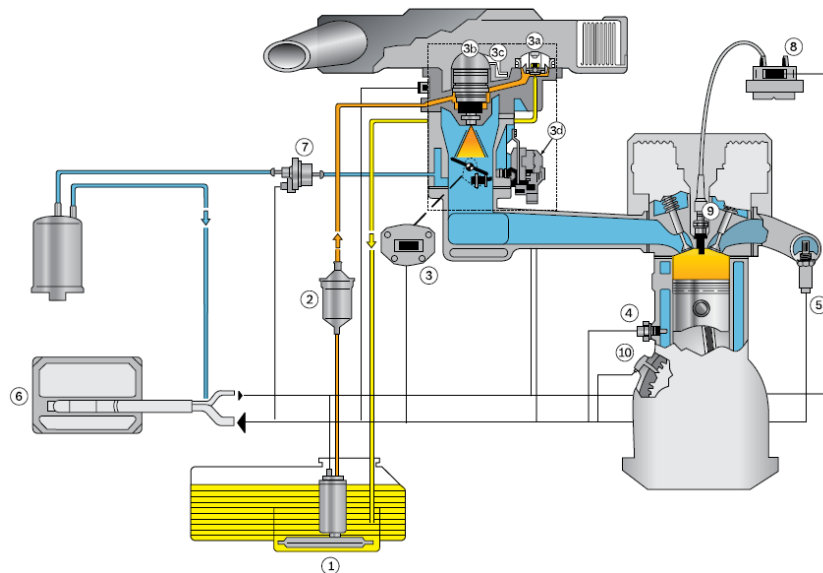


Figura 20. Elementos básicos del sistema de inyección electrónica Mono Motronic [20].

1. Electrobomba de combustible
2. Filtro de combustible
3. Potenciómetro de la mariposa
- 3a. Regulador de presión
- 3b. Válvula de inyección
- 3c. Sensor de temperatura del aire
- 3d. Actuador de ralentí
4. Sensor de temperatura del motor
5. Sonda lambda

## Sistemas de inyección

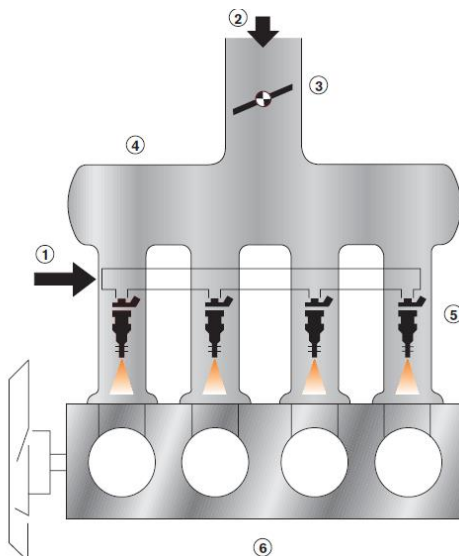
6. Unidad de mando
7. Válvula de ventilación del tanque
8. Bobina de encendido
9. Bujía de encendido
10. Sensor de revoluciones (pertenece al sistema de encendido)

## Evoluciones y variaciones

Para reducir el gasto de combustible se desarrolló el sistema de inyección Mono-Motronic mostrado en la [figura 20](#), en esencia la evolución fue la unión del sistema del control de inyección y encendido en forma conjunta, lo que represento el cambio en la rápida respuesta en los cambios en la inyección y el tiempo de encendido gracias a la posibilidad de compartir información de diferentes sensores.

### 2.6 La inyección indirecta electrónica multipunto

El sistema de inyección indirecta electrónica multipunto es parecido al sistema de inyección mecánica ya que en cada cilindro existe un inyector y estos inyectores están posicionados antes de las válvulas de admisión sin embargo el sistema de inyección indirecta pulveriza la gasolina y lo realiza de manera electrónica comandado por la unidad de control. El sistema se muestra en la [figura 21](#).



*Figura 21.* Disposición de los inyectores en un sistema de inyección electrónica indirecta multipunto <sup>[21]</sup>.

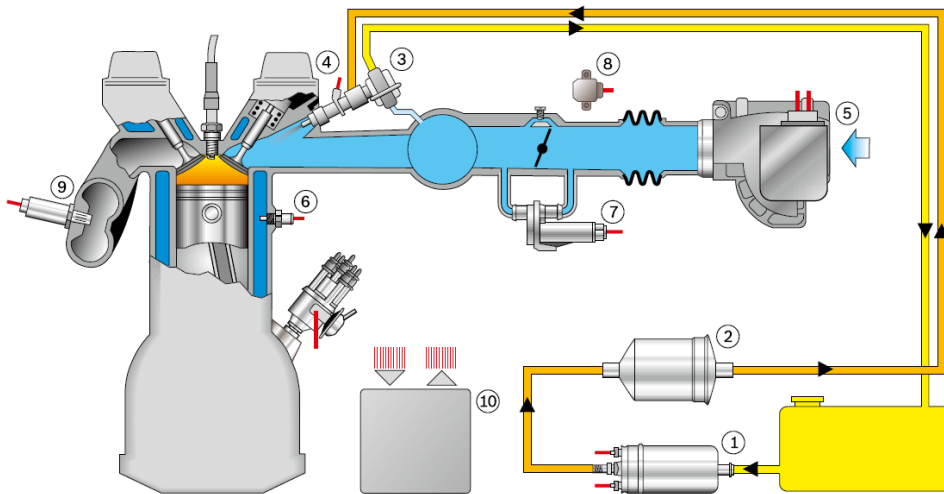
1. Tubo distribuidor (entrada de combustible)
2. Aire
3. Mariposa de aceleración
4. Múltiple de admisión
5. Válvulas de inyección
6. Motor

## Funcionamiento

Los sistemas de inyección electrónica multipunto realizan la pulverización de manera intermitente dependiendo del estado del cilindro en donde se encuentre cada inyector, existen diferentes configuraciones para las secuencias de inyección las cuales pueden ser la simultánea, semisecuencial y secuencial.

Para comprender sistemas similares, se tomara como referencia el sistema L-jetronic de la marca Bosch mostrado en la [figura 22](#), el sistema comienza con la admisión de aire hacia el filtro, atraviesa el conducto de admisión y llega a un caudalímetro de aleta el cual tiene instalado un termómetro, estos dos sensores envían la información al sistema de control para estimar el caudal de aire aspirado, el circuito tiene incorporado un By-pass de aire para ajustar el régimen ralenti después llega a la mariposa de gases la cual regula la potencia del motor y finalmente llega al colector de admisión.

En cuanto al circuito de combustible, este comienza en el depósito que como en los demás sistemas cuenta con una bomba que en este caso es eléctrica, la bomba debe suministrar una presión superior a 3 bar pudiendo alcanzar 7 bar (González, 2015), a continuación llega al filtro de gasolina depositando el combustible en la rampa de inyección, la función de la rampa es acumular el combustible garantizando la misma presión y volumen para cada uno de los inyectores. Conectado a la rampa se encuentra el regulador de presión que mediante una membrana así como un muelle abre una válvula hacia el depósito de combustible cuando sobrepasa la presión requerida.



*Figura 22.* Sistema de inyección indirecta L-jetronic [22].

1. Electrobomba de combustible
2. Filtro de combustible
3. Regulador de presión del combustible
4. Válvula de inyección

## Sistemas de inyección

5. Medidor de caudal de aire
6. Sensor de temperatura
7. Válvula de aire adicional
8. Interruptor de mariposa
9. Sonda Lambda
10. Unidad de mando

Los inyectores se encuentran unidos a presión mediante una junta actuando como un aislamiento térmico y que amortigua las vibraciones, el cuerpo del inyector está formado de dos partes: el cuerpo metálico sujeto a la rampa y la aguja que se encuentra en contacto con un muelle y el cuerpo metálico, la aguja es movida en dirección contraria al muelle por un solenoide cuando la unidad de control envía la señal, ocasionando que el combustible salga pulverizado por el espacio anular que se crea alrededor de la aguja, las partes del inyector se puede ver a detalle en la [figura 23](#).



*Figura 23.* Inyector para un sistema de inyección indirecta multipunto [23].

## Evoluciones y variaciones

*Tabla 2*  
Flota vehicular de la CDMX 2016

Sistema	Mejora
<b>Sistema LE-Jetronic y LE2-Jetronic</b>	Se elimina el inyector de arranque en frío y el interruptor térmico temporizado.
<b>Sistema LU-Jetronic</b>	Está adaptado a la normativa anticontaminación estadounidense y funciona con regulación Lambda.
<b>Sistema LU2-Jetronic</b>	Es la evolución de la LU el cual suprime el inyector de arranque en frío y el interruptor térmico.
<b>Sistema LU3-Jetronic</b>	En este caso la unidad de control es ubicada sobre el caudalímetro y es digital, este además suprime el by-pass de regulación de CO.
<b>Sistema LH-Jetronic</b>	El sistema tiene incorporado un regulador de ralentí regulado por un actuador y controlado por el sistema de control, otro cambio es la sustitución del caudalímetro de aleta por un medidor de masa de aire de hilo caliente el cual se mantiene a una temperatura de 120 °C.



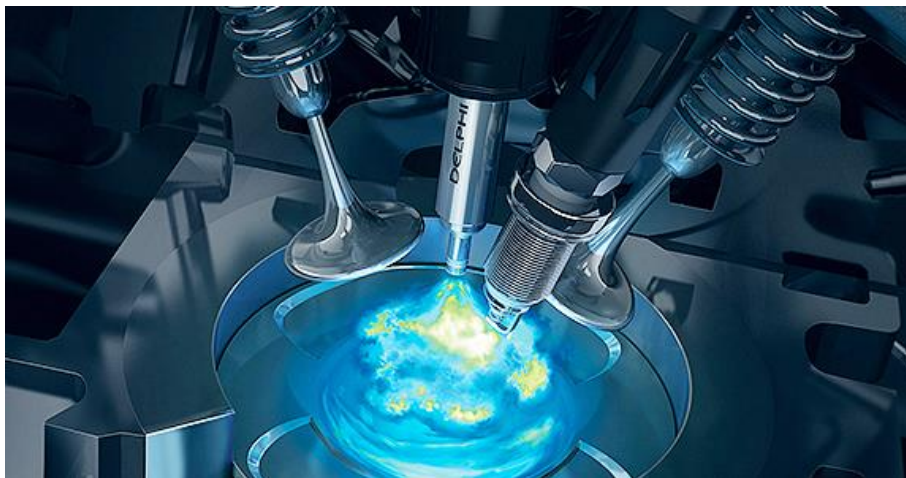
## Sistemas de inyección

<b>Sistema Motronic</b>	Incorporan una unidad de control que gestiona de forma conjunta el sistema de alimentación y de encendido. Las primeras generaciones mantenían el caudalímetro de aleta y la válvula de aire adicional, otro sensor que tenía incorporado es el de fase para realizar una inyección secuencial además la unidad de control incorpora un protocolo de autodiagnos con memoria de averías, teniendo modos emergencia en caso de avería. Estos sistemas realizan una regulación Lambda y pueden controlar la electroválvula del cánister para reciclar los vapores de combustible, finalmente para medir la masa de aire se utilizan los medidores de placa o HFM (Hot Film Air Mass Meter) o un sensor de presión absoluta MAP (Manifold Absolute Pressure).
<b>Sistema Motronic ME 7</b>	Este sistema incorpora sensores de fase para saber la posición de los pistones, una implementación interesante es una mariposa de gases robotizada y un pedal de acelerador electrónico. El sistema de control tiene un control exacto de la cantidad de inyección, ángulo de apretura de mariposa y momento exacto de encendido debido a la diversidad de sensores como lo son: la posición del pedal de acelerador, régimen de giro, la temperatura del motor, la conexión del aire acondicionado, el control de tracción, el sistema de frenos ABS.

Descripción de los distintos cambios o avances en el sistema multipunto [72].

### 2.7 La inyección directa electrónica

El cambio más importante que toma este sistema de inyección respecto a los demás es que los inyectores realizan la dosificación de gasolina dentro de la cámara de combustión como se muestra en la [figura 24](#), De esta forma aumenta el rendimiento del motor, reduciéndose el consumo de combustible y las emisiones contaminantes.



*Figura 24.* Inyección directa de combustible [24].

#### Funcionamiento

Este sistema de inyección en cuanto al circuito de aire usa las últimas mejoras en los últimos sistemas por ejemplo en el sistema de inyección directa de gasolina Bosch MED 7 ([figura 25](#)) tiene un medidor de la masa del aire, cuerpo de la mariposa robotizada, sensor MAP entre otros componentes.

En el circuito de alimentación de gasolina se encuentran las principales diferencias, el sistema de inyección electrónica emplea una bomba para la



## Sistemas de inyección

alimentación del circuito de baja presión que a su vez alimentara a la bomba de alta presión siendo accionada por una leva adicional del árbol de levas, la presión es regulada con límite de 200 bar (González, 2015) por una electroválvula, finalmente la rampa distribuye la gasolina hacia los inyectores.

En este sistema hay dos tipos de inyectores: los electromagnéticos y los piezoeléctricos. Los inyectores electromagnéticos funcionan cuando la unidad de control excita un embobinado permitiendo que el combustible salga al cilindro, el funcionamiento de los inyectores piezoeléctricos (figura 26 a y b) funcionan por cristales en paralelo los cuales cuando se les aplica una tensión se expanden, en la práctica gracias a la forma de la aguja se crea un cono uniforme permitiendo presiones de inyección de hasta 200 bar, normalmente los inyectores realizan la acción de apertura de 2 a 15 milisegundos según la condición de trabajo (MAF<sup>1</sup>, 2009).

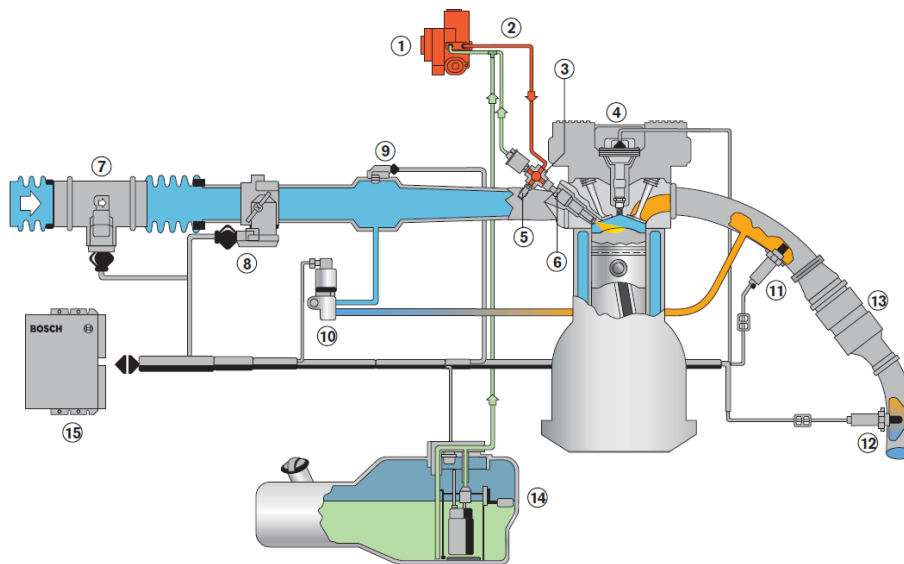


Figura 25. Esquema del sistema de inyección directa de gasolina Bosch MED 7 [25].

- 1 Bomba de alta presión
- 2 Válvula de control de presión
- 3 Tubo distribuidor
- 4 Bobina de encendido
- 5 Sensor de presión
- 6 Válvula de inyección
- 7 Sensor de masa de aire con sensor de temperatura integrado
- 8 Cuerpo de mariposa (EGAS)
- 9 Sensor de presión absoluta
- 10 Válvula (EGR)
- 11 Sonda lambda (LSU)
- 12 Sonda lambda (LSF)
- 13 Catalizador
- 14 Pre-bomba de combustible
- 15 Unidad de comando

## Evoluciones y variaciones

En cuanto a la evolución de este tipo de sistemas se encuentran:

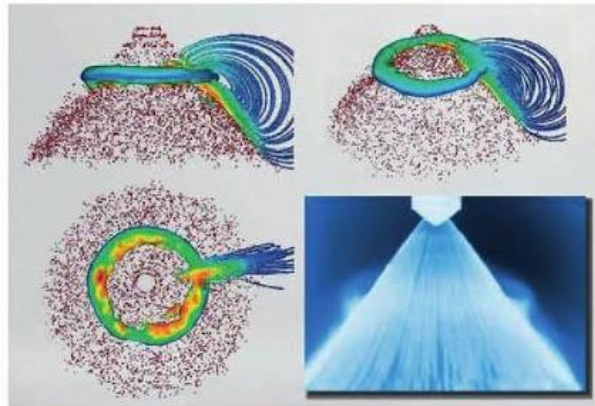
- Gama de motores GDI demitsubishi: Este sistema puede trabajar en modo homogéneo o estratificado, también incorpora un colector de admisión vertical que ayuda a que el aire entre con una elevada turbulencia cilíndrica ayudada por el deflector labrado en la cabeza del pistón así como incorpora un medidor de masa de aire tipo Vortex.
- Gama de motores de inyección directa de Mercedes Benz: dentro de los mejores sistemas se encuentran inyectores piezoeléctricos de apertura de aguja, además este sistema también funciona en modo homogéneo y estratificado.
- Gama de motores HPI del grupo PSA: tienen la capacidad de funcionar bajo modo homogéneo o estratificado, ya que emplea inyección guiada por pared además funciona con inyectores de accionamiento electromagnético.
- Gama de motores IDE de Renault: el aire entra bajo turbulencia cilíndrica apoyada por la forma de la cabeza del pistón, al emplear solo el modo homogéneo se puede prescindir del catalizador-acumulador de NOx.



Figura 26. Inyectores piezoeléctricos usados en el sistema de inyección directa [Izquierda 26 a, derecha 26 b].

Dentro de las mejoras que se realizan en los sistemas de inyección es importante mencionar a la homogeneidad de la mezcla ya que afecta en la

propagación de frente de llama y con ello la eficiencia de la combustión e incluso surgir fenómenos de detonación (Pérez, 2011), en los diferentes cambios de los sistemas se mejoró este factor de diferentes maneras por ejemplo en la inyección directa lo hace inyectando la cantidad estrictamente necesaria para el correcto funcionamiento del motor en cualquier régimen de giro y de carga por lo que se reduce las emisiones, mejora rendimiento y ahorra combustible (MAF<sup>1</sup>, 2009) o incluso utilizando la apertura de los inyectores por ejemplo en la gama de motores HPI de BMW fue posible proyectar un cono uniforme con la mezcla mostrado en la [figura 27](#). A pesar de los desarrollos se han encontrado mediante diferentes investigaciones que existen otras maneras para formar la mezcla aire gasolina y mejorar la eficiencia de la combustión.



*Figura 27.* Forma del cono uniforme de inyección de un motor HPI [27].

