



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Desarrollo de un inyector ultrasónico de gasolina**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

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

Rubén Carlos Esquivel Hernández

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Milton Carlos Álvarez Sánchez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



## Abstract

Fuel prices and strict emission-control legislations worldwide urge making internal combustion engines more efficient and less pollutant. High power ultrasonic waves can atomize a liquid into a fine mist with a droplet diameter tunable by frequency and a flow rate determined by wave amplitude. We study the emission benefits of ultrasonic indirect fuel injection whose advantages—compared to commercial injection—are a micrometric droplet with a narrow diameter distribution and an electronic driver instead of a high-pressure pump. We select a suitable piezoelectric transducer and develop a prototype fuel injector to evaluate the performance in a Honda 125 test engine against its original carburetor. We observe less  $CO_2$  and  $CO$  emissions while we have an increase in  $HC$  emissions because our combustion occurs with a lean  $AFR > 21$  mixture.

ultrasonic  
indirect fuel  
injector



## Agradecimientos

La culminación del presente trabajo es el reflejo del esfuerzo de dos vidas, las de quienes siempre me han respaldado y motivado: mis padres Elvia y Carlos. Por su comprensión, tolerancia, amor, apoyo y por la educación que me han procurado, gracias.

A los amigos que me han motivado, comprendido y ayudado a lo largo de este satisfactorio camino, gracias. Ha sido invaluable la experiencia de poder crecer juntos y no puedo esperar por los éxitos que vienen.

A los profesores y maestros que he tenido a lo largo de mi vida, que me han motivado e impulsado a superarme, así como han inculcado en mí el amor al conocimiento y la responsabilidad por dejar tras de mi trabajo un mundo mejor. Gracias.

Por su ayuda, su asesoría y darme la oportunidad de unirme a su equipo, quiero agradecer a los miembros del UNICE, gracias a ustedes fue posible implementar el presente proyecto.

Por la oportunidad de colaboración y desarrollo quiero agradecer al Instituto de Ingeniería y a todos aquellos miembros cuya labor permitió la consumación del presente proyecto: a mi tutor el Dr. Milton Álvarez y al Dr. William Vicente de CIPIA por su mentoría y disposición, a Héctor Iván Centeno de Proyectos PAPIME por su continuo apoyo y asesoría como becario del Instituto y en los procesos de compras, a Josefina Elizabeth Plata García de Unidad de Servicios de Información por su apoyo en la búsqueda de información bibliográfica.

Por abrirme las puertas a su laboratorio y apoyarme en la manufactura del prototipo, agradezco al Dr. Fernando Pérez Escamiroso del Departamento de Cirugía de la Facultad de Medicina.

Un especial agradecimiento a la UNAM, a proyectos PAPIIT y 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.



*Toda la verdad es una. Bajo esta luz colaboren ciencia y religión para la constante evolución de la humanidad de la oscuridad a la luz; del prejuicio a la tolerancia; de la estrechez a la apertura de mente.*

*Es la voz de la vida quién nos llama a venir y aprender.*

Inscripción en las campanas del reloj de Hayes Hall



# Contenido

Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xi
Introducción	1
<b>1 Inyección de gasolina</b>	<b>7</b>
1.1 Motores de gasolina . . . . .	7
1.2 Ciclo de carga . . . . .	7
1.3 Combustión . . . . .	11
1.4 Emisiones . . . . .	13
1.5 Mejoras a la inyección . . . . .	16
<b>2 Atomización ultrasónica</b>	<b>19</b>
2.1 Atomizadores . . . . .	19
2.2 Ultrasonido de potencia . . . . .	20
2.3 Atomización acústica . . . . .	24
2.4 Generador ultrasónico . . . . .	26
2.5 Selección del sonotrodo . . . . .	31

3 Implementación del inyector ultrasónico	35
3.1 Banco de pruebas . . . . .	35
3.2 Sistema de muestreo . . . . .	40
3.3 Inyector ultrasónico . . . . .	41
4 Desempeño del inyector ultrasónico	51
4.1 Experimento . . . . .	51
4.2 Resultados y discusión . . . . .	54
4.4 Conclusiones . . . . .	63
Anexo Generador electrónico	67
A.1 Modelo eléctrico del sistema . . . . .	67
A.2 Selección del transistor . . . . .	68
A.3 Desarrollo del amplificador . . . . .	69
A.4 Resultados y conclusiones . . . . .	70