## Capítulo 3

### Sistema de inyección indirecta de mezclado por ultrasonido

En este capítulo se describirán los antecedentes que se tienen del trabajo a fin de mostrar las ventajas o mejoras que se tienen al utilizar al sistema de mezclado por ultrasonido para crear la mezcla gasolina – aire.

#### 3.1 Desarrollo del uso de transductores

Actualmente se han desarrollado diversos sistemas de inyección para poder alimentar al motor con una mezcla aire-combustible estequiometrica, algunos de estos ya son comercializados, sin embargo se han seguido investigando acerca de nuevos sistemas de inyección incrementar la eficiencia del proceso hacia la cámara de combustión. Una de las alternativas es el uso de inyectores ultrasónicos los cuales prometen una mejor pulverización de la gasolina y control del diámetro de gota. El intento de utilizar este tipo de tecnología en los sistemas de inyección conlleva a diversas soluciones, algunas ya utilizadas y probadas para inyección indirecta sin embargo estos desarrollos no fueron llevados al mercado quedando la mayoría como patentes. Hoy en día debido a los avances tecnológicos y específicamente electrónicos vuelve a resurgir la viabilidad de esta propuesta la forma en que crea la neblina es como mostrada la [figura 28](#).



*Figura 28.* Creación de neblina con transductores por ultrasonido <sup>[28]</sup>.

### 3.2 Cristales ultrasónicos

El principio básico de funcionamiento de los transductores se basa en la transformación de la energía eléctrica a energía mecánica, esto sucede al aplicar un diferencial de potencial al cristal lo que provoca su expansión y su compresión al retirar dicho diferencial, al repetirse el ciclo a altas velocidades ocasiona ciertas inestabilidades hidrodinámicas generando el fenómeno de atomización de líquidos.

Este fenómeno ha sido aplicado en los motores de combustión interna más específicamente en el sistema de inyección. Los cristales son utilizados para la nebulización de gasolina, para este fenómeno es importante considerar que la calidad de la nebulización se encuentra relacionada en términos de propiedades físicas del líquido que influyen de manera directa, algunas de estas propiedades son viscosidad, tensión superficial y temperatura.

Dentro de los transductores de alta frecuencia se encuentran los piezoeléctricos cerámicos los cuales debido a sus aplicaciones han surgido como material preferente debido a sus propiedades electromecánicas y su bajo costo. Este tipo de sistema se ha probado para mejorar la inyección de la gasolina y se han justificado diversos estudios debido a sus ventajas.

En el mercado actualmente se encuentran diversos transductores de diferentes tipos, tamaños, requerimientos y para infinitas aplicaciones sin embargo para el trabajo se utilizaron transductores cerámicos de los cuales los más comunes son 2, estos son los cristales sumergibles y los cristales de micro poros encontrados muy comúnmente en humidificadores.

### 3.3 Cristal sumergible.

El cristal nebulizador funciona sumergiéndose dentro del líquido, al trabajar genera vibraciones circundantes entre el líquido y el cristal e induce a ciertas inestabilidades debido a la diferencia de velocidades entre el jet y el medio. A temperatura y presión ambiente el líquido contiene miles de millones de burbujas de aire microscópicas y cuando hay diferencia de velocidades se crean zonas de compresión y rarefacción (Gallego, 2015) como se muestra en la [figura 29](#) estas diminutas burbujas forman núcleos que debido a la exposición de ondas ultrasónicas sinusoidales estas burbujas crecen hasta llegar a un punto crítico donde las propiedades del líquido pierden su estabilidad y las burbujas colapsan generando una respuesta en cadena que origina más colapsos.

## Sistema de inyección indirecta de mezclado por ultrasonido

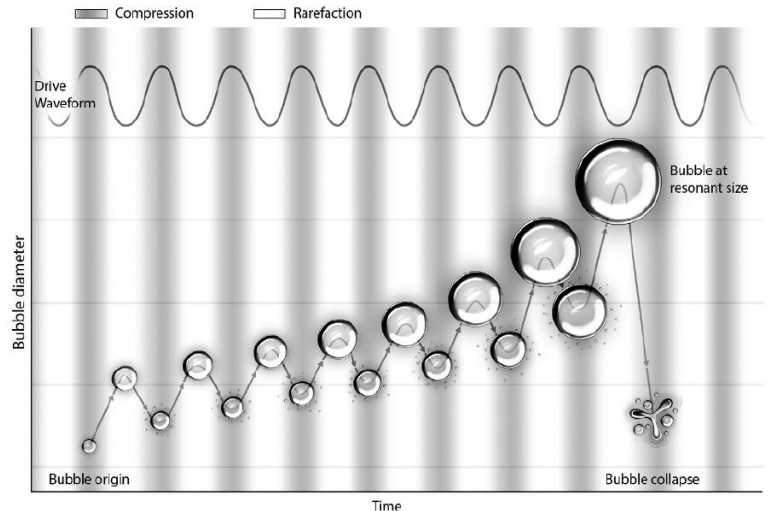


Figura 29. Generación de la cavitación [29].

Este fenómeno en forma macroscópica puede observarse como la generación de un jet que al entrar en contacto con el aire resulta en una generación de una neblina fina la cual presenta pequeñas gotas de un rango de tamaño irregular, este transductor genera la neblina muy rápidamente, sin embargo gran parte de la energía aplicada se pierde ya que la gran mayoría del líquido movido por el jet es líquido impulsado o gotas tan grandes que caen y se incorporan de nuevo al líquido debido a su peso, en la figura 30 puede verse de manera gráfica y las partes generadas del jet.

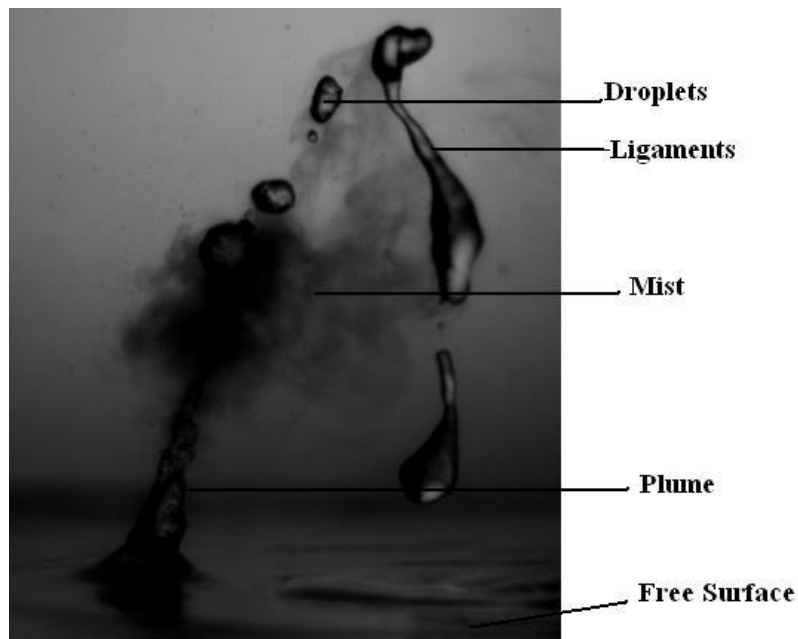


Figura 30. Transductor sumergible y su fenómeno físico [30].

En la literatura se pueden encontrar numerosas ventajas de trabajar con este tipo de mezclado una de ellas es la baja aplicación de energía en la gasolina para obtener pequeñas partículas, se ha calculado que solo se necesita el 55% (Katsumi, 2007) de la energía que se requiere para tener una mezcla a comparación de la evaporización de la sustancia, además de una alta concentración que se logra en poco tiempo.

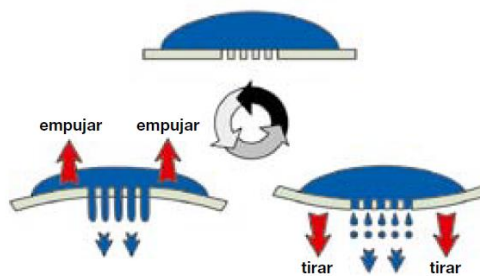
### 3.4 Cristal con micro poros

El cristal que funciona con micro poros genera una neblina distinta, debido a que este tipo de nebulización es generada por un movimiento del cristal que es de compresión y después de expansión del cristal hasta hacer que las gotas se propaguen en el aire por la misma inercia del líquido el movimiento puede verse en la [figura 31](#), al crear las gotas por compresión y pasar el líquido por poros de un diámetro constante se tiene como consecuencia que el diámetro de las gotas se formen dentro de un rango mucho más controlado a comparación del cristal sumergible, sin embargo la tasa de flujo de las gotas es menor y por lo tanto el flujo másico que puede entregar difícilmente suministrara la mezcla lo necesariamente rápido para el motor de combustión interna; es posible solucionarlo con varios cristales en paralelo sin embargo se pretende hacer un diseño con el menor uso de cristales posibles.

Principio de generación de la pulverización



Cabezal de pulverización piezo-eléctrico con membrana vibradora de perforado fino (malla)



Principio de funcionamiento de vibración de la malla

*Figura 31.* Transductor sumergible y su fenómeno físico <sup>[31]</sup>.

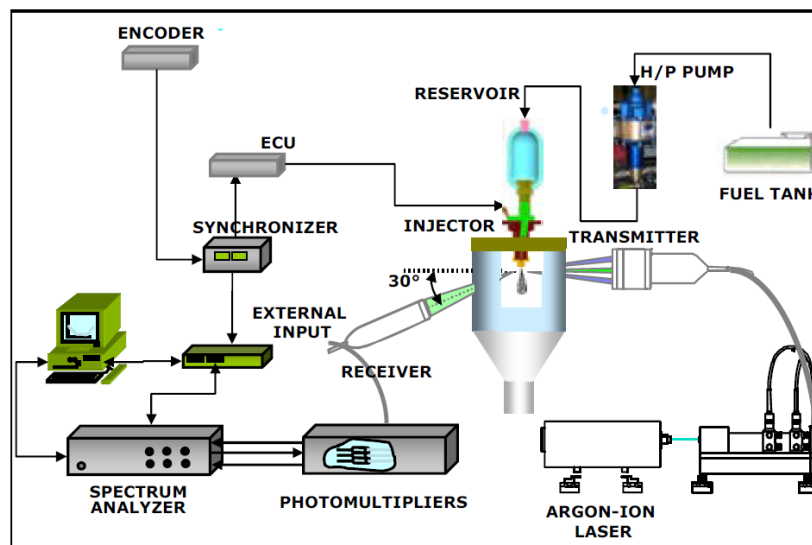
### 3.5 Antecedentes

En la década de los 80's se empezó a estudiar el fenómeno aplicado a los sistemas de inyección de gasolina y a pesar de las ventajas de utilizar este tipo de



inyección se dejó de investigar al respecto debido primero a la dificultad de encontrar cristales ultrasónicos y por otro lado a la limitación de alimentación que representa dicha solución. Anteriormente se han llevado a cabo diversos estudios con inyección por ultrasonido sin embargo este trabajo se apoya en 3 investigaciones realizadas.

Una de las principales ventajas de estos tipos de inyección es la generación de pequeños diámetros de gota lo cual se refleja en una mejor eficiencia en la combustión reduciéndose algunos gases de emisión. Existe un estudio en donde realizaron comparaciones de mediciones del tamaño de gota, la primera medición que se analizó fue el tamaño de gota en un sistema de inyección directa mediante equipo que muestra de forma detallada la inyección mostrada en la [figura 32](#).



*Figura 32.* Preparación del equipo de medición [32].

Con el equipo de medición lo que se obtuvo fueron mediciones del tamaño de gota con un sistema de inyección directa y de las cuales se encontraron los cambios con respecto al tiempo. Las mediciones obtenidas al aplicar diferentes presiones con un inyector resultaron en diferentes diámetros de gotas las cuales fueron representadas en la siguiente gráfica de la [figura 33](#) en donde se muestra el progreso del tamaño de las gotas así como puede observarse que las gotas se encuentran entre un promedio de 6 a 12  $\mu\text{m}$  (Burak, 2014).



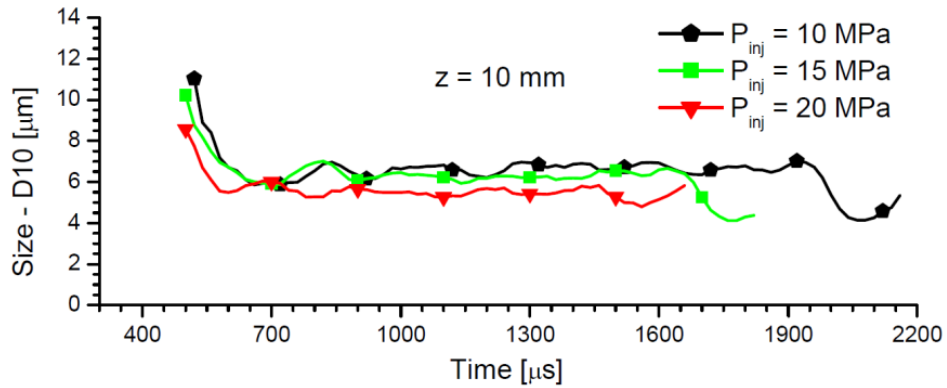


Figura 33. Con un inyector con 10 mm de diámetro en la boquilla [33].

Por otro lado el estudio utilizó un sistema ultrasónico con un cristal piezoeléctrico hecho con cuarzo - bario y titanio, este cristal requiere de una señal mayor a 1 MHz con un voltaje que va de 12 V a 40 V (Burak, 2014). Mostrado en la figura 34 en donde se puede ver con detalle el piezoeléctrico, el generador de señal la cual genera los pulsos de voltaje a la frecuencia que el cristal necesita, en cuanto al transformador recibe en voltaje de una toma de corriente y lo transforma a corriente directa para poder alimentar el generador de la señal.

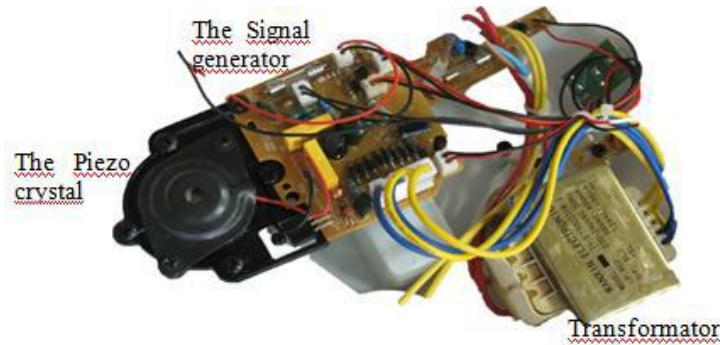


Figura 34. Con un inyector con 10 mm de diámetro en la boquilla [34].

Las mediciones se realizaron con una cámara especial llamada Dino-Lite USB con la cual se obtuvieron muestras de las gotas y se analizaron desde un ordenador para saber el tamaño de gota, en la figura 35 puede verse una de estas imágenes analizadas.



Figura 35. Con un inyector con 10 mm de diámetro en la boquilla [35].

Las mediciones obtenidas mostraron que los diámetros de las gotas se encontraban en un rango de 6 a 36  $\mu\text{m}$  (Burak, 2014). Como puede observarse en la figura 36 en donde la atomización por ultrasonido tiene una distribución del tamaño de gota similar a la inyección directa sin embargo el sistema de inyección directa requirió 20 Mpa (Burak, 2014). Para obtener el diámetro de gota comparado con la nula presión que se requirió en el sistema ultrasónico. El hecho de diámetro representa una disminución de gases en que se hablará en el siguiente estudio

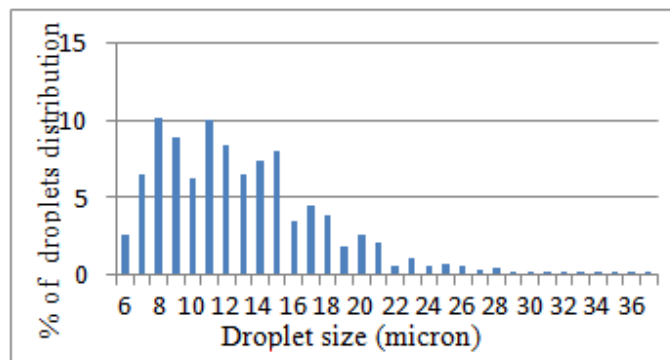


Figura 36. Con un inyector con 10 mm de diámetro en la boquilla [36].

Hay otro estudio en donde probaron utilizar la neblina de gasolina para alimentar a un motor de combustión interna, en este caso para la construcción del prototipo que alimenta con la neblina se aprovecharon las ventajas del tubo Venturi manufacturando un diseño que consistió en un cilindro de acrílico con base de aluminio, el transductor que genera el ultrasonido se acoplo en la base, los detalles se pueden observar en la figura 37.

## Sistema de inyección indirecta de mezclado por ultrasonido

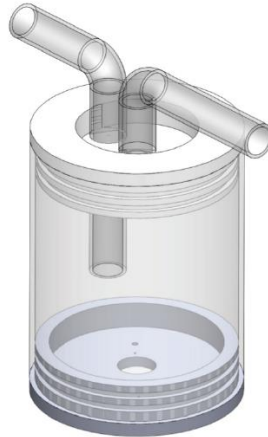


Figura 37. CAD del Recipiente donde se atomiza la gasolina [37].

Fuente: Bergþór Lár Jónsson, Garðar Örn Garðarsson, Óskar Pétursson, Sigurður Bjarki Hlynsson, Joseph Timothy Foley. 2015. Ultrasonic gasoline evaporation transducer—reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design. 9th International Conference on Axiomatic Design.

El transductor utilizó un voltaje aplicado es de 50 V pico a pico y una frecuencia de 1.7 MHz (Bergþór, 2015), este puede verse en la figura 38. Por otra parte el motor al que se le realizaron las pruebas en un Honda GX-160 el cual demanda combustible con un rango de  $\approx 2.5 \frac{g}{min}$  a  $\approx 25 \frac{g}{min}$  con un torque de 10 N\*m.

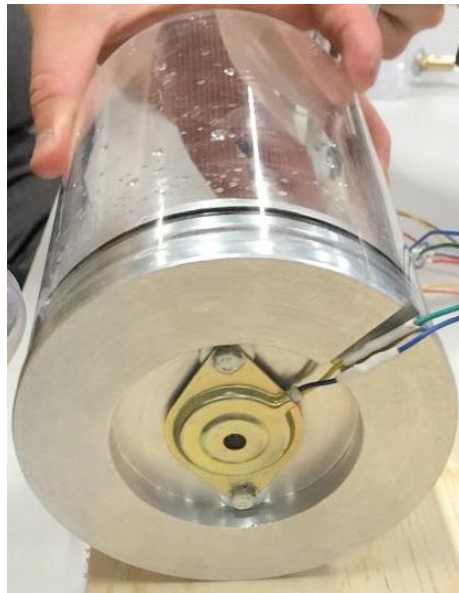


Figura 38. Base del recipiente donde se atomiza la gasolina [38].

En cuanto a las capacidades del sistema se midió una evaporización de  $40 \frac{g}{min}$  de gasolina en la máxima entrega de energía además es necesario mantener un nivel constante de gasolina de 4 cm idealmente para su pleno funcionamiento, las gotas que son succionadas efectivamente son muy pequeñas y finalmente se probó con un motor de 170 cc (Bergpór, 2015) el cual funciono sin presentar ningún problema.

Los resultados encontrados fueron un incremento en el consumo de combustible de aproximadamente del 20% (Bergpór, 2015) más que un carburador estándar sin embargo no se contó con un control de flujo, tampoco se midió el torque (RPM) ni el flujo de aire, estos son parámetros importantes en el experimento para poder observar mejoras del sistema por ultrasonido con respecto al carburador, otra observación realizada es la limitación del diseño en cuanto a la aerodinámica por donde pasa la mezcla, esto podría repercutir en la calidad de la mezcla generada además del poco control en el diámetro de la gota que se obtuvo.

Del anterior estudio no se pudo concluir una mejora debido a limitaciones en las mediciones sin embargo existe otro en donde se realizaron mediciones de diferentes parámetros. En el estudio se consideraron diferentes ventajas de un sistema de inyección sobre el carburador, esto debido a que actualmente es utilizado el carburador en motores de bajas prestaciones, los carburadores son aplicados por ejemplo en motocicletas por no requerir complejos y costosos sistemas de inyección, por otro lado la utilización de sistemas de inyección directa para los motores de vehículos grandes tiene como consecuencia un incremento en el costo así como en su peso, si estos sistemas de inyección se aplicaran a los vehículos ligeros estos perderían muchas ventajas con las actualmente cuentan.

Debido a esto y que las normas ambientales que exigen la disminución de las emisiones de gases contaminantes se requiere en un futuro mejorar a un sistema barato, de inyección indirecta, sistema de baja presión que pueda desarrollar de manera correcta la atomización y además permitir la estratificación en la combustión, por lo tanto es factible la sustitución del carburador por un sistema ultrasónico para vehículos de dos ruedas.

En el experimento se utilizó un transductor ultrasónico con diámetro de 2.5 cm a una frecuencia de resonancia de 1.65 MHz de  $\pm 5$ , una impedancia de resonancia de  $2 \Omega$  máximo, una capacitancia a 1kHz  $\pm 20\%$  de 2000 pF una cantidad de atomización de  $400 \frac{cc}{Hr}$  y una potencia de 30 W máximo (Saswat, 2013). El experimento se llevó a cabo en un motor de 4 tiempos de un solo cilindro

## Sistema de inyección indirecta de mezclado por ultrasonido

modelo TVS Star City (2010), con un volumen de 110 cc, una relación de compresión de 9.8:1 y con un torque de 8.1 N a 5500 rpm.

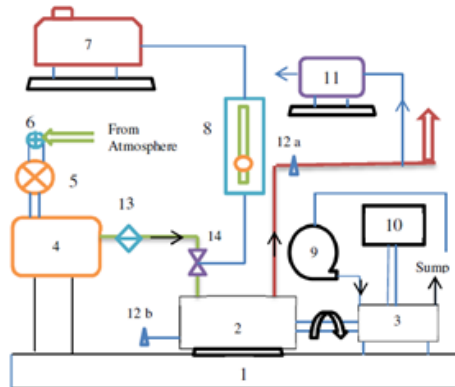


Figura 39. Banco de pruebas [39].

1. Test bed
2. Single cylinder SI engine
3. Dynamometer
4. Surge tank
5. Turbine meter
6. Air filter
7. Fuel tank
8. Fuel meter
9. Water pump
10. Dynamometer control unit
11. DI-Gas Analyser
12. K-type thermocouple (a. exhaust gas and b. lube oil)
13. Flame arrestor
14. Carburetor

El banco de pruebas estaba compuesto por los componentes presentados en la figura 39 con los cuales se realizaron mediciones a distintas velocidades utilizando como comparación al sistema de inyección por carburador y el sistema de inyección por ultrasonido. De estas pruebas se midieron varios parámetros los cuales se observan en la tabla 3 en donde los parámetros medidos fueron torque, presión, energía, eficiencia térmica, gramos de consumo de gasolina por kWh, hidrocarburos, temperatura de los gases de escape y NOx.

Los resultados fueron analizados bajo velocidades constantes comparando las diferentes mediciones usando carburador con el sistema ultrasónico. Se encontró que en general para bajas velocidades el sistema ultrasónico da mejores resultados que el carburador, de estas mejoras se observó una neblina de combustible fina obtenida por el atomizador ultrasónico la cual permite que el motor pueda funcionar con relaciones de aire-combustible muy pobres de hasta 21: 1 debido a la combustión estable y la mejora en la formación de la mezcla y por lo tanto conduce a un aumento en la eficiencia térmica y menor consumo de combustible en el frenado continuo (Saswat, 2013).

*Tabla 3*  
**Datos de la prueba realizada**

Engine speed (rpm)	Fuel introduction type	Measuring Parameters							
		Torque (Nm)	Bmep (bar)	Power (kW)	Thermal efficiency (%)	Bsfc (g/kWh)	HC (ppm)	Exhaust temperature (°C)	NOx (ppm)
2670	Carburetor	5.00	6.15	1.50	21.00	440	285	415	120
	Transducer	6.03	6.89	1.68	28.98	270	271	432	1300
3560	Carburetor	5.11	6.15	1.91	19.50	460	340	425	259
	Transducer	5.20	8.26	1.94	31.50	240	220	525	1353
4272	Carburetor	6.29	7.19	2.81	26.80	320	375	530	753
	Transducer	4.92	5.62	2.21	30.90	260	233	560	1789
4984	Carburetor	5.44	6.33	2.60	22.92	440	258	543	661
	Transducer	4.35	4.97	2.27	29.23	270	254	600	2232

Resultados de las mediciones en las pruebas [79].

En este caso observaron que era de relevancia obtener las curvas de carga y velocidad para mejorar el análisis. Además se concluyó que el sistema de inyección ultrasónico presenta a bajas revoluciones una mejor mezcla en específico por debajo de 5000 RPM (Saswat, 2013) además el sistema resulta económico y parece presentar una alternativa al reemplazo del carburador. De los datos obtenidos en la [tabla 3](#) se concluye que con el sistema ultrasónico se aumentó la cantidad de óxidos de nitrógeno en cualquier velocidad, esto es debido a un aumento en la temperatura y por lo tanto del aumento en la eficiencia térmica lo que se refleja en una mejor combustión, por otro lado en los datos del torque puede verse una disminución a mayores revoluciones y esto puede deberse a una mezcla rica a bajas revoluciones pero como se suministra la misma cantidad de combustible en la mezcla a mayores revoluciones hasta tener una mezcla pobre por lo que al final el torque disminuye. Otra conclusión que se puede obtener de la [tabla 3](#) es que los valores de hidrocarburos del sistema ultrasónico a comparación del carburador son menores.

En los estudios se usaron diversos transductores y se obtuvieron diferentes resultados pero es preciso probar los cristales que actualmente se pueden encontrar en el mercado ya que se podría observar mejoras en los resultados así como mejorar la forma en que se probaron los sistemas de inyección observados como la mejora en aerodinámica para el paso de la mezcla.

## Capítulo 4

### Implementación, diseño y análisis del prototipo de un sistema de inyección por ultrasonido

Como parte principal del presente trabajo se tiene este capítulo en donde se describirá el banco de pruebas así como una reseña que se tuvo desde los primeros diseños y prototipos hasta el prototipo final ensamblado.

#### 4.1 Viabilidad del uso de transductores ultrasónicos

Existe una gran viabilidad comercial en el diseño de un sistema de admisión basado en el ultrasonido debido a su bajo consumo de combustible, es por ello que este trabajo se enfoca en el diseño de dicho sistema. Para la búsqueda de un diseño óptimo del sistema se emplearon y desarrollaron diversos dispositivos así como procedimientos con esto se pretende realizar un análisis inicial de fiabilidad de función (González, 2011).

*Tabla 4*  
Características del motor

Tipo	Gasolina, 4 tiempos OHV forzado por aire
<b>Diámetro y carrera</b>	56,5 x 1,95 pulg.
<b>Cilindrada</b>	124,1 cm <sup>3</sup> (7,57 pulg. <sup>3</sup> )
<b>Relación de compresión</b>	9.0 : 1
<b>Conjunto de válvulas</b>	OHV
<b>Válvula de admisión abre</b>	0° APMS (Levantado a 1 mm)
<b>cierra</b>	30° DPMS (Levantado a 1 mm)
<b>Válvula de escape abre</b>	30° APMS (Levantado a 1 mm)
<b>cierra</b>	0° DPMS (Levantado a 1 mm)
<b>Sistema de lubricación</b>	Presión forzada bañado en aceite
<b>Tipo de bomba de aceite</b>	Trocoidal
<b>Sistema de enfriamiento</b>	Orzado por aire
<b>Sistema de filtrado de aire</b>	Espuma de poliuretano bañada en aceite
<b>Peso en seco del motor</b>	29.8 kg (65,7 lbs)

Características del motor usado en el banco de pruebas <sup>[74]</sup>.

Primeramente se diseñó un banco de pruebas, el cual se basó en el empleo de un motor Honda 125 cc de cuatro tiempos, además se utilizó un analizador de



gases así como una cámara termográfica para identificar las diferentes características de operación.

## 4.2 Banco de pruebas

El banco de pruebas está compuesto de un motor mono cilíndrico de cuatro tiempos, este motor usa un carburador como dosificador de gasolina, adicional a esto el banco tiene una batería, un sistema de control de chispa y regulador para controlar la aceleración del motor.

Como lo indica el manual el motor expide gases peligrosos entre los cuales está el monóxido de carbono, una de las consecuencias que ocasiona el gas es la pérdida de conocimiento e incluso la muerte debida a la combustión incompleta que se genera dentro del motor, algunas de sus características específicas del motor se encuentran en la [tabla 4](#).

El motor presenta una cámara de combustión tipo hemisférica como la mostrada en la [figura 40](#). La cual “posee suficiente espacio para que los orificios de admisión y de escape sean de gran tamaño, esto es, para que el motor tenga un máximo de entrada y salida de gases en cada cilindro; esto produce gran potencia, cuando el motor está muy revolucionado. La bujía colocada en el centro, inflama toda la mezcla combustible en el menor tiempo posible” (MAF, 2009).

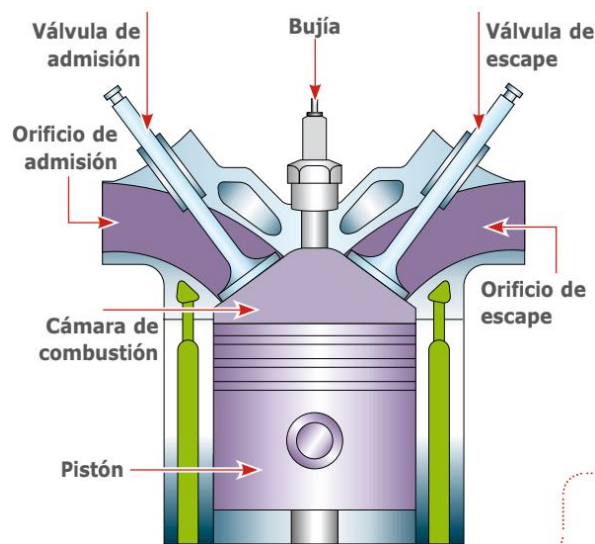


Figura 40. Cámara de combustión tipo hemisférica <sup>[40]</sup>.

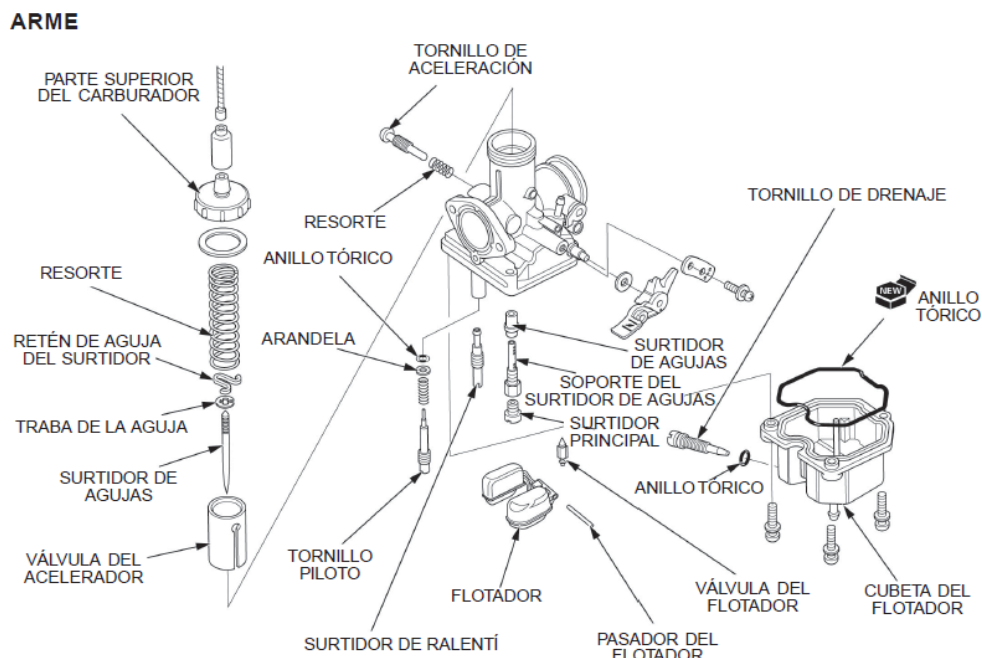
El sistema de inyección que utiliza el motor de pruebas está basado en un carburador simple [figura 41](#), este tipo de sistemas es comúnmente empleado en motores de motocicletas de baja cilindrada. El carburador se compone básicamente de tres partes: un depósito donde se almacena el combustible, un tubo Venturi que acelera el flujo de aire el cual arrastra combustible en su camino



y una cortina o embolo que regula la cantidad de flujo que se dirige hacia la cámara de combustión. Un despiece del modelo empleado en este trabajo es mostrado en la [figura 42](#).



*Figura 41.* Carburador.



*Figura 42.* Montaje del carburador [42].

### Tubo de dilución

Es conocido que los sistemas de admisión basados en carburadores presentan una eficiencia baja en el proceso de la combustión, generándose gases indeseados como lo es el monóxido de carbono (Moto Honda, 2001) como resultado de una combustión incompleta. Al analizar los gases, la generación de

altos valores de los diferentes productos (monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno) podría generar daños al sistema de medición, para solucionar esto, los gases fueron combinados con aire atmosférico mediante la implementación de un tubo de dilución mostrado en la [figura 43](#). El sistema de dilución se basa en ingresar aire limpio mediante un ventilador a una velocidad controlada y realizar una mezcla para medir de manera relativa los valores de gases de efecto invernadero.



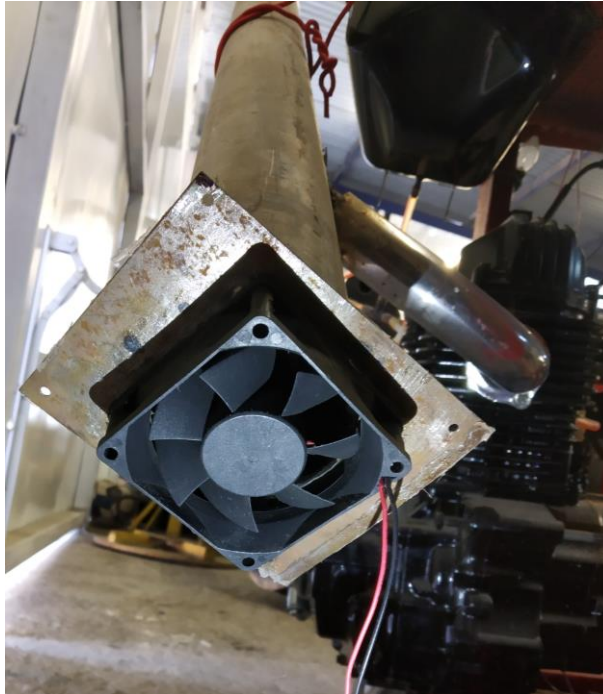
*Figura 43.* Prueba para medir las concentraciones de los gases con el tubo de dilución.

Para implementar el tubo de dilución se utilizó un tubo galvanizado de 90 centímetros con la finalidad de que el aire y los gases expedidos permanezcan el tiempo necesario para mezclarse uniformemente, la unión de ambos se realizó con soldadura de filamento de estaño debido a la composición del tubo. [La figura 44](#) muestra el acoplamiento.



*Figura 44.* Acoplamiento del tubo de dilución al escape del motor.

Finalmente se acopló el ventilador mostrado en la [figura 45](#) que direcciona el flujo de gases hacia una sola salida, con esto también controla también la cantidad de mezclado de aire limpio realizando una mezcla homogénea, el flujo de aire limpio ingresa con cierta presión relacionándose directamente con el voltaje aplicado al ventilador. De la implementación del tubo de dilución se obtuvieron resultados relativos los cuales pudieron ser medidos con el analizador de gases disponible evitando un daño o reducción de la vida del sensor del medidor de partículas.



*Figura 45.* Acoplamiento del ventilador al tubo de dilución.

## Parámetros de medición

Después de las modificaciones realizadas fue posible medir los parámetros adecuadamente, el dispositivo que se utilizó para esto fue el medidor de gases AGS-688 con el cual es posible medir diferentes parámetros como lo son: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y RPM ([figura 46](#)).



Figura 46. Dispositivo analizador de gases AGS-688.

Otro parámetro importante a medir es el gasto de combustible que consume el motor durante el periodo de pruebas ya que con esto es posible comparar de forma cuantitativa el rendimiento del motor con distintos sistemas de inyección. Para medir este gasto se utilizó un dosificador de líquidos el cual se instaló fuera del banco mostrado en la figura 47.



Figura 47. Medidor de gasto.

Adicionalmente para describir el gradiente de temperatura se utilizó una cámara termográfica con la cual se generó un mapa térmico del motor en múltiples puntos y desde distintos ángulos, en la imagen de la figura 48 puede observarse un ejemplo de las mediciones realizadas. Este tipo de información genera una gran idea de toda la energía que es desperdiciada por un motor de combustión interna y la gran necesidad de hacer cada día más eficiente dicho dispositivo.





Figura 48. Cámara termográfica.

### 4.3 Prototipos y pruebas

Como se mencionó anteriormente una de las formas de incrementar la eficiencia en la transformación de energía en un motor de combustión interna, es mejorar el desempeño de sus diversos sistemas que los componen. Este trabajo propone el uso del ultrasonido de potencia y la aerodinámica como una alternativa de incremento en la eficiencia de mezclado en el sistema de admisión.