# Figuras

I	Control de emisiones . . . . .	1
1.1	Exceso de aire . . . . .	8
1.2	Dirección de inyección . . . . .	9
1.3	Inyección homogénea y estratificada . . . . .	11
1.4	Composición de los gases de escape . . . . .	13
1.5	Producción de monóxido de carbono . . . . .	14
1.6	Producción de hidrocarburos . . . . .	14
1.7	Producción de óxidos de nitrógeno . . . . .	15
2.1	Ondas de compresión y capilar . . . . .	21
2.2	Difusión rectificadora . . . . .	23
2.3	Sonotrodos para atomización . . . . .	29
2.4	Modelo lineal del sistema ultrasónico . . . . .	30
2.5	Circuito equivalente del generador ultrasónico . . . . .	31
3.1	Motor montado en el banco de pruebas . . . . .	36
3.2	Medidor de consumo de combustible . . . . .	37
3.3	Arreglo de la prueba preliminar . . . . .	38
3.4	Temperatura de operación del motor . . . . .	39
3.5	Sistema de muestreo de volumen constante . . . . .	41
3.6	Pruebas de concepto de los sonotrodos . . . . .	44
3.7	Diseño del inyector ultrasónico . . . . .	45

3.8	Funcionamiento del inyector ultrasónico . . . . .	46
3.9	Prototipos del inyector y la válvula mariposa . . . . .	48
3.10	Prueba del inyector ultrasónico . . . . .	49
4.1	Arreglo del ensayo del inyector ultrasónico . . . . .	53
4.2	Arreglo d el ensayo del carburador . . . . .	53
4.3	Primera prueba: arranque en frío . . . . .	55
4.4	Primera prueba: operación en caliente . . . . .	57
4.5	Segunda prueba: arranque en frío . . . . .	59
4.6	Segunda prueba: operación en caliente . . . . .	61
A.1	Modelos eléctricos del sistema . . . . .	67
A.2	Desempeño de los transistores . . . . .	68
A.3	Medio amplificador clase D . . . . .	69
A.4	Diagrama del amplificador . . . . .	70

# Tablas

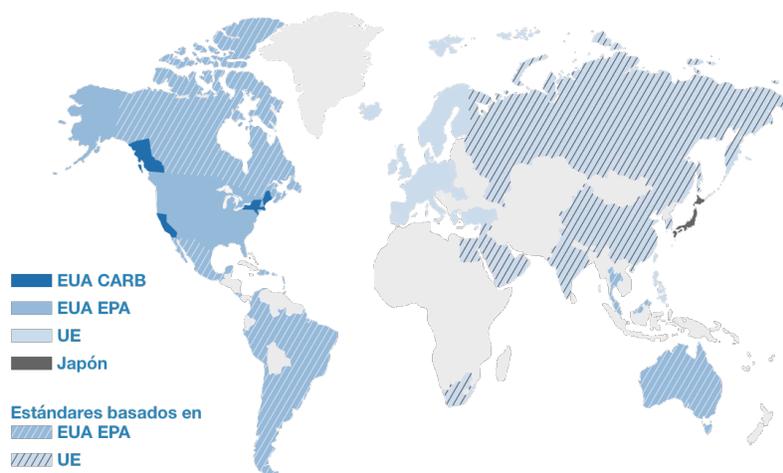
1.1	Sistemas de inyección comerciales . . . . .	10
2.1	Tipos de atomizadores . . . . .	20
2.2	Parámetros de un cristal atomizador piezoeléctrico . . . . .	27
2.3	Puntas amplificadoras . . . . .	28
3.1	Especificaciones mecánicas del motor . . . . .	36
3.2	Especificaciones del analizador de gases AGS-688 . . . . .	38
3.3	Prueba del consumo de combustible del motor . . . . .	39
3.4	Propiedades físicas de la gasolina . . . . .	42
3.5	Diámetro medio de la neblina . . . . .	43
3.6	Parámetros de los transductores adquiridos . . . . .	43
3.7	Parámetros del modelo de los transductores adquiridos . . . . .	44
3.8	Propiedades mecánicas y térmicas del nylon PA12 . . . . .	47
3.9	Parámetros utilizados en la manufactura aditiva del prototipo . . . . .	47
4.1	Emisiones máximas de motocicletas en México . . . . .	52
4.2	Primera prueba: arranque en frío . . . . .	56
4.3	Primera prueba: operación en caliente . . . . .	58
4.4	Segunda prueba: arranque en frío . . . . .	60
4.5	Segunda prueba: operación en caliente . . . . .	62