Para este propósito se han analizado hasta este momento dos propuestas de prototipo basados en dicho fenómeno. El siguiente paso fue proponer, crear y probar posibles diseños y prototipos de sistemas de inyección utilizando transductores ultrasónicos con ayuda de anteriores investigaciones proponiendo mejoras en los diseños o creando nuevos con diferentes ideas, así fue que se obtuvo diversos posibles diseños, modelos en CAD y prototipos algunos de estos son los siguientes:

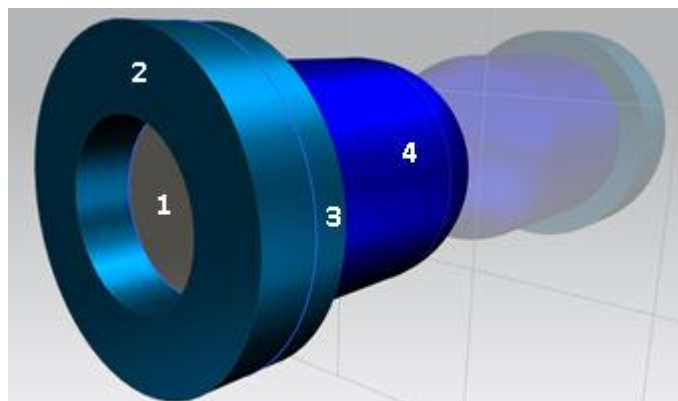
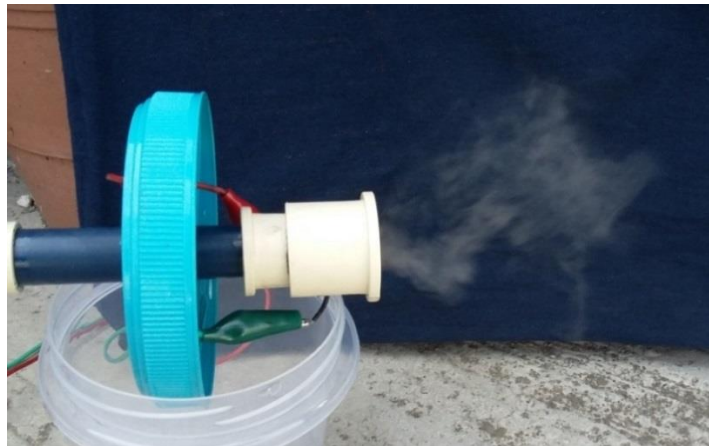


Figura 49. Modelo obtenido por CAD.

1. Transductor

2. Disco sujetador 1
3. Disco sujetador 2
4. Cuba de gasolina

En la [figura 49](#) se muestra un prototipo que sujeta al piezoeléctrico mediante presión posicionándolo entre dos piezas (azul claro 2-3), este sistema teóricamente podrá suministrar la mezcla mediante un transductor con micro poros, este prototipo de sistema de inyección alimentará al motor de forma indirecta. El modelo está conformado por un almacén de gasolina o cuba el cual estará en contacto directo con el transductor alimentándolo continuamente (azul fuerte 4), una de las ventajas de este diseño es el aislamiento de combustible del colector de admisión aumentando la seguridad del dispositivo, además de esto es posible crear mezcla a diferentes posiciones del dispositivo y finalmente alimentar con un gasto constante.



*Figura 50.* Funcionamiento del prototipo.

El prototipo de la [figura 50](#) fue basado en el diseño de la [figura 49](#). Con este sistema se realizó pruebas las cuales consistieron en la utilización de un tubo de Venturi, esto para facilitar la entrada de la mezcla generada en la entrada del motor. Este dispositivo funcionó de manera correcta ya que la gasolina ingresaba a la cámara de combustión ([figura 51](#)) sin embargo aunque suministraba de manera constante el transductor no fue capaz de dosificar a la velocidad requerida por el motor de combustión interna además de esto existían problemas en la retención de mezcla por lo que gran parte se perdía debido a las perturbaciones en el encendido.



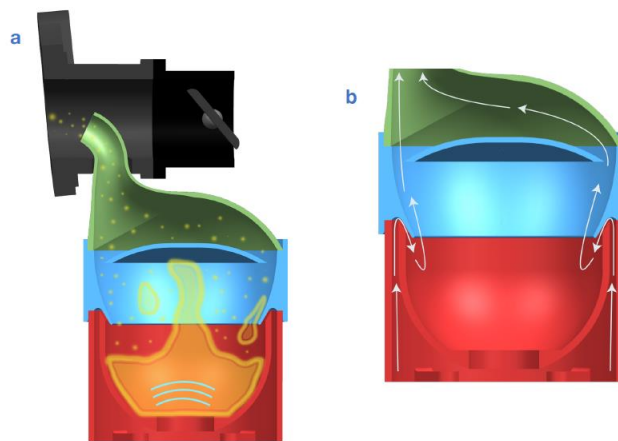
Figura 51. Prueba del prototipo.

Después del anterior prototipo se probó uno nuevo pero ahora utilizando un transductor ultrasónico sumergible debido a que este cristal suministra mayor cantidad de mezcla en el mismo tiempo. Con esto se obtuvo el primer prototipo funcional el cual se puede ver en la figura 52, el dispositivo utiliza un tubo Venturi provocando una diferencia de presión por lo que ingresa cierta cantidad de mezcla al motor. Para el prototipo de la figura 52 en las pruebas realizadas el motor arrancó sin pararse comprobando así la factibilidad del dispositivo. Pero el dispositivo presento un flujo aleatorio además de arrastrar gasolina líquida lo que aceleraba sin control al motor.



Figura 52. Prueba del prototipo.

Otro prototipo realizado es el de la [figura 53](#) el cual selecciona el tamaño de gotas, la separación de gotas es importante ya que este cuenta con un transductor ultrasónico sumergible y los transductores sumergibles realizan la generación rápida de gotas pero como se señaló anteriormente tiene la desventaja de entregar diferentes rangos de gota y lo que se quiere son gotas pequeñas y uniformes. Para el diseño se tomó en cuenta un humidificador en el mercado el cual tiene la capacidad de separar las gotas cuando se forma la mezcla. Debido a su compleja forma del prototipo se optó por realizar la manufactura por adición utilizando nylon, sin embargo este tipo de manufactura tiene defectos como porosidad. Al finalizar la manufactura se realizaron pruebas y se logró encender el motor sin embargo este diseño no contempló el ensamble con el motor ni movimientos generados por el mismo.



*Figura 53.* Funcionamiento del inyector de combustible: (a) atomización y suministro de la neblina al colector de admisión (b) detalle del recorrido del flujo de aire que arrastra la neblina <sup>[53]</sup>.

Una mejora en el diseño ([figura 53](#)) es el mostrado en la [figura 54](#) el cual tomo características del anterior prototipo el cual sería manufacturado de igual forma por adición, se pretendía utilizar el mismo material además se agregaron mejoras al diseño entre las cuales esta una mayor facilidad de extracción de la mezcla disminuyendo el diámetro del plato divisor de gotas (pieza azul 2). Un problema importante que se presentaba en las pruebas fue el control de aire ingresado y por lo tanto la capacidad de volumen en emisión que entregaba, el nuevo diseño cuenta con rendijas que permite el control del volumen de aire ingresado mediante un giro (pieza inferior rojo 3).

El nuevo ensamble cuenta con una sección en donde es posible fijar el inyector (pieza superior azul 5). Parte importante para la seguridad en las pruebas y finalmente una de las partes con mayor cambio es la cuba (pieza verde 1), el propósito de esta sección fue agregar control de flujo y regulación del nivel de la gasolina que ingresa, el diseño se propuso para poder realizar las pruebas de



forma continua ya que no se tuvo un conteo en volumen regulado del anterior diseño cuando se realizaron las pruebas.

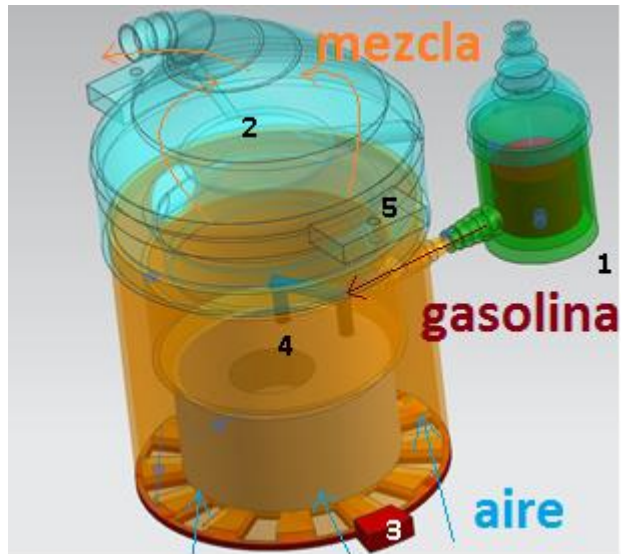
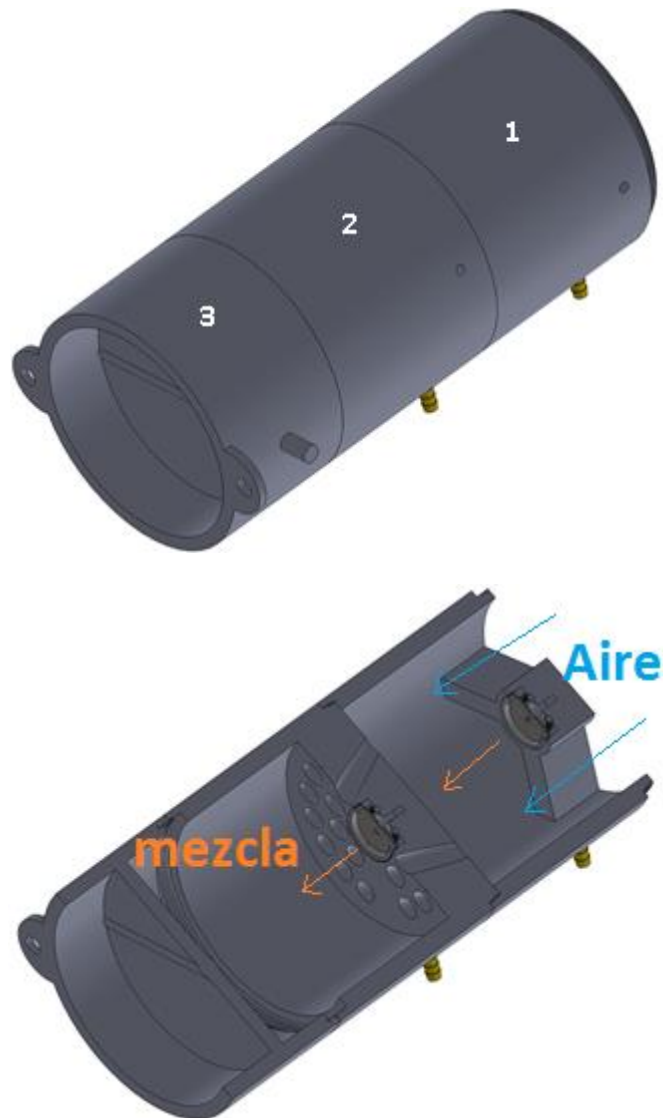


Figura 54. Diseño propuesto para mejorar el inyector de pruebas.

1. Cuba reguladora de nivel
2. Plato divisor de mezcla
3. Disco regulador de flujo de aire
4. Cámara generadora de mezcla
5. Mango sujetador

Este último dispositivo continuo generando un flujo aleatorio de combustible además que la mezcla no se realizó en forma efectiva ni mucho menos controlada.

Una solución para la realización de un prototipo que utilizara transductores ultrasónicos de micro poros fue el diseño de la figura 55 el cual está conformado por 2 piezas las cuales pueden tener un transductor ultrasónico cada una, con lo cual es posible tener un aumento de flujo de mezcla aire-gasolina.



*Figura 55.* Tres piezas del diseño las piezas 1 y 2 sujetan un transductor ultrasónico cada uno y la pieza 3 regula la entrada de mezcla (superior), ensamble del diseño mostrado con un corte a la mitad (inferior).

Este diseño consta de tres piezas cada una con un propósito, la primera de ellas es la entrada de aire con un mínimo de restricción además se crea una primera mezcla, la segunda de ellas usa toberas que convergen en un punto en donde un segundo transductor ultrasónico enriquece más la mezcla, ambas piezas constan de cámaras en donde se mezcla la gasolina las cuales alimentan constantemente la cámara de combustión y también cuentan con un sistema de aislamiento que mantiene a la gasolina separada completamente de la mezcla, finalmente la tercer pieza la cual consta de una mariposa la cual regula la entrada de mezcla a el colector y finalmente los gases terminan su recorrido a la cámara de combustión.

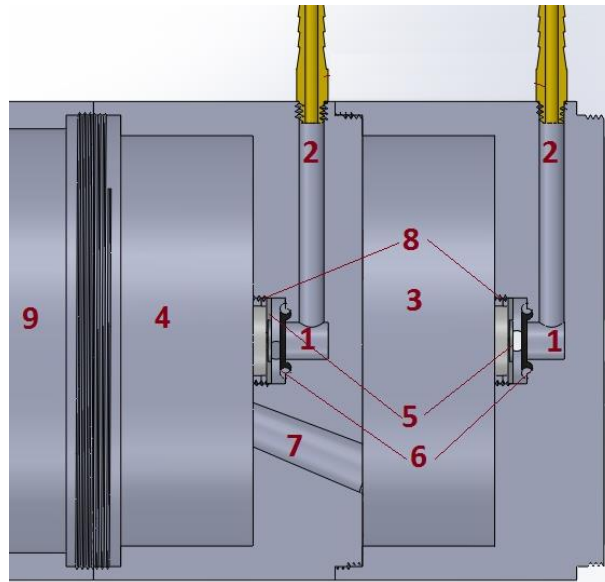


Figura 56. Diseño propuesto para mejorar el inyector de pruebas.

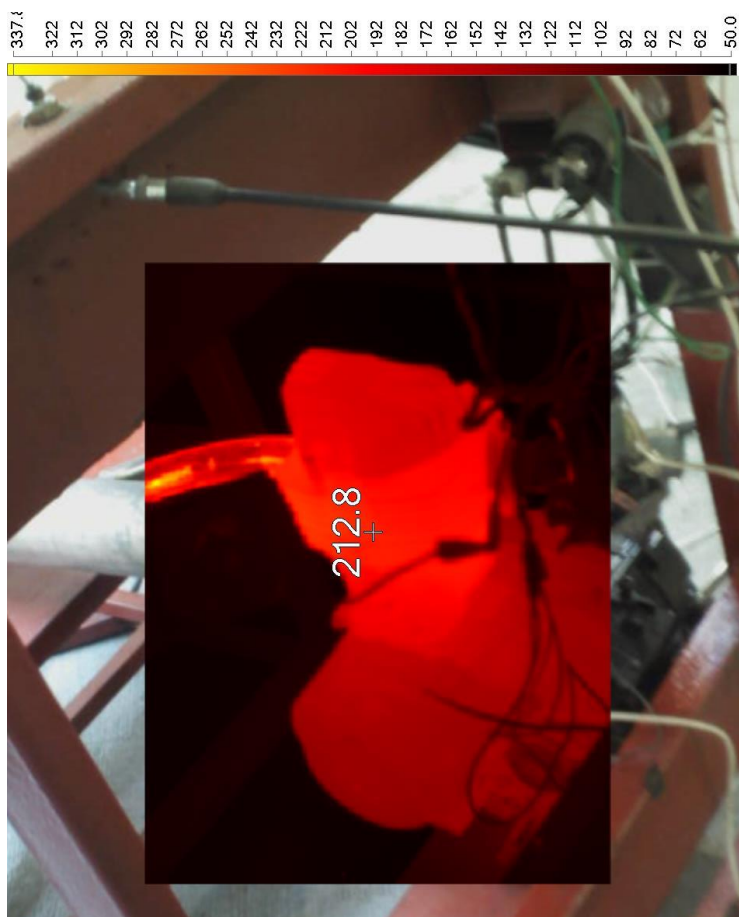
1. Cámara de gasolina
2. Conducto de suministro de gasolina
3. 1ra cámara de generación de mezcla
4. 2ra cámara de generación de mezcla
5. Transductor ultrasónico
6. Sello de la cámara de gasolina
7. Tobera convergente
8. Anillo sujetador
9. cámara de mezclado homogéneo

Las piezas 1 y 2 de la figura 55 se muestran con mayor detalle en la figura 56 en donde las cámaras de gasolina (1) hacen referencia a las secciones que cumplen la función de suministrar gasolina la cual llega desde los conductos de suministro de gasolina (2), por otra parte en las secciones (3) y (4) se encontrará la generación de mezcla y flujo de aire hacia el colector de admisión, la mezcla será suministrada por los dos transductores ultrasónicos (5) los cuales serán sujetos dentro del sistema mediante sello especiales (6) y anillos sujetadores (8), estos impedirán posibles fugas de gasolina. El funcionamiento del sistema estará dado por una entrada de aire el cual pasará de la primera a la segunda pieza mediante toberas (7) estas están diseñadas para trabajar de forma aerodinámica concentrando la entrada de aire hacia la sección de un nuevo enriquecimiento con gasolina (4) después de esto el flujo ingresa hacia la pieza 3 (9) en donde se regulará la cantidad del flujo mediante una mariposa de gases o cuerpo de aceleración.

#### 4.4 Resultados preliminares

Para hacer los nuevos diseños fue fundamental realizar pruebas preliminares con el banco de pruebas y observar los comportamientos en los parámetros en el

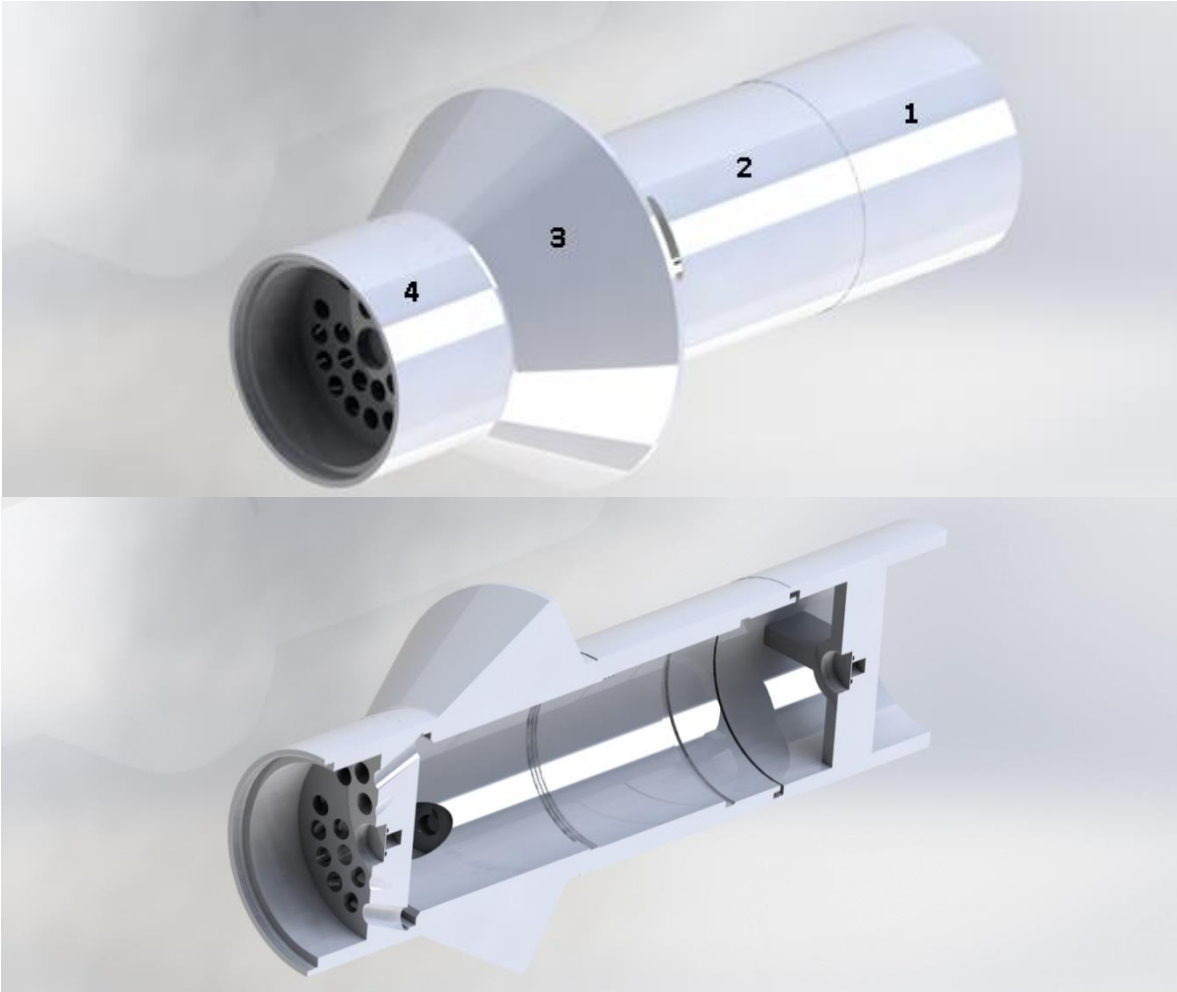
motor de combustión interna utilizando como sistema de alimentación de gasolina al carburador. Uno de los parámetros que se observaron fue la temperatura la cual fue obtenida con una cámara termográfica, el ejemplo de una captura puede verse en la [figura 57](#), el uso del instrumento ayudó a capturar temperaturas de diferentes puntos en la parte exterior de la cámara de combustión, la utilidad de esta prueba radica en determinar de manera cuantitativa una temperatura a la cual empezar las pruebas e iniciar la medición de los gases y residuos de la combustión, para así tener condiciones similares en las pruebas. También de las pruebas se puede observar las pérdidas de calor que finalmente repercuten en la eficiencia del motor, esto conlleva a la necesidad de mejorar los sistemas para utilizar de una mejor manera la energía obtenida de la gasolina.



*Figura 57.* Medición de temperaturas del motor.

Como trabajo se planteó realizar el diseño del prototipo y del cual se obtuvo como resultado el dibujo de la [figura 58](#), el diseño se compone de diferentes piezas manufacturadas en aluminio con diferentes secciones y con una función específica en cada una, en este diseño se tomaron piezas de la [figura 56](#) sin

embargo se adicionaron 2 piezas más la primera es una sección que aumenta la longitud para homogenizar la mezcla (pieza 2) y la segunda es la pieza en donde se concentra la mayor parte de generación de mezcla ya que utiliza 4 transductores ultrasónicos (pieza 3), es importante señalar que las piezas pueden cambiar de posición con el fin de probar su comportamiento bajo diferentes condiciones en la [figura 58](#) puede observarse el nuevo prototipo.



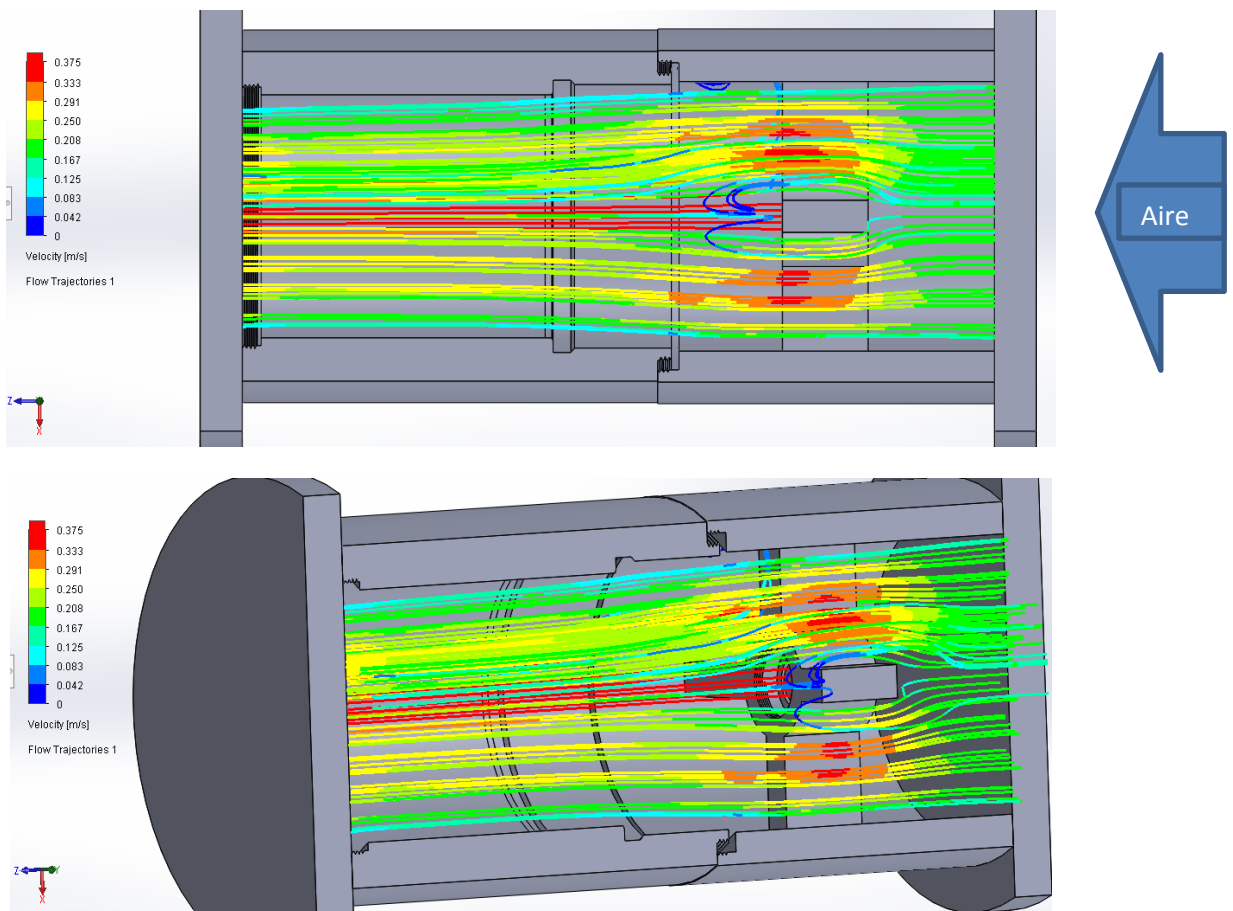
*Figura 58.* Piezas del diseño del sistema de inyección (superior), ensamble de las piezas con un corte medio (inferior).

1. Pieza de entrada de aire
2. Extensión para mezclado
3. Generador de mezcla
4. Pieza concentradora de flujo

#### 4.5 Resultados finales

Para el diseño se realizaron simulaciones de flujo de aire, esto con el objetivo de observar cómo es que se modifican las líneas de flujo en cada sección y como la

mezcla de los componentes se incrementa, para comenzar se realizaron las simulaciones de la [figura 59](#) en donde se realizó la simulación con la pieza 1 en donde entra el aire y puede observarse que se está graficando la velocidad en una escala de colores que va desde 0 [m/s] (azul) a 0.375 [m/s] (rojo). El diseño de este último prototipo se realizó con la finalidad de tener un flujo continuo y uniforme así como aprovechar la aerodinámica para incrementar la eficiencia en el mezclado. En la primera sección del dispositivo ([figura 59](#)) se observa como el flujo presenta un par de recirculaciones lo que ocasiona el mezclado del mismo para después ser re direccionado y acelerado hacia la cámara de combustión por medio del banco de toberas.



*Figura 59.* Simulación de la pieza 1.

En esta última sección, las líneas de flujo son dirigidas hacia un punto debido a la superficie que conduce el flujo y tiene esa forma con el objetivo de concentrar la mezcla hacia la entrada del motor como fue mencionado, en este caso en la [figura 60](#) se puede observar que la velocidad de las líneas de flujo van desde un mínimo de 0 [m/s] (azul) a un máximo de 7.552 [m/s] (rojo), en este caso

hay una zona donde se acelera de manera importante en la zona de las toberas convergentes debido a la reducción de área para finalmente crear un flujo dirigido en donde un último transductor vuelve a enriquecer la mezcla.

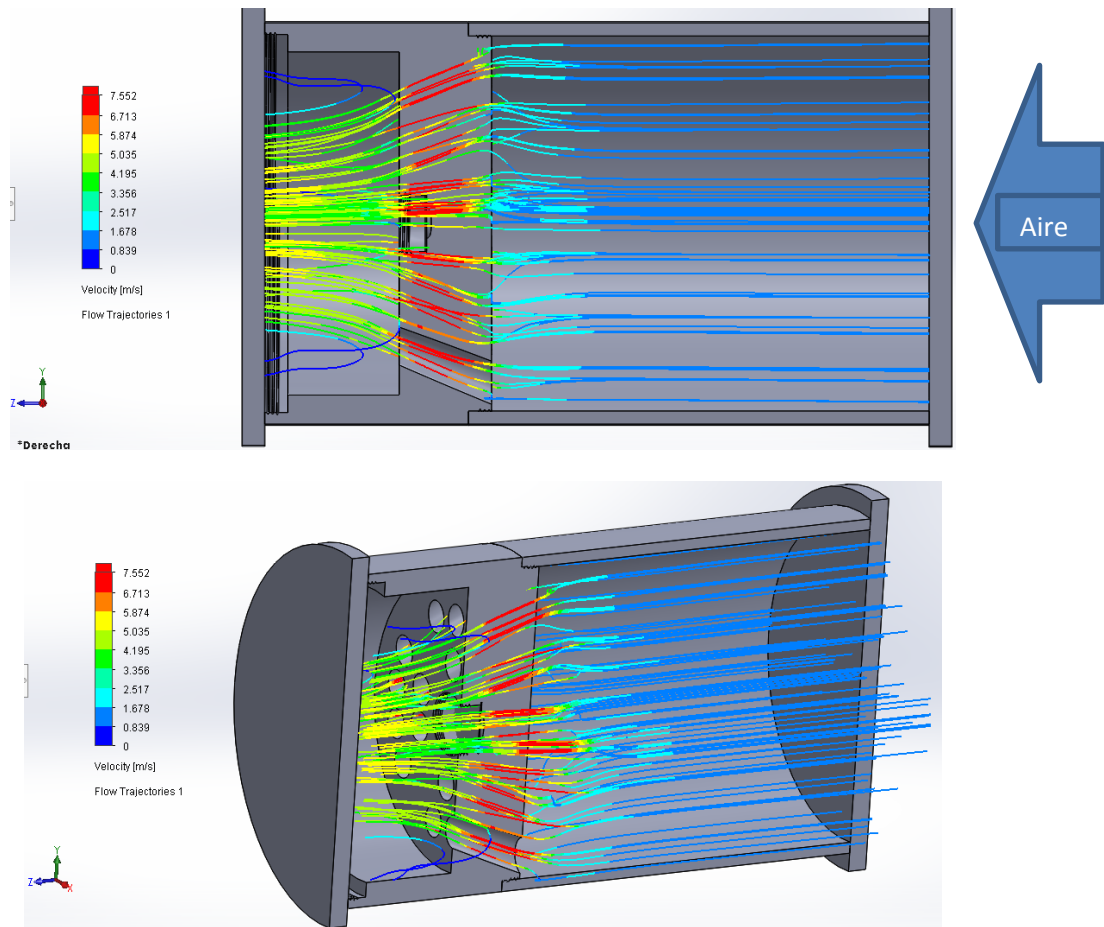


Figura 60. Simulación de la pieza 4.

En ambos casos se utilizó como fluido de trabajo aire en condiciones de gas ideal, además de esto se simuló bajo condiciones sin cambio en la humedad y se representó a las líneas de flujo con 120 líneas en donde se graficaron el ingreso a 3 zonas principalmente, la primera es una entrada de aire, la segunda es la generación de mezcla en la superficie de los transductores y finalmente para ver el comportamiento de la mezcla se graficó los planos planta y vista lateral (figura 61) que son planos ubicados en paralelo al flujo estos dos últimos son los que auxilian para poder observar turbulencias generadas.



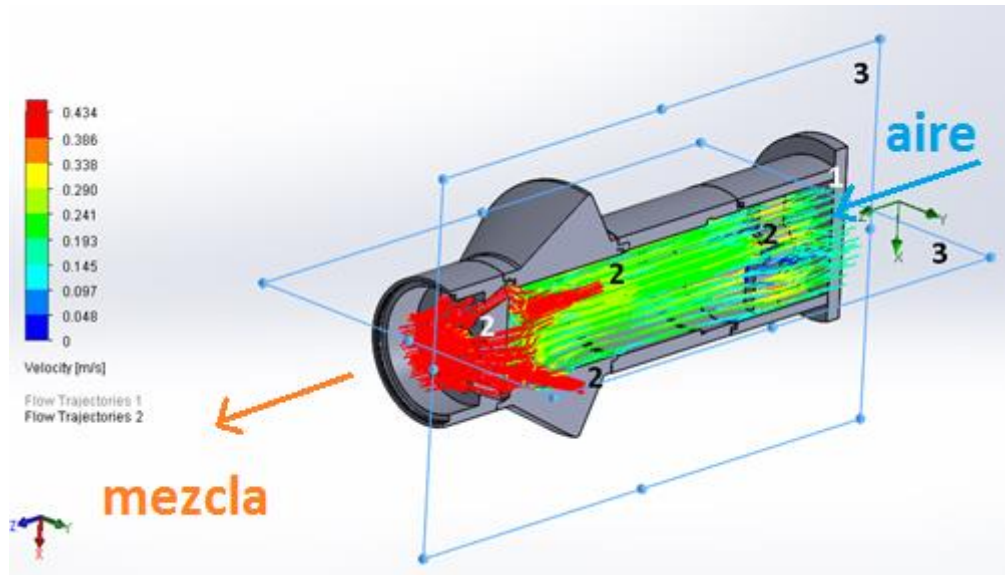


Figura 61. Planos de simulación de flujo.

Con las anteriores simulaciones se comprobó que los flujos de aire se comportan como lo esperado debido a la forma de la manufactura; sin embargo los anteriores análisis fueron individuales siendo necesario hacer la simulación del comportamiento del sistema ensamblado por lo tanto se realizó una última simulación utilizando las mismas condiciones que las anteriores pruebas. En las imágenes de las figuras 62 y 63 se puede observar que se agregaron las piezas 2 que es la extensión para homogenizar la mezcla (pieza 2) así como la pieza 3 que es la que aumenta la cantidad de mezcla de manera considerable con 4 transductores trabajando en paralelo, en cuanto a las líneas de flujo van desde 0 [m/s] (azul) a 0.453 [m/s] (rojo), donde se puede observar un aumento considerable de velocidad es en los puntos de inyección de mezcla y en la sección final debido a las toberas, otra cosa que se puede observar es el mezclado final debido al cruce de las líneas de flujo y finalmente termina en un direccionamiento.



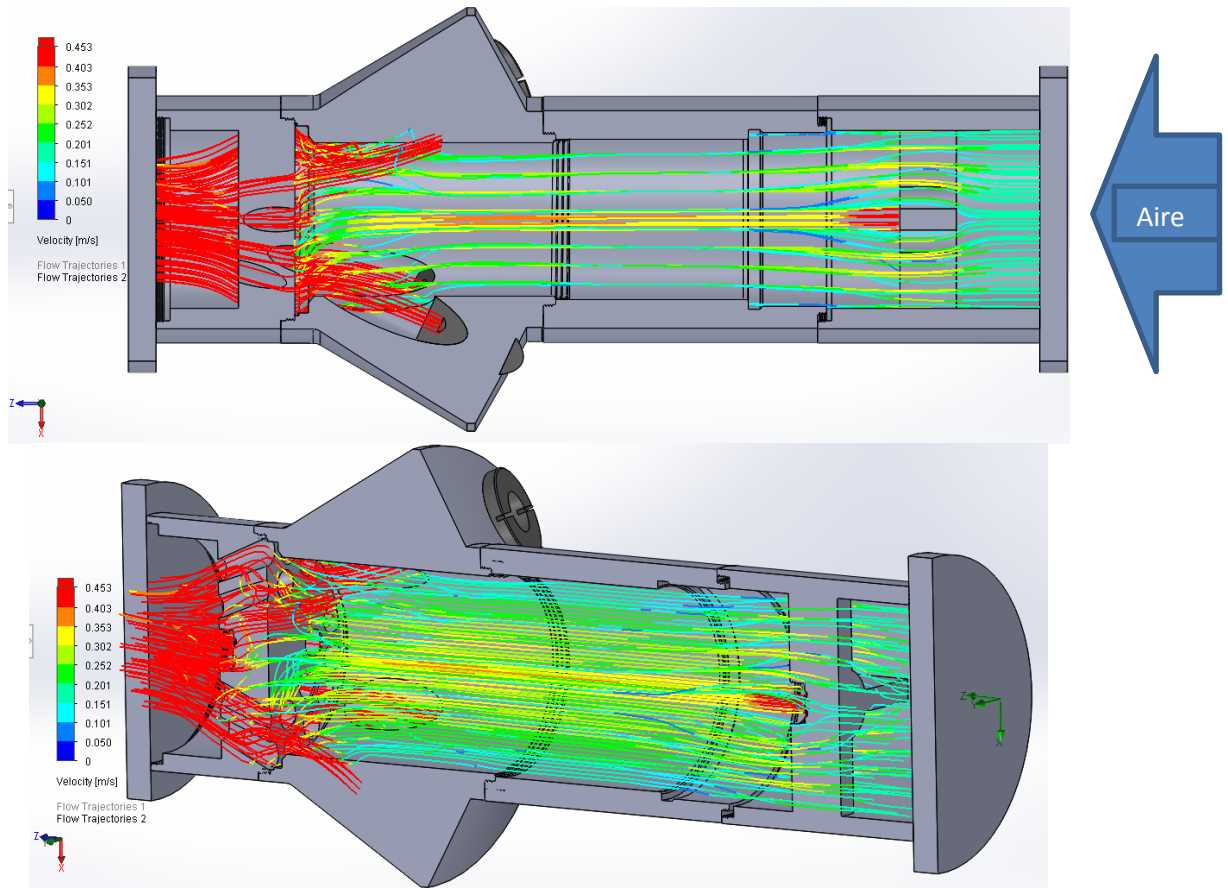
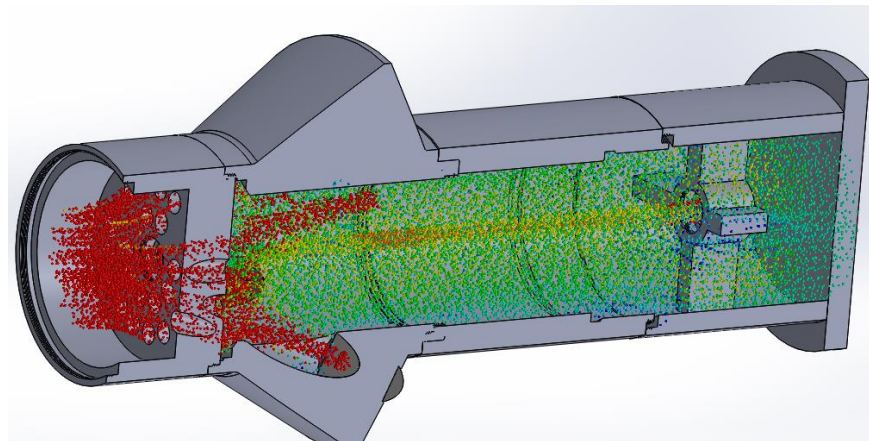
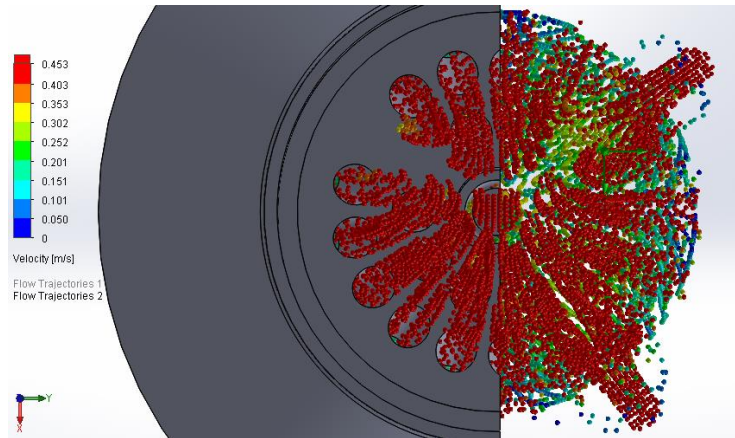


Figura 62. Simulación del ensamble del inyector con líneas.