## Introducción

La principal forma de obtener energía continúa siendo por medio de la combustión de combustibles fósiles (International Energy Agency 2017). Debido a la contaminación emitida por este proceso, en todo el mundo se están aplicando normativas que reducen las emisiones de gases causantes del cambio climático y mantienen estándares de calidad de aire para cuidar la salud pública.

La industria del transporte trabaja principalmente con motores de combustión interna. En el 2013, 97% de los automóviles en circulación en el mundo eran de combustión, mientras sólo 2.8% eran híbridos y 0.2% eléctricos. Durante el 2016, la cantidad de automóviles eléctricos en las calles superó los dos millones y se estima que en el 2025 podría haber hasta 70 millones. No obstante, tal incremento representará menos del 10% de los vehículos en circulación, no impactando significativamente en la reducción de la producción de gases de efecto invernadero (International Energy Agency 2017). La dominación de la combustión en este sector se regula



**Figura I:** Legislaciones para el control de emisiones en el mundo.

*Fuente: Reif, Konrad. 2015. Gasoline Engine Management. Springer Vieweg.*

---

con legislaciones que controlan las emisiones contaminantes y que representan nuevos retos para las empresas de manufactura de vehículos (Winton 2016).

En los 60s, el estado de California introdujo las primeras legislaciones para limitar las emisiones de vehículos automotores. A partir de ese momento ciertas naciones empezaron a desarrollar sus propios sistemas: EUA, Unión Europea y Japón. Las legislaciones en el resto del mundo (*Figura 1*) son adaptaciones de los primeros sistemas (Reif 2015). Dichas legislaciones se revisan constantemente volviéndose más estrictas.

Para minimizar las consecuencias del cambio climático, el acuerdo de París pretende evitar que la temperatura promedio global se eleve 2 °C antes de que acabe el siglo. Tomando en cuenta que la temperatura ya se elevó 1 °C, sólo se estima un 5% de probabilidad de cumplir con el acuerdo a menos que haya avances significativos en la tecnología y grandes esfuerzos conjuntos en la política mundial (Raftery, et al. 2017). Para reiterar su responsabilidad con el acuerdo, México se comprometió a reducir en 22% las emisiones de gases de efecto invernadero y en 51% las emisiones de carbono negro para antes del 2030 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2017).

### Atomización en los motores de combustión interna

La problemática mundial en cuanto a la reducción de emisiones hace indispensable la continua investigación, con la finalidad de desarrollar motores de combustión interna más limpios y eficientes. Para superar tal reto se requiere introducir innovaciones en el funcionamiento de los motores.

Los motores de combustión interna funcionan al quemar una mezcla de aire-combustible. El dispositivo más simple que genera esta mezcla es el carburador. En 1912 Bosch introdujo el primer sistema de inyección de combustible (Reif 2015). En la década de los 80s, la inyección y los convertidores catalíticos se popularizaron gracias a las legislaciones de control de emisiones y los avances en electrónica que posibilitaron su implementación en automóviles comerciales.

Respecto al carburador, la inyección permite aumentar la eficiencia, reducir el consumo de combustible y minimizar las emisiones contaminantes. En la actualidad, la introducción de los inyectores dentro de la cámara de combustión y la instrumentación de los motores han permitido conocer y controlar el proceso con mayor eficiencia. Adicionalmente, los convertidores catalíticos transforman más del 98% de las emisiones contaminantes en agua, bióxido de carbono y nitrógeno.