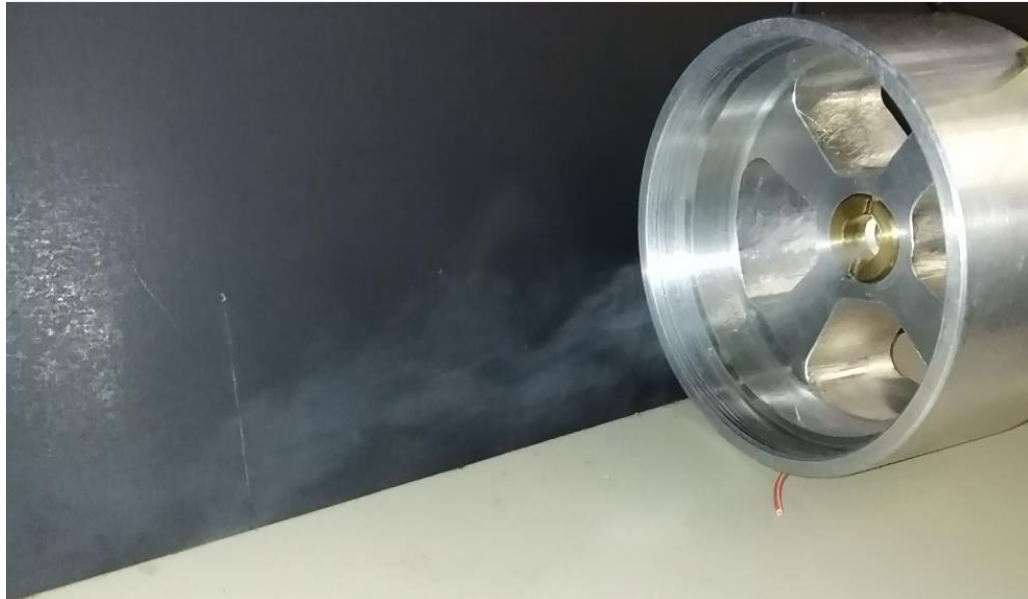




*Figura 63.* En la figura se muestra la simulación del ensamble del inyector representando el flujo con esferas, Diseño con corte medio transversal (superior), diseño con corte en plano medio transversal con vista posterior a la salida del inyector (inferior).

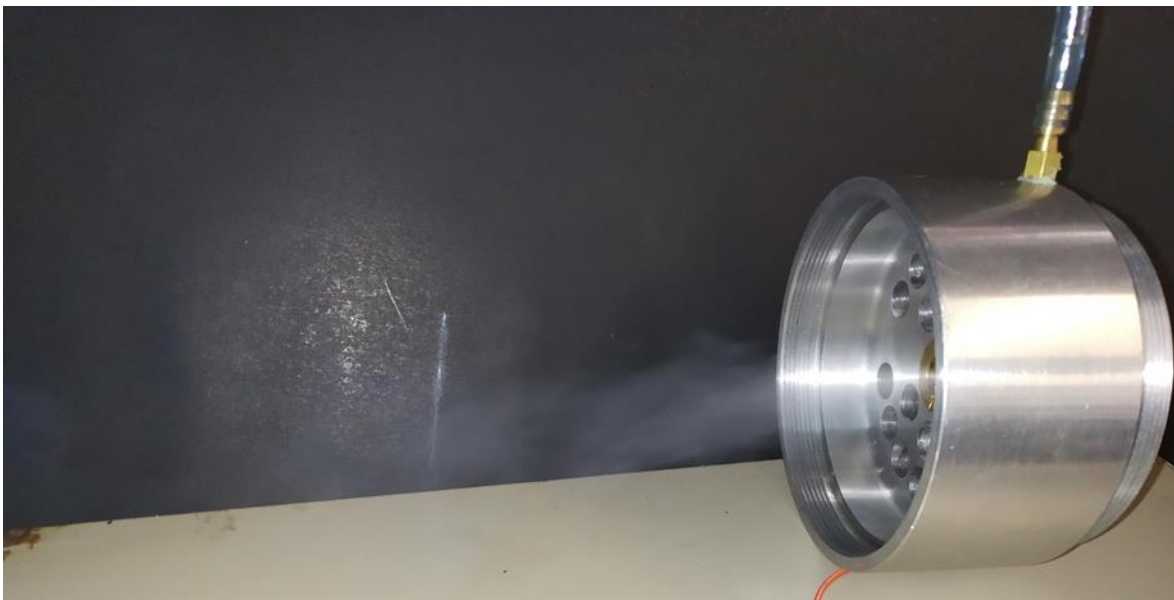
Al realizarse las pruebas físicas de los dispositivos se logró observar algunas líneas de flujo vistas en la simulación con lo que se comprobó lo esperado por el sistema de inyección, en la [figura 64](#) es posible visualizar la dosificación de la pieza 1 y se puede observar cierta turbulencia generada por las corrientes de aire sin embargo es posible visualizar como se direcciona la mezcla.





*Figura 64.* Comportamiento de la neblina con direccionamiento de la pieza 1 (superior), acercamiento (inferior).

Por otro lado en la [figura 65](#) se presenta la pieza 4, esta pieza con toberas convergentes es la que da una atomización final además de direccionar la mezcla generada en las anteriores piezas, en la figura se observa como de manera similar que en la pieza 1 el direccionamiento concentra la gasolina.





*Figura 65.* Comportamiento de la neblina con direccionamiento de la pieza 4 (superior), acercamiento (inferior).

En la [figura anexo 1](#) puede verse el suministro de mezcla por parte de los 4 transductores de la pieza 3 los cuales suministran una mezcla concentrada por otro lado en la imagen de la [figura anexo 2](#) se visualiza como esta concentración de mezcla es parecida a la simulada en donde cada transductor dirige su flujo hacia la parte central, para finalizar las pruebas de visualización se realizaron pruebas con todos transductores encendidos y las piezas conectadas en las [figuras anexo 3](#) y [anexo 4](#) puede verse la concentración de mezcla resultado de este ensamble la cual será ingresada hacia la cámara de combustión de nuevo el direccionamiento es notable aun con las perturbaciones del medio.

Es importante mencionar que en las pruebas de visualización de flujo no se realizó ningún control en cuanto a la entrada de aire por lo que el movimiento o impulso de gasolina que es visible es solo debido al funcionamiento de los transductores y que con un flujo constante es posible que las líneas cambien sin embargo al mejorar el contacto con el aire la gasolina tiende a mezclarse mejor por lo que no sería tan notable este flujo.

Después de la manufactura, se ensambló cada una de sus partes, posterior a esto se prosiguió al acoplamiento con el motor para realizar la prueba de concepto en donde se utilizó una válvula mariposa con el fin de controlar la



entrada de mezcla a la cámara de combustión; el acoplamiento y válvula se ven en la [figura 66](#).



*Figura 66.* Manufactura del acoplamiento y válvula mariposa.

El sistema se ve finalmente acoplado en la [figura anexo 5](#) en donde tiene las conexiones correspondientes de gasolina para su alimentación constante las cuales están directamente conectadas a un contenedor, en la [figura anexo 6](#) puede verse como se armó el banco para las pruebas finales en donde con el control el cual está en la parte superior es posible encender el sistema de inyección.

Al realizar las pruebas con los 6 cristales implementados para la construcción del sistema inyector se logró encender el motor solo por 5 segundos, con lo cual se establece la viabilidad del proyecto, aunado a la necesidad de una calibración del cuerpo de aceleración.

## Capítulo 5

### Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

El desarrollo de los diversos prototipos presentados en este trabajo ha permitido identificar las necesidades y características necesarias para el diseño de un inyector ultrasónico de gasolina.

#### 5.1 Conclusiones

De lo todo lo anterior se puede concluir que a pesar de usar varios transductores la cantidad de mezcla fue deficiente, es posible mejorar el sistema ingresando más mezcla. Por otro lado, al intentar encender el motor se logró encender por unos segundos; de lo anterior también se puede deducir que puede ser un exceso de aire ya que a pesar de que el diseño ya estaba acoplado no cuenta con un sistema que regule la entrada de aire antes de la generación de mezcla.

Los factores de que el motor no presentará un funcionamiento continuo pueden ser diversos, es por eso que es importante seguir investigando y probando su posible utilización con sistema de inyección en motores de gasolina debido a las ventajas de usar este tipo de transductores. Las ventajas de la utilización del sistema ultrasónico en los diversos estudios son:

- Mejora de la mezcla. Comparado con el carburador, el sistema de inyección por ultrasonido disminuye el diámetro de gota y en comparación con la inyección directa, el sistema ultrasónico presenta una atomización parecida pero sin aplicación de altas presiones (Cengiz, 2014).
- El sistema no requiere de altas presiones con lo que la bomba y la energía requerida para su funcionamiento es omitida.
- El costo de los cristales desciende rápidamente mejorando la viabilidad del uso de este en el sistema de inyección. Presenta mayor eficiencia térmica en la cámara de combustión (Saswat, 2013).
- Disminución de los productos de hidrocarburos así como también se espera una disminución de monóxido de carbono esto debido a la mejora de la combustión (Saswat, 2013).
- Aumento de torque cuando el dispositivo realiza la mezcla estequiometrica.

Algunas desventajas de la utilización del sistema ultrasónico en los diversos estudios son:

- Debido a la utilización de transductores comerciales los diseños del inyector del sistema de inyección ultrasónica son grandes a comparación de los inyectores actuales, para obtener un sistema comercial es necesario que sea compacto (Kazuyoshi, 1989).
- Aumento en la emisión de NOx debido a las mayores temperaturas alcanzadas (Saswat, 2013).
- Notable desventaja a revoluciones mayores a 5000 rpm (Saswat, 2013).
- En cuanto al transductor sumergible es necesario tener un nivel constante de gasolina y en un vehículo en movimiento mantenerlo a nivel constante podría ser difícil de conseguir con precisión así que se necesitaría diseñar un sistema electrónico para tener óptimo nivel en todo momento.

Gracias a las anteriores investigaciones que se llevaron a cabo se puede deducir que los cristales presentan ventajas, las cuales pueden aprovecharse para mejorar la mezcla de la gasolina y que se han logrado observar ciertas ventajas sobre un sistema como el carburador como lo es la disminución del monóxido de carbono.

Es importante señalar que este tipo de sistema de inyección tiene el potencial de poder ser utilizado en motores mono cilindro de 75 cc a 300 cc utilizados muy comúnmente en vehículos como motocicletas, esto debido a que el incremento en la venta de este tipo de vehículo se debe a su bajo costo de operación y ligereza ya que actualmente gran parte de estos vehículos ligeros en México usan al carburador para alimentar de mezcla al motor; sin embargo emite altas concentraciones de gases contaminantes. Si se mejorará la mezcla usando los transductores ultrasónicos, el bajo costo del sistema de inyección permitiría seguir con el bajo costo de las motocicletas y con la ventaja de una mayor eficiencia, por otro lado la contaminación por óxidos de nitrógeno se puede resolver con un catalizador especializado, finalmente es importante señalar que debido a los altos índices de emisiones del carburador se debe seguir investigando en alternativas.

De la primera etapa de experimentación en donde se utilizó un transductor ultrasónico sumergible se puede concluir que es posible crear un prototipo para así poder alimentar de mezcla al motor de combustión interna sin embargo tenía algunas desventajas como lo son el bajo control de entrada de aire y la cantidad



de gasolina atomizada, esto era notable debido al incremento de revoluciones en el motor.

En prototipo final el cual utiliza cristales con micro poros presenta algunas ventajas como aislar la gasolina de una posible chispa, de controlar mejor la cantidad de generación de mezcla gasolina-aire así como un mejor control de diámetro de gota. El inyector diseñado no consiguió mantener encendido al motor por lo que es necesario hacer modificaciones para mantenerlo encendido. Al seguir aumentando la cantidad de mezcla es posible encender al motor y las ventajas que se tienen físicamente son fácil mantenimiento, menores piezas y por lo tanto un menor costo desde la manufactura hasta su último día de vida.

### 5.2 Trabajos futuros

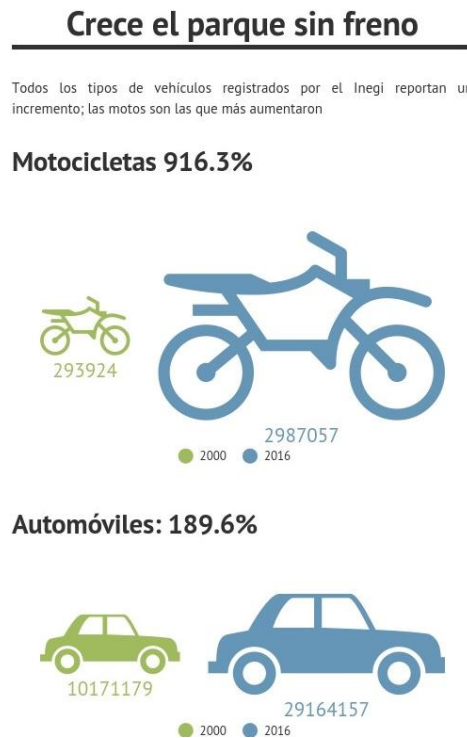
Finalmente es importante señalar que el diseño solo es una prueba de concepto y el trabajo a futuro sigue ya que el sistema de inyección puede mejorarse de manera considerable hasta poder obtener un diseño comercial que tenga como objetivo principal la sustitución del carburador en motores de cilindrada menores a 330 cc, es por eso que el primer paso es lograr mantener la velocidad constante a diferentes valores en un solo motor y como siguiente paso crear sistemas de inyección que puedan generar diferentes gastos para varias cilindradas; por otro lado de las pruebas realizadas se deduce las ventajas en motores sin embargo solo prueban como combustible a la gasolina y existen otras pruebas a realizar; como utilizar al etanol como combustible, el objetivo de estas pruebas es comprobar la factibilidad del nuevo sistema de inyección.

Es importante que en futuros trabajos se tome en cuenta el punto de la simulación de flujo de gases en los sistemas de inyección ya que influye en la aerodinámica y por lo tanto en la calidad de la mezcla; además de la calidad en la mezcla, la aerodinámica también puede dirigir un flujo con el cual se realiza un mejor llenado y un direccionamiento hacia la entrada del motor de combustión.

Además de diseños y prototipos para inyectar el combustible también se propuso la realización de prototipos para la electrónica esto con la finalidad de probar distintos parámetros: cristales, voltajes y frecuencias ya que se cuenta con diferentes cristales con diversas características en el mercado. El objetivo de realizar circuitos es observar las posibilidades entre utilizar cada uno ya que son diferentes físicamente y alguno podría presentar alguna ventaja como por ejemplo mejor relación potencia gasto, velocidad de entrega o control de diámetro de gota, también debido a que son de diferentes frecuencias teóricamente el tamaño de las gotas deberían de ser diferentes y finalmente al probar un diferente voltaje en un

mismo cristal es posible hacer que los cristales entreguen diferente gasto de mezcla sin embargo estas pruebas pueden hacerse en un futuro trabajo.

Los alcances de la tesis son altos debido a las implicaciones en las mejoras en la combustión así como su posible implementación de vehículos ligeros ya que en todas las ciudades en el mundo presentan la tendencia de aumento y por ejemplo en la zona metropolitana a pesar de no ser el parque con mayor cantidad de vehículos su aumento es mucho mayor y la causa de esto es el tráfico en las ciudades, el bajo costo que representa en su manufactura, compra y mantenimiento así como la facilidad en los tramites en la regulación ya que no requiere trámites como verificación para los vehículos, en este caso en la [figura 67](#) se muestra como a pesar del aumento de los automóviles el aumento del parque de motocicletas es mucho mayor. En específico en la zona metropolitana de México existe una tendencia de crecimiento poblacional, en tema de movilidad es reflejado como un incremento en el parque vehicular en específico la ciudad de México el parque vehicular en un futuro incrementara rápidamente según las tendencias en datos recientes.



*Figura 67.* Banco de pruebas <sup>[67]</sup>.

El crecimiento puede verse reflejado en la gráfica de la [figura 68](#) (INEGI, 2019) en donde en el año 2000 se tenían registradas 6,122 unidades mientras que en 2016 aumento a 390,378 unidades representando un incremento de

6,276.6%. Una de las propuestas de la Comisión Ambiental de la Megalópolis ante este incremento es incluir a este tipo de vehículos en el programa de verificación vehicular.

Por otro lado se graficó cada dato de base de datos recolectados por INEGI de motocicletas registradas desde 1980 hasta 2017 y se realizó una regresión polinomial de 5º grado en donde los resultados de las tendencias en el 2020 indican que la cantidad de motocicletas en el estado de México más la zona de la CDMX estaría superando los 1,400,000 aproximadamente por lo que es bastante probable que en un futuro las propuestas de realizar verificación a motocicletas pasen a ser necesarias para controlar las emisiones en esta zona de México.

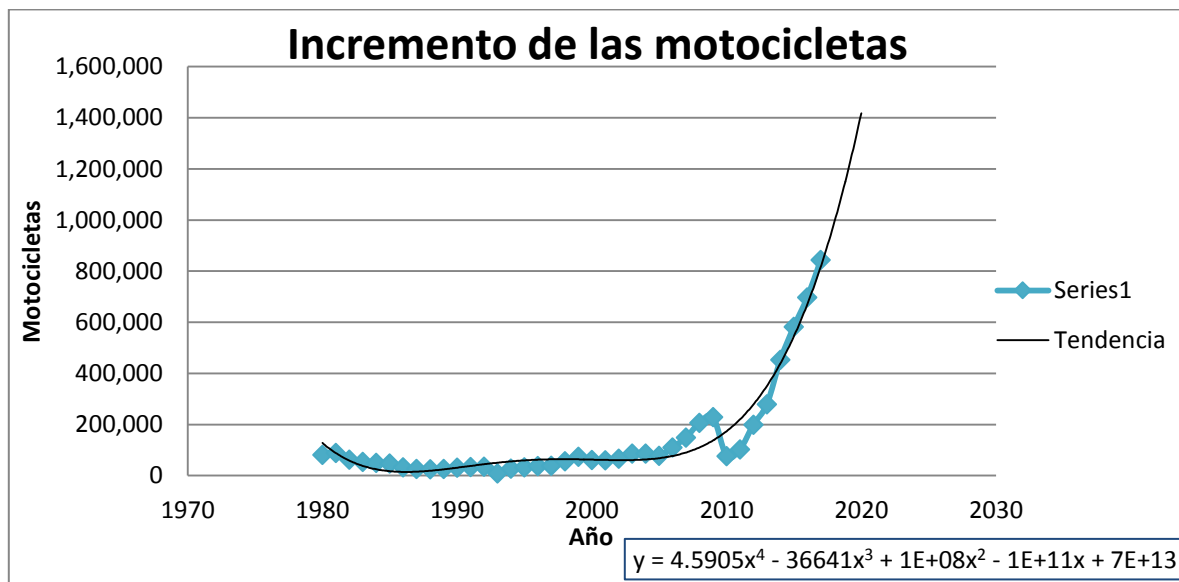


Figura 68. Banco de pruebas.

Por otro lado es importante destacar que tomando en cuenta las personas en promedio que usan los transportes convencionales y las emisiones que expulsan es posible calcular la figura 69 la cual indica que aunque la motocicleta en general consume menos que otros medios de transporte, tener una eficiencia baja y poco control de emisiones la vuelve un foco de contaminación importante.

## Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

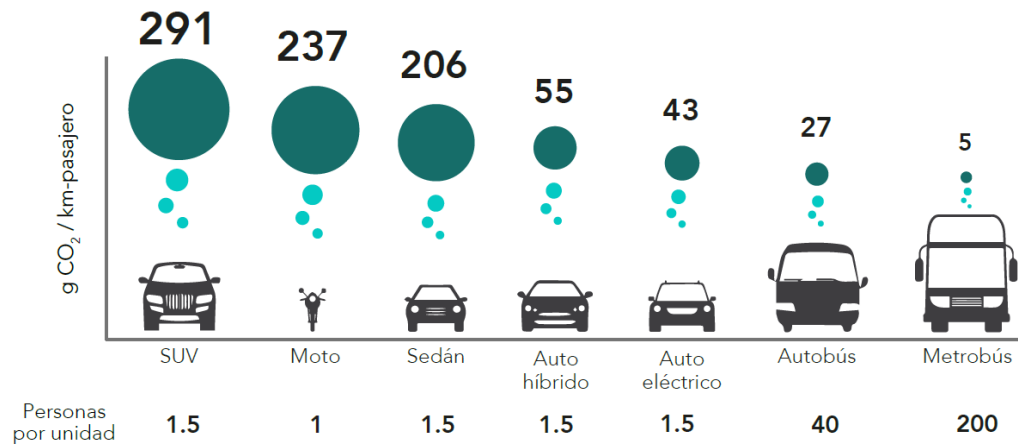


Figura 69. Banco de pruebas [69].

Es debido a las implicaciones del incremento en las motocicletas la importancia del desarrollo de tecnología para la reducción de sus emisiones para así este tipo de vehículo reduzca las emisiones de gases de efecto invernadero sin tener que perder sus ventajas que son su bajo costo, accesibilidad y fiabilidad es por este motivo el sistema de inyección por ultrasonido puede ser una opción a la problemática.

## Bibliografía

- Inventario de emisiones de la CDMX contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero [En línea]. México. 30 de diciembre de 2018  
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/#p=31>.
- Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo.
- Çengel, Y. (2009). Termodinámica. México: Mc Graw Hill.
- Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión [En línea]. México. Consultado el 1 de enero de 2019. Disponible en  
<http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/52>.
- González, D. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo.
- Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 [En línea]. México. 30 de diciembre de 2018  
<http://respiramexico.org.mx/wp-content/uploads/2015/07/proaire2011-2020.pdf>.
- Vehículos de motor registrados en circulación [En línea]. México, INEGI. Consultado el 1 de enero de 2019. Disponible en  
<https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>.
- Águeda Casado Eduardo, Martín Navarro José, Gómez Morales Tomás, García Jiménez José Luis, Gonzalo Gracia Joaquín. (2009). Técnicas básicas de mecánica y electricidad. Madrid, España: Editorial Paraninfo.
- Cárcamo Esteban, García Francisco y Medina Juan. Secuencia cinemática típica en la conducción de motocicletas. [En línea]. México. Universidad Nacional Autónoma de México, 6 de enero de 2019. Disponible en  
<http://oreon.dgbiblio.unam.mx:80/F/BXE3JB7R8D4QQ3S3R1QUY9S7HIVED2QBQLRHI9C91H9E7XI29D->

## Bibliografía

10716?func=service&doc\_library=TES01&doc\_number=000721380&line\_number=0001&func\_code=WEB-FULL&service\_type=MEDIA.

Denton, T. (2017). *Sistemas Mecánico y eléctrico del automóvil. Tecnología automotriz: reparación y mantenimiento de vehículos*: México, Ciudad de México: Alfaomega.

González, D. (2015). *Motores térmicos y sus sistemas auxiliares*. Madrid, España: Paraninfo.

México Digital comunicación. (2009). *Sistema de combustible con carburador e introducción a la inyección electrónica*. México: Editorial Mecánica automotriz Fácil.

México Digital comunicación. (2009). *El Sistema de inyección electrónica y de control de emisiones*. México: Editorial Mecánica automotriz Fácil.

Pérez, Miguel. (2011). *Sistemas auxiliares del motor*. Madrid, España: Editorial Paraninfo.

Cengiz, ÖNER. (2014). The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated by Piezoelectric Ceramic. *PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES*, Vol. 2. doi: 10.21533/pen.

Bergþór Lár Jónsson, Garðar Örn Garðarsson, Óskar Pétursson, Sigurður Bjarki Hlynsson, Joseph Timothy Foley. (2015). Ultrasonic gasoline evaporation transducer—reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design. 9th International Conference on Axiomatic Design. doi: 10.1016/j.procir.2015.07.061.

Kazuo Matsuura, Susumu Nii, Tetsuo Fukazu, and Katsumi Tsuchiya. (2007). Efficient Reduction of Gasoline Volatility through Ultrasonic Atomization. *Ind. Eng. Chem. Res.* Doi: 10.1021/ie0611305.

Kentaro, Nakamura. (2002). *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials)*, United Kingdom: Woodhead Publishing, Ltd.

Saswat Kumar Rout, M. Ajay, T. N. C. Anand. (2013). Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer. India: 23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion (NCICEC 2013).

VALVERDE JOSE ANTONIO, ALSINA JOSE MARIA, CANO JOSE LEON, PEREZ MANUEL MARIA, LUIS DE MIGUEL. (1987). *Gran enciclopedia práctica*

## Bibliografía

Mecánica del automóvil: sistemas de alimentación del motor. España: Editorial Quorum.

Schifter Issac, López Salinas Esteban. (2017). Usos y abusos de las gasolinas. (2 ed.), México: Editorial Fondo de cultura económica.

Fuentes Sergio, Díaz Gabriela. (2013). CATALIZADORES ¿La piedra filosofal del siglo XX?. (3 ed.), México: Editorial Fondo de cultura económica.

México Digital comunicación. (2009). El sistema de encendido electrónico. México: Editorial Mecánica automotriz Fácil.

Torres Gonzáles Esteban Eder. Normatividad nacional e internacional de emisiones contaminantes para vehículos nuevos en planta. [En línea]. México. Universidad Nacional Autónoma de México, 6 de enero de 2019. Disponible en [http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/QMYABJSYI7UUCIMUMG9571VCCFFNJHHBM5DGPBS52PPEGQKFCCHA-50926?func=full-set-set&set\\_number=042363&set\\_entry=000001&format=999](http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/QMYABJSYI7UUCIMUMG9571VCCFFNJHHBM5DGPBS52PPEGQKFCCHA-50926?func=full-set-set&set_number=042363&set_entry=000001&format=999).



## Anexos

### Referencias

#### Introducción

Inventario de emisiones de la CDMX (IECM) contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero. (2018). [En línea]. México. 30 de diciembre de 2018 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventari-o-emisiones-2016/mobile/#p=31> página 35.

Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (ProAire ZMVM). (2017). [En línea]. México. 30 de diciembre de 2018 <http://respiramexico.org.mx/wp-content/uploads/2015/07/proaire2011-2020.pdf> páginas 15, 34, 114.

#### Capítulo 1

González, C. D. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo. Página 323.

INECC. (2017). Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión [En línea]. México. Consultado el 1 de enero de 2019. Disponible en <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/52> página 8.

INEGI. Vehículos de motor registrados en circulación [En línea]. México, INEGI. Consultado el 1 de enero de 2019. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>.

Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (ProAire ZMVM 2011-2020). (Actualización de 2016). [En línea]. México. Consultado el 30 de diciembre de 2018 <http://respiramexico.org.mx/wp-content/uploads/2015/07/proaire2011-2020.pdf> páginas 113.

Salinas, V. A. (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. S. A. Páginas 19, 22, 35.

Universidad Autónoma de Madrid (UAM). MUSEO VIRTUAL [En línea]. Consultado el 1 de enero de 2019. Disponible en [http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias\\_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Otto,%20Nikolaus%20August.xml](http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Otto,%20Nikolaus%20August.xml).

Çengel, Y. A. & Boles, M. A. (2009). Termodinámica. México: Mc Graw Hill. Capítulo 9 paginas 498-500.

## Capítulo 2

Águeda, C. E., Martín, N. J., Gómez, M. T., García J. J. L., Gonzalo G. J. (2009). Técnicas básicas de mecánica y electricidad. Madrid, España: Editorial Paraninfo, pagina 100 capítulo 5.

Cárcamo E., García F. & Medina J. Secuencia cinemática típica en la conducción de motocicletas. (2014). [En línea]. México. Universidad Nacional Autónoma de México, 6 de enero de 2019. Disponible en [http://oreon.dgbiblio.unam.mx:80/F/BXE3JB7R8D4QQ3S3R1QUY9S7HIVED2QBQLRHI9C91H9E7XI29D-10716?func=service&doc\\_library=TES01&doc\\_number=000721380&line\\_number=0001&func\\_code=WEB-FULL&service\\_type=MEDIA](http://oreon.dgbiblio.unam.mx:80/F/BXE3JB7R8D4QQ3S3R1QUY9S7HIVED2QBQLRHI9C91H9E7XI29D-10716?func=service&doc_library=TES01&doc_number=000721380&line_number=0001&func_code=WEB-FULL&service_type=MEDIA) página 17 capítulo 1.

Denton, T. (2017). Sistemas Mecánico y eléctrico del automóvil. Tecnología automotriz: reparación y mantenimiento de vehículos: México, Ciudad de México: Alfaomega, página 190 capítulo 2.

González, D. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo, páginas 331, 334, 336, 342, 351, 387, 403 capítulo 10.

Mecánica automotriz Fácil (MAF<sup>1</sup>). (2009). Sistema de combustible con carburador e introducción a la inyección electrónica. Ecatepec, Estado de México, México: Editorial México Digital comunicación, capítulo 2 páginas 30 y 88.

Mecánica automotriz Fácil (MAF<sup>2</sup>). (2009). El Sistema de inyección electrónica y de control de emisiones. Ecatepec, Estado de México, México: Editorial México Digital comunicación, capítulo 2 páginas 21 y 22.

Pérez, B. M. Á. (2011). Sistemas auxiliares del motor. Madrid, España: Editorial Paraninfo, páginas 74 y 75.

### Capítulo 3

Bergþór Lár Jónsson, Garðar Örn Garðarsson, Óskar Pétursson, Sigurður Bjarki Hlynsson, Joseph Timothy Foley. (2015). Ultrasonic gasoline evaporation transducer—reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design. 9th International Conference on Axiomatic Design. doi: 10.1016/j.procir.2015.07.061 páginas 171, 172, 173.

Burak, T. & Cengiz, Ö. (2014). The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated by Piezoelectric Ceramic. PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES, Vol. 2. doi: 10.21533/pen páginas 15 y 16.

Gallego, J. J. A. & Graff, K. F. (2015). Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound, (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 66), United Kingdom: Woodhead Publishing publications. Páginas 645-646.

Katsumi, T., Kazuo, M., Susumu, N., & Tetsuo, F. (2007). Efficient Reduction of Gasoline Volatility through Ultrasonic Atomization. Ind. Eng. Chem. Res. Doi: 10.1021/ie0611305 página 2233.

Saswat Kumar Rout, M. Ajay, T. N. C. Anand. (2013). Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer. India: 23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion (NCICEC 2013).

### Capítulo 4

Cengiz, Ö. (2014). The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated by Piezoelectric Ceramic. PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES, Vol. 2. doi: 10.21533/pen. Página 16.

González, C. D. (2011). MOTORES: TRANSPORTE Y MANTENIMIENTO DE VEHICULOS -ELECTROMECHANICA DE VEHICULOS AUTOMOVILES, España: Editorial Paraninfo, pagina 52.

INEGI [En línea]. 1 de enero de 2019 Disponible en <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est>.

Kazuyoshi Namiyama, Hiromi Nakamura, Nakuro Kokubo, Daijiro Hosogai. (1989). Development of ultrasonic Atomizer and its Application to S.I. Engines. Detroit, Michigan. International Congress and Exposition. Página 2.

Mecánica automotriz Fácil (MAF). (2009). Sistema de combustible con carburador e introducción a la inyección electrónica. México: Editorial México Digital comunicación, pagina 22.

Moto Honda da Amazonia Ltda. 2001. Manual taller CGL125 1/2/3WH. Honda South America.

Saswat Kumar Rout, M. Ajay, T. N. C. Anand. (2013). Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer. India: 23rdNational Conference on I. C. Engine and Combustion (NCICEC 2013).

## Figuras

### Capítulo 1

[1] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 17, fig. 2.2.

[2] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 17, fig. 2.3.

[3] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 17, fig. 2.4.

[4] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 17, fig. 2.5.

[5] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 18, fig. 2.6.

[6] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 18, fig. 2.7.

[7] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 19, fig. 2.8.

[8] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 19, fig. 2.9.

[9] Antonio Salinas Villar (2007). Motores: mantenimiento de vehículos autopropulsados: electromecánica de vehículos. Thomson Paraninfo. Capítulo 2 página 20, fig. 2.11.

[10] Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016 [En línea]. Consultado el 30 de diciembre de 2018 recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/inventario-emisiones-2016.pdf>. Introducción página 31 fig. 1.

## Capítulo 2

[12] Denton Tom. (2017). Sistemas Mecánico y eléctrico del automóvil. Tecnología automotriz: reparación y mantenimiento de vehículos: México, Ciudad de México: Alfaomega. Capítulo 2, página 190, fig. 2.223.

[13] Cárcamo E., García F. & Medina J. Secuencia cinemática típica en la conducción de motocicletas (tesis de pregrado). [En línea]. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado el 6 de enero de 2019. Disponible en [http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/P5FPVKQPADJD3PUVN4XJUNUJV1L5A12DA6F27DI5UY3FGPCV2I-24937?func=find-b&request=Secuencia+cinem%C3%A1tica+t%C3%ADpica+en+la+conducci%C3%B3n+de&find\\_code=WRD&adjacent=N&local\\_base=TES01&x=0&y=0&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/P5FPVKQPADJD3PUVN4XJUNUJV1L5A12DA6F27DI5UY3FGPCV2I-24937?func=find-b&request=Secuencia+cinem%C3%A1tica+t%C3%ADpica+en+la+conducci%C3%B3n+de&find_code=WRD&adjacent=N&local_base=TES01&x=0&y=0&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=) Capítulo 1, página 17, fig.10.12.

[14] [En línea]. Consultado el 31 de agosto de 2018. Disponible en [http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Fluidos2\\_mm%20\(1\).pdf](http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Fluidos2_mm%20(1).pdf), página 6.

[15] David González Calleja Gonzáles. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo. Capítulo 10 pagina 333, fig. 10.21.

[16] [En línea]. Consultado el 03 de septiembre de 2018. Disponible en <http://www.aficionadosalamecanica.net/carburador4>.

[17] Robert Bosch, S. de R. L. de C.V. (SN). Sistemas de Inyección Electrónica. México, D.F. Consultado el 19 de febrero de 2019. Bosch Capítulo 2 página 3. Recuperado de [http://www.boschautopartes.com/media/la/aa\\_sites\\_la/products\\_and\\_services/auto\\_motive\\_parts/gasoline\\_1/download\\_5/HIRES\\_PDF\\_59963.pdf](http://www.boschautopartes.com/media/la/aa_sites_la/products_and_services/auto_motive_parts/gasoline_1/download_5/HIRES_PDF_59963.pdf).

[18] David González Calleja Gonzáles. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo Capitulo 10 pagina 351, fig. 10.54.

[19] Robert Bosch Ltda. (SN). Sistemas de Inyección Electrónica. Via Anhanguera, Brasil: Bosch página 3. Consultado el 20 de febrero de 2019. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14380820/sistemas-de-inyeccion-electronica-bosch-service-peru>.