### Ultrasonido en la pulverización de combustibles

El ultrasonido de potencia es una tecnología emergente que puede cambiar el principio de funcionamiento de los inyectores y producir ventajas significativas en la combustión.

Durante la primera guerra mundial, el diseño de sonares para submarinos permitió observar por primera vez efectos físicos inusuales (Gallego Juárez y Graff 2015). Dichos fenómenos son causados por no linealidades inherentes a las ondas ultrasónicas de alta potencia. A partir de este momento comenzó el estudio del macrosonido y sus aplicaciones. Los avances

tecnológicos modernos han permitido instrumentar los componentes necesarios para generar y analizar las ondas ultrasónicas de alta potencia y sus efectos. Dichos avances, sumados al creciente interés en el estudio de las vibraciones, han promovido la investigación de las ondas ultrasónicas en años recientes.

Uno de los fenómenos causados por las ondas ultrasónicas en líquidos es atomizarlos, es decir, desintegrarlos en finas partículas. La producción de neblina es proporcional a la energía aplicada y las propiedades del fluido, mientras que el diámetro de las partículas es función de la frecuencia. Dadas las características de la atomización, es posible desarrollar un inyector de combustible que pulverice ultrasónicamente.

Respecto a los mejores pulverizadores comerciales actuales, un atomizador ultrasónico produce una neblina con partículas de menor diámetro y una distribución más estrecha. Respecto a la inyección, la atomización ultrasónica no requiere de bombas que eleven la presión del fluido para pulverizar el combustible, simplificando el sistema. La combustión se beneficia por una evaporación más rápida y completa y una mezcla de aire-combustible más homogénea. Tales factores minimizan las emisiones contaminantes y el gasto de combustible. La operación en frío del motor igualmente se beneficia de tales características en la mezcla, pues una combustión más rápida y completa significa un aumento de temperatura más veloz.

inyección  
ultrasónica

La posibilidad de utilizar atomización ultrasónica como medio de pulverización de combustible ha sido comprobada tanto en publicaciones científicas (Jónsson, et al. 2015) como por entusiastas del automovilismo en publicaciones en línea (Furu 2012). Se ha comprobado que la neblina producida ultrasónicamente tiene mejores propiedades que la producida por un inyector comercial de vanguardia (Tanyeri y Öner 2014). Se ha diseñado un sistema ultrasónico de pulverización de combustible para aplicaciones experimentales (Lacas, et al. 1994) y, además, se ha logrado operar un motor de dos tiempos de encendido por chispa utilizando diésel atomizado por ultrasonido (Tsurutani, et al. 1991).

Los antecedentes directos de la atomización ultrasónica de gasolina son:

- Namiyama (Namiyama, et al. 1989): desarrolló un inyector de gasolina ultrasónico y obtuvo una mayor eficiencia, mejor aceleración y menores emisiones contaminantes de monóxido de carbono e hidrocarburos mas un aumento en los óxidos de nitrógeno; realizó las pruebas en un motor de motocicleta de un cilindro, en un automóvil de cuatro cilindros de inyección monopunto y en un automóvil de cuatro cilindros de inyección multipunto.
- Kumar (Kumar Rout, et al. 2013): comparó el desempeño de un atomizador ultrasónico en un motor de motocicleta de un cilindro con respecto del carburador original; observó un desempeño superior en cuanto al consumo de combustible, mayor eficiencia, menores emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, mas un aumento considerable en los óxidos de nitrógeno y una capacidad de operar con relaciones aire-combustible de hasta 25.
- Balasubramanian (Balasubramanian, et al. 2015): comparó el desempeño de un motor de dos cilindros con un pulverizador ultrasónico respecto al carburador original y estudió a fondo el desempeño del motor a diferente velocidades y cargas. Operó el motor con relaciones aire-combustible de hasta 27 y observó una disminución en las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, mas un aumento considerable en las emisiones de hidrocarburos.

---

## Contenido del trabajo

objetivo El presente trabajo es una prueba de concepto sobre el uso de inyectores ultrasónicos como forma de mejorar significativamente el desempeño de los motores de gasolina. Se buscó comprobar las ventajas teóricas del inyector en la realidad para demostrar la posibilidad de desarrollar uno comercial. Tal prueba se realizó mediante la implementación de un inyector ultrasónico indirecto en un motor de motocicleta Honda 125. El diseño del inyector ultrasónico se fundamentó en el estudio de los motores de combustión interna y de la atomización ultrasónica.

En el primer capítulo se estudia el funcionamiento de los motores de combustión interna, el papel que desempeña el inyector el proceso de la combustión y la naturaleza de las emisiones contaminantes.

Por el lado de la atomización, en el segundo capítulo, se estudia el fenómeno físico que la rodea y cómo se caracteriza, así como los métodos comerciales disponibles para su implementación.

Con este conocimiento, en el tercer capítulo, se presenta el desarrollo del inyector pensando en su integración con el motor y la instrumentación que fungirán como banco de pruebas. El desempeño del inyector se juzga por sus emisiones en comparación con el carburador original del motor, para poder realizar las mediciones se desarrolló un sistema de muestreo de volumen constante.

Con el objetivo de establecer la metodología a seguir durante la prueba de emisiones, en el cuarto capítulo se investiga el protocolo de verificación de motocicletas vigente. Finalmente se analizan los resultados obtenidos de las pruebas desempeño del inyector y se obtienen conclusiones.

La aplicación del ultrasonido en la combustión requiere de mayor investigación y desarrollo, pensando en la integración con el resto de los sistemas de un vehículo.

## Bibliografía

- Balasubramanian, N., Ganesh Keerthi, y T. N. C. Anand. 2015. «Fuelling a Two-Wheeler Engine by Ultrasonic Atomization.» *Small Engine Technologies Conference & Exhibition*. Osaka. 2015-32-0757.
- Furu, Levi. 2012. *Car running on ultrasonic gasoline mist*. 27 de Marzo. Último acceso: 14 de Junio de 2017.  
[http://www.furulevi.go.ro/car\\_running\\_on\\_ultrasonic\\_gasoline\\_mist\\_\(1of5\).htm](http://www.furulevi.go.ro/car_running_on_ultrasonic_gasoline_mist_(1of5).htm).
- Gallego Juárez, Juan A., y Karl F. Graff. 2015. *Power Ultrasonics*. Cambridge: Elsevier.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2017. *México reafirma su apoyo y compromiso con el Acuerdo de París para detener los efectos del cambio climático global*. 3 de Junio. Último acceso: 7 de Agosto de 2017.  
<https://www.gob.mx/inecc/articulos/mexico-reafirma-su-apoyo-y-compromiso-con-el-acuerdo-de-paris-para-detener-los-efectos-del-cambio-climatico-global-110277?idiom=es>.
- International Energy Agency. 2017. *Electric vehicles have another record year, reaching 2 million cars in 2016*. International Energy Agency. 7 de Junio. Último acceso: 7 de Agosto de 2017. <https://www.iea.org/newsroom/news/2017/june/electric-vehicles-have-another-record-year-reaching-2-million-cars-in-2016.html>.
- International Energy Agency. 2017. «World Energy Balances: Overview.»
- Jónsson, Bergþór Lár, Garðar Örn Garðarsson, Óskar Pétursson, Sigurður Bjarki Hlynsson, y Joseph Timothy Foley. 2015. «Ultrasonic Gasoline Evaporation Transducer - Reduction of Internal Combustion Engine Fuel Consumption using Axiomatic Design.» *International Conference on Axiomatic Design*. Florence: Elsevier. 168-173.
- Kumar Rout, Saswat, M. Ajay, y T. N. C. Anand. 2013. «Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer.» *23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion*. 10.13140/2.1.3421.0881.
- Lacas, Francois, Philippe Versaevel, Philippe Scouflaire, y Gérard Coeur-Joly. 1994. «Design and Performance of an Ultrasonic Atomization System for Experimental Combustion Applications.» *Particle & Particle Systems Characterization* 11 (2): 166-171.
- Namiyama, Kazuyoshi, Hiromi Nakamura, Kakuro Kokubo, y Daijiro Hosogai. 1989. «Development of Ultrasonic Atomizer and Its Application to S.I. Engines.» *SAE Technical Paper* 890430.
- Raftery, Adrian E., Alec Zimmer, Dargan M. W. Frierson, Richard Startz, y Peiran Liu. 2017. «Less than 2 °C warming by 2100 unlikely.» *Nature Climate Change* (7): 637–641.
- Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management: Systems and Components*. Springer Vieweg.

- Tanyeri, Burak, y Cengiz Öner. 2014. «The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated By Piezoelectric Ceramic.» *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, Marzo: 13-16.
- Tsurutani, Kazushi, Hiroyuki Takezi, y Daijiro Hosogai. 1991. «Development of a Diesel Fuel S.I. Engine Using an Ultrasonic Atomizer.» *SAE Technical Paper* 910667.
- Winton, Neil. 2016. *Global EV, hybrid sales to soar, with U.S. reluctance*. 25 de Noviembre. Último acceso: 7 de Agosto de 2017.  
<http://www.detroitnews.com/story/business/columnists/neil-winton/2016/11/25/winton-alternative-fuel-car-sales-estimates/94426704/>.

# 1 Inyección de gasolina

El transporte es uno de los pilares básicos de la economía en todos los países, así como el mayor consumidor de petróleo en el mundo y emisor de contaminantes (una tercera parte de la producción de  $CO_2$  total). Los vehículos terrestres utilizan motores de combustión interna como principal medio de funcionamiento (Palocz-Andresen 2013). Tales motores se dividen, mayoritariamente, entre los de diésel y los de gasolina, siendo los segundos nuestro campo de estudio.

El desarrollo del inyector ultrasónico de gasolina comienza comprendiendo la importancia de la inyección en los motores de encendido por chispa. En este capítulo se estudia la pulverización de combustible para establecer como afecta el proceso de la combustión. Con el fin de optimizar el proceso de combustión, se identifican las ventajas de la inyección para obtener un mejor desempeño del motor en cuanto a su eficiencia y emisiones contaminantes.

## 1.1 Motores de gasolina

Los motores de gasolina operan usando el ciclo Otto de cuatro tiempos. Esto significa que el pistón realiza cuatro carreras: admisión de la mezcla aire-combustible, compresión de la mezcla, expansión y escape de los gases residuales. El ciclo Otto funciona con gasolina por sus propiedades: es un compuesto de parafinas y aromáticos con un poder calorífico de  $41 \text{ MJ/kg}$ , resistente a la auto-ignición y volátil a temperatura ambiente.

La gasolina actual se somete a procesos de refinamiento que optimizan sus propiedades: no contiene azufre, el cual corroe al motor, y no posee plomo, el cuál reacciona durante la combustión y genera gases tóxicos para las personas y el entorno. Complementariamente, se mezcla con aditivos para mejorar su desempeño: los detergentes limpian el sistema de suministro de gasolina, los anticorrosivos forman un recubrimiento en el motor para un mayor cuidado, los antioxidantes prevén que la gasolina se oxide con el aire y los anticongelantes evitan la evaporación a altas temperaturas y el congelamiento a bajas (Army Correspondence Course Program 2005).

### 1.2 Ciclo de carga

La primera carrera del ciclo Otto es la admisión de la mezcla de aire-combustible. Las propiedades de la mezcla definen cómo será la combustión, por lo que su formación es una tarea de alta importancia en el desempeño del motor.

#### Relación aire-combustible

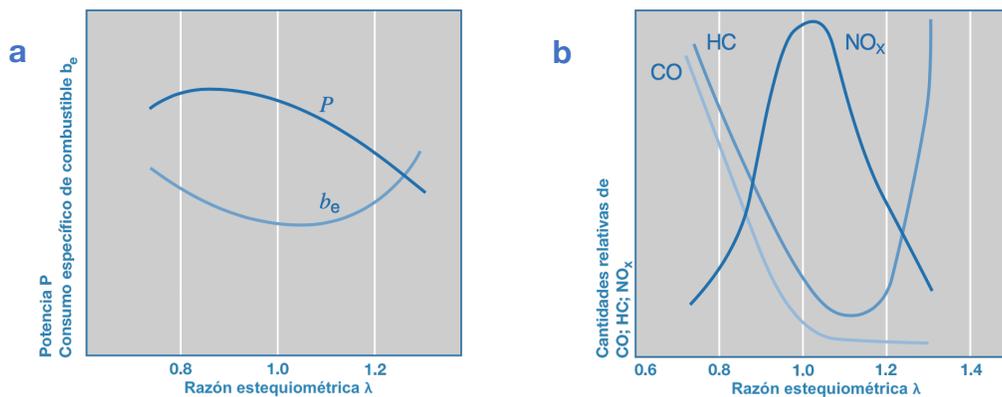
La proporción de la masa de aire presente en algún punto de la cámara de combustión  $m_a$  respecto a la masa de combustible  $m_f$  se conoce como *relación aire-combustible* (*AFR* por sus siglas en inglés, *Ecuación 1.1*). La relación teórica para una combustión completa es de 14.7 partes de aire por cada parte de combustible. Tal correspondencia permite establecer una cantidad llamada *relación equivalente de aire-combustible*  $\lambda$ , también conocida como *razón estequiométrica* (Wrocław University of Science and Technology n.d.); se define como la proporción de la masa actual de aire, respecto a la masa estequiométrica de aire necesaria (*Ecuación 1.2*). Es común expresar la proporción utilizando a su complemento el *exceso de aire*  $x_a$  (*Ecuación 1.3*).

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} \tag{1.1}$$

$$\lambda = \frac{AFR}{14.7} \tag{1.2}$$

$$x_a = \lambda - 1 \tag{1.3}$$

El exceso de aire afecta directamente la potencia obtenida del motor y el consumo de combustible, así como las emisiones producto de la combustión. La *Figura 1.1* ilustra la correspondencia entre tales factores y  $\lambda$ . Cabe destacar que las cantidades de exceso de aire para obtener una mayor eficiencia y para disminuir las emisiones contaminantes son diferentes,



**Figura 1.1:** Influencia del exceso de aire en (a) la potencia, el consumo de combustible y (b) las emisiones contaminantes.

Fuente: Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

por lo que siempre habrá un compromiso al escoger el exceso de aire de operación. Tal valor es seleccionado para la óptima operación en diferentes estados del motor (Reif 2015).

La mezcla de aire-combustible dentro del cilindro se encuentra en estado gaseoso. La volatilidad de la gasolina y las altas temperaturas de un motor en marcha le permiten cambiar de fase. Para posibilitar este cambio se requiere preparar una mezcla de aire con combustible atomizado en finas partículas. Existen dos sistemas capaces de preparar esta mezcla: carburadores en los motores antiguos e inyectores en los modernos.

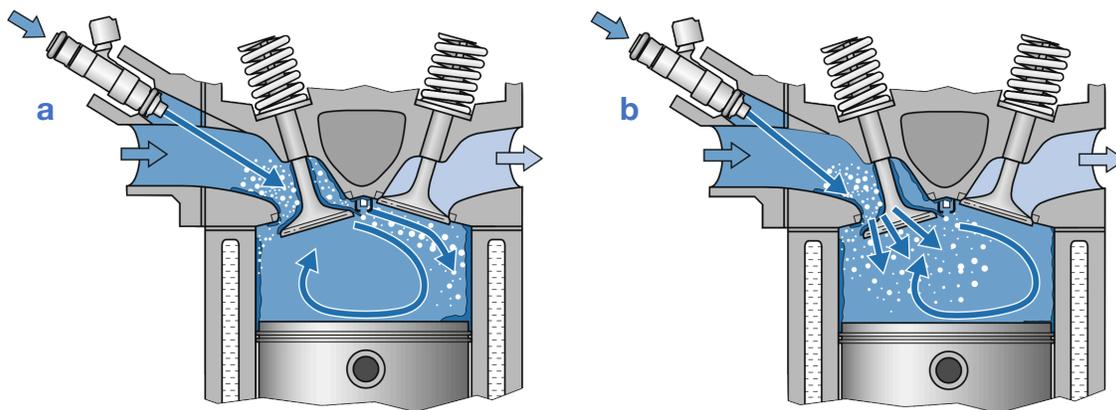
El carburador consiste en un depósito de combustible unido por una válvula al múltiple de admisión. Una reducción en el área transversal del múltiple genera un efecto Venturi forzando la gasolina a salir por una boquilla que la atomiza y dispersa en el aire.

### Sistemas de inyección

Existen dos sistemas de inyección de combustible: la inyección directa y la inyección indirecta. La inyección indirecta fue la primera en ser inventada. Consiste en un sistema de alimentación que suministra combustible líquido a presiones de entre 300 kPa y 500 kPa a los inyectores, los cuales son válvulas con boquillas que atomizan el combustible y lo inyectan a la entrada del colector de admisión generando una distribución homogénea de la mezcla en el cilindro. La inyección directa permite la formación interna de la mezcla, utiliza inyectores de alta presión (5 MPa a 20 MPa) para suministrar el combustible dentro de los cilindros. Tal funcionamiento permite generar distribuciones tanto homogéneas como estratificadas de combustible.

El objetivo de la inyección indirecta es generar una mezcla homogénea de aire y vapor de combustible. El inyector atomiza y dirige un flujo de combustible hacia la válvula de admisión. Un menor diámetro de gota favorece la evaporación, no obstante, cuando el motor opera en frío, la mayor parte del combustible se queda como una capa líquida en las paredes del colector y la válvula de admisión. Cuando el motor opera en caliente, tal capa se evapora en el colector

inyección indirecta



**Figura 1.2:** Efecto de la dirección de inyección sobre la mezcla de aire-combustible en la cámara de combustión: (a) base de la válvula (b) centro de la válvula.

Fuente: Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

de admisión. La verdadera mezcla se produce al abrirse la válvula e ingresar el aire y el combustible.

Para lograr una mezcla de características deseables son decisivos los instantes, la duración y la dirección de inyección. La *dirección de inyección* se refiere a dónde se dirige el flujo atomizado, es un factor determinado desde el diseño. Los instantes de inyección se refieren al momento de atomización respecto al ángulo del cigüeñal y respecto a los otros inyectores. La *duración de inyección* se refiere al tiempo—medido en ángulo-cigüeñal—durante el cual se pulveriza el combustible. Ambos instantes y la duración de la inyección son controlados por la ECU (*Electronic Control Unit*, la computadora del automóvil).

Orientar el flujo al centro de la válvula de admisión ocasiona que la mezcla se dirija a la pared opuesta del cilindro, como se ilustra en la *Figura 1.2*. Orientarlo a la base de la válvula genera que se dirija al centro del cilindro, pero se crea una mayor capa de combustible en la válvula.

Existen dos diferentes *instantes de inyección* respecto al cigüeñal:

- Pre-admisión: la mezcla se dirige a la pared opuesta del cilindro y la inyección termina antes de que abra la válvula de admisión. Si el motor está frío, no se evaporará del todo la mezcla; si está en caliente, la pre-admisión permitirá que ingrese más aire, refrigerando y evitando auto-ignición.
- Admisión síncrona: la inyección ocurre cuando la válvula está abierta. La mezcla se dirige al centro del cilindro, esto disminuye significativamente las emisiones contaminantes durante el inicio en frío.

Existen cinco instantes de inyección respecto a los demás inyectores, también conocidos como *sincronía de inyección*:

- Continua: la inyección es un flujo continuo de gasto variable.
- Simultánea: se inyectan todos los cilindros a la vez.

Sistema	Inyección	Sincronía	Tipo de control	Variables de entrada
D-Jetronic	Multipunto	Secuencial	Electromecánico	Presión del múltiple Velocidad del motor
K-Jetronic	Multipunto	Continua	Mecánico-hidráulico	Aire ingresado Aire ingresado
L-Jetronic	Multipunto	Secuencial	Electromecánico	Velocidad del motor Temperatura del motor
Mono-Jetronic	Monopunto	Individual	Electromecánico	Aire ingresado Velocidad del motor

**Tabla 1.1:** Sistemas de inyección comerciales.

- Semisecuencia: se inyecta un grupo de cilindros