[20] Robert Bosch, S. de R. L. de C.V. (SN). (2015). Inyección Electrónica. México, D.F.: Bosch página 6. Consultado el 19 de febrero de 2019. Recuperado de <https://docplayer.es/12154633-Indice-seccion-a-seccion-b-informacion-tecnica-366-ordenes-de-encendido-371-notas-seccion-c-bosch-automotive-aftermarket.html>.

[21] Robert Bosch Ltda. (SN). Sistemas de Inyección Electrónica. Via Anhanguera, Brasil: Bosch página 3. Consultado el 20 de febrero de 2019. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14380820/sistemas-de-inyeccion-electronica-bosch-service-peru>.

[22] Robert Bosch, S. de R. L. de C.V. (SN). Sistemas de Inyección Electrónica. México, D.F.. Consultado el 19 de febrero de 2019. Bosch Capítulo 2 páginas 5. Recuperado de [http://www.boschautopartes.com/media/la/aa\\_sites\\_la/products\\_and\\_services/auto\\_motive\\_parts/gasoline\\_1/download\\_5/HIRES\\_PDF\\_59963.pdf](http://www.boschautopartes.com/media/la/aa_sites_la/products_and_services/auto_motive_parts/gasoline_1/download_5/HIRES_PDF_59963.pdf).

[23] David González Calleja Gonzáles. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo Capitulo 10 pagina 389, fig. 10.114.

[24] [En línea]. México. 17 de agosto de 2018 Disponible en <https://carros.uol.com.br/colunas/alta-roda/2013/10/09/brasil-tem-tecnologia-so-falta-usa-la-no-carro-nacional.htm>.

[25] Robert Bosch Ltda. (SN). Sistemas de Inyección Electrónica. Via Anhanguera, Brasil: Bosch página 8. Consultado el 20 de febrero de 2019. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14380820/sistemas-de-inyeccion-electronica-bosch-service-peru>.

[26 a] [En línea]. Consultado el 9 de septiembre de 2018. Disponible en <https://www.boschautoparts.com/en/auto/fuel-injectors/gasoline-direct-injection>.

[26 b] [En línea]. Consultado el 4 de enero de 2019 Disponible en <https://www.tomorrowstechnician.com/bosch-celebrates-40th-anniversary-of-fuel-injection/>.

[27] David González Calleja Gonzáles. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid, España: Paraninfo Capitulo 10 pagina 414, fig. 10.147.

### Capítulo 3

[28] Arimex 16 de febrero del 2019 Imagen proporcionada por el proveedor en [http://arimex.es/product/show/humidificador\\_agua\\_aire\\_comprimido\\_fog\\_system/355](http://arimex.es/product/show/humidificador_agua_aire_comprimido_fog_system/355).

[29] Kentaro Nakamura. (2002). Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials), United Kingdom: Woodhead Publishing, Ltd. Página 646.

[30] Saswat Kumar Rout, M. Ajay, T. N. C. Anand. (2013). Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer. India: 23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion (NCICEC 2013).

[31] Nano Novedad mundial para partículas finas con mínima muestra y gran rendimiento!. Catalogo Nano spray dryer B-9. Consultada el 19 de febrero de 2019. Imagen proporcionada por el proveedor en <http://www.laboaragon.com/docs/marcas/buchi/Nano%20Spray%20Dryer.pdf> página 4.

[32] L. Allocca, S. Alfuso, L. Marchitto, G. Valentino. "GDI Multi-Hole Injector: Particle Size and Velocity Distribution for Single and Jet-to-Jet Evolution Analysis" 11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Vail, Colorado USA, July 2009.

[33] L. Allocca, S. Alfuso, L. Marchitto, G. Valentino. "GDI Multi-Hole Injector: Particle Size and Velocity Distribution for Single and Jet-to-Jet Evolution Analysis"



11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Vail, Colorado USA, July 2009.

[34] Cengiz ÖNER, Burak TANYERİ. (2014). The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated by Piezoelectric Ceramic. PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES, Vol. 2. doi: 10.21533/pen página 15.

[35] Cengiz ÖNER, Burak TANYERİ. (2014). The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated by Piezoelectric Ceramic. PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES, Vol. 2. doi: 10.21533/pen página 16.

[36] Cengiz ÖNER, Burak TANYERİ. (2014). The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated by Piezoelectric Ceramic. PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES, Vol. 2. doi: 10.21533/pen página 16.

[37] Bergþór Lár Jónsson, Garðar Örn Garðarsson, Óskar Pétursson, Sigurður Bjarki Hlynsson, Joseph Timothy Foley. (2015). Ultrasonic gasoline evaporation transducer—reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design. 9th International Conference on Axiomatic Design. doi: 10.1016/j.procir.2015.07.061 página 170.

[38] Bergþór Lár Jónsson, Garðar Örn Garðarsson, Óskar Pétursson, Sigurður Bjarki Hlynsson, Joseph Timothy Foley. (2015). Ultrasonic gasoline evaporation transducer—reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design. 9th International Conference on Axiomatic Design. doi: 10.1016/j.procir.2015.07.061 página 170.

[39] Saswat Kumar Rout, M. Ajay, T. N. C. Anand. (2013). Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer. India: 23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion (NCICEC 2013).

#### Capítulo 4

[40] México Digital comunicación. (2009). Sistema de combustible con carburador e introducción a la inyección electrónica. México: Editorial Mecánica automotriz Fácil, página 22.

[42] MANUAL TALLER: Moto Honda da Amazonia Ltda. 2001. Manual taller CGL125 1/2/3WH. Honda South America.

[53] Esquivel, H. R. C. (2018). Desarrollo de un inyector ultrasónico de gasolina (tesis de pregrado). México. [En línea]. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado el 1 de enero de 2019. Disponible en [http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/R4NTLK2SDB3GUJ426LYJCQPAKGD92LCR5G8DD5D682VA1L4KX4-01582?func=find-b&request=Desarrollo+de+un+inyector+ultras%C3%B3nico+de+gasolina&find\\_code=WRD&adjacent=N&local\\_base=TES01&x=0&y=0&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/R4NTLK2SDB3GUJ426LYJCQPAKGD92LCR5G8DD5D682VA1L4KX4-01582?func=find-b&request=Desarrollo+de+un+inyector+ultras%C3%B3nico+de+gasolina&find_code=WRD&adjacent=N&local_base=TES01&x=0&y=0&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=).

## Capítulo 5

[67] [En línea]. 1 de enero de 2019 Disponible en <https://www.arenapublica.com/articulo/2017/09/12/7206/el-boom-de-las-motocicletas-en-el-pais-aumenta-900-en-16-anos>.

[69] Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016 [En línea]. México. 30 de diciembre de 2018 <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/inventario-emisiones-2016.pdf>, página 41.

## Tablas

### T1

Fuente: Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016 [En línea]. Consultado el 30 de diciembre de 2018 recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/inventario-emisiones-2016.pdf>, capítulo 2 página 40, fig. 5.

### T2

Fuente: David González Calleja Gonzáles. 2015. Motores térmicos y sus sistemas auxiliares, información simplificada de las páginas 391-395.

### T3

Fuente: Saswat Kumar Rout, M. Ajay, T. N. C. Anand. (2013). Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer. India: 23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion (NCICEC 2013) tabla 3.

### T4

Fuente: MANUAL TALLER: Moto Honda da Amazonia Ltda. 2001. Manual taller CGL125 1/2/3WH. Honda South America.

Anexo de figuras

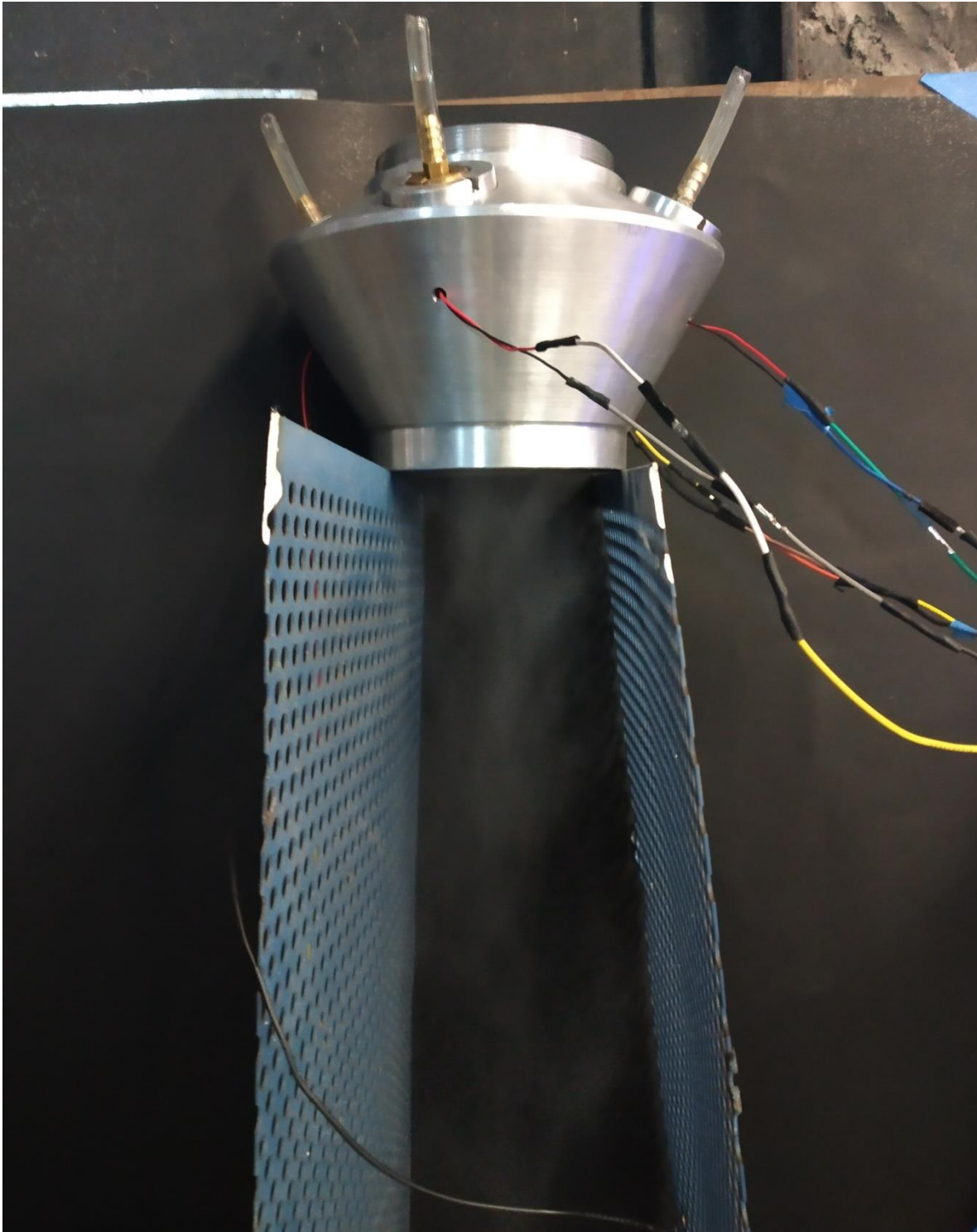


Figura anexo 1. Suministro de neblina de la pieza 3

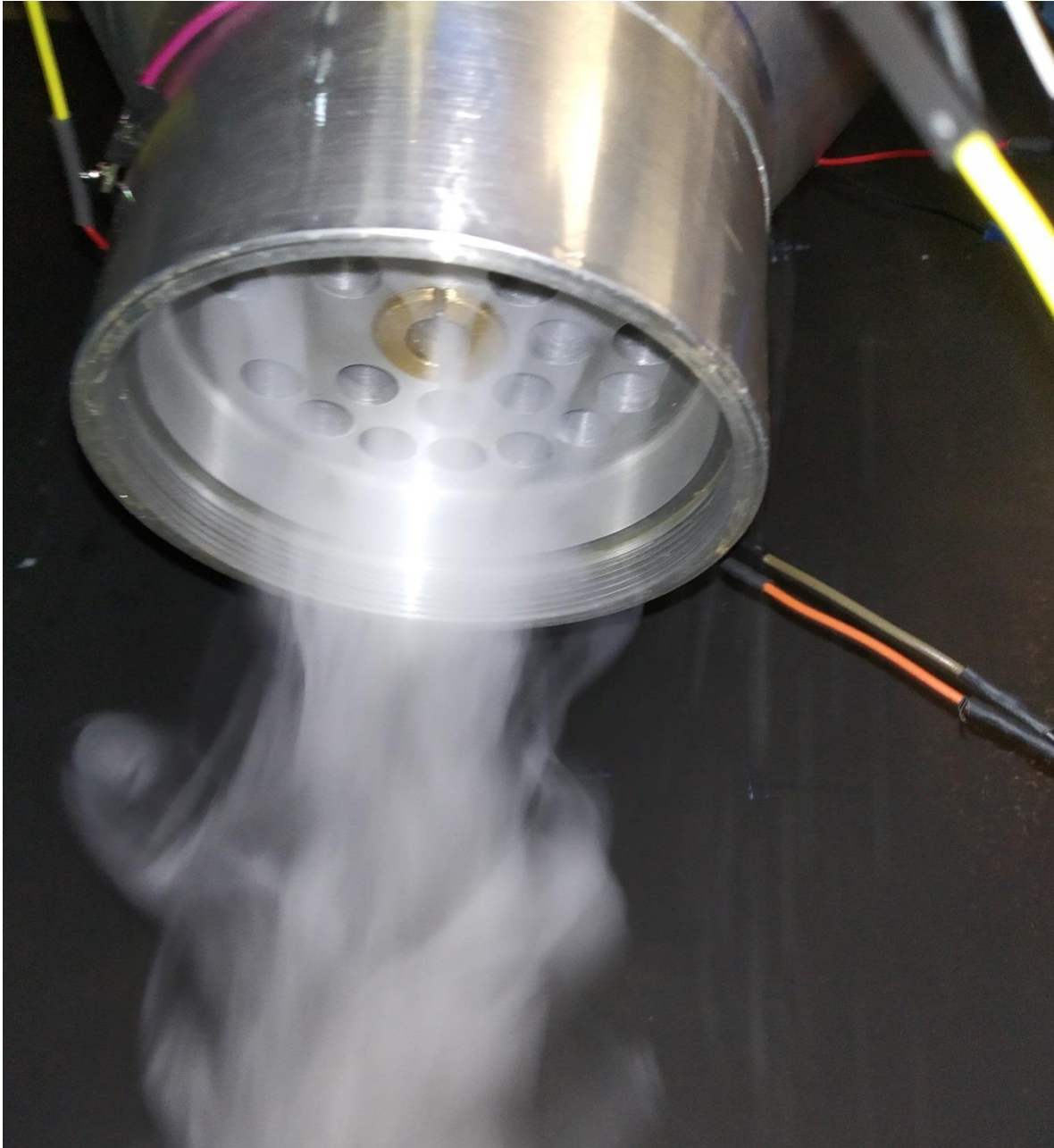


*Figura anexo 2.* Vista superior donde 4 transductores se encuentran funcionando en la pieza 3.



*Figura anexo 3.* Funcionamiento de sistema acoplado.



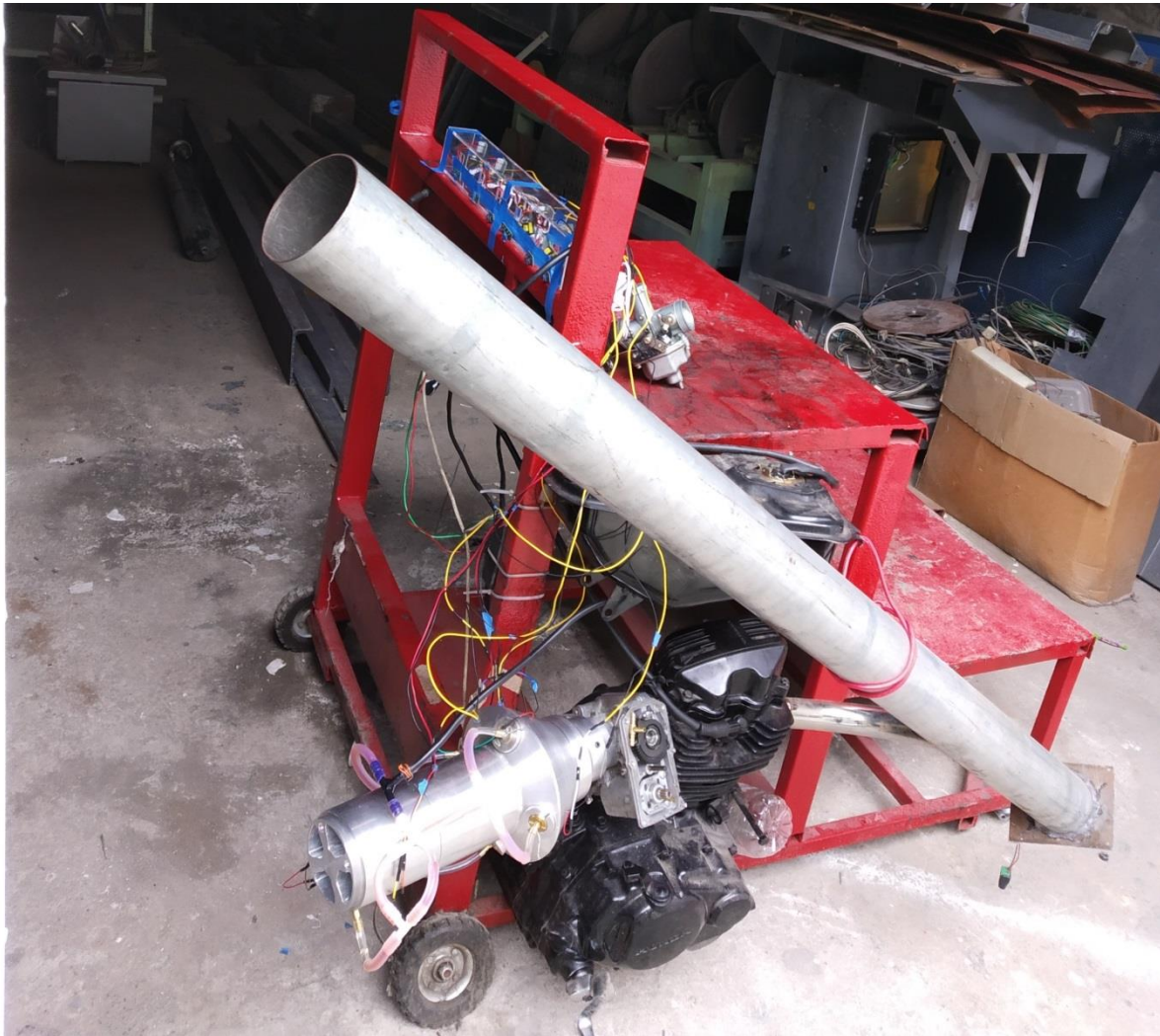


*Figura anexo 4.* Funcionamiento del sistema y concentración de la mezcla.



*Figura anexo 5.* Manufactura del sistema de inyección.





*Figura anexo 6.* Banco con el sistema acoplado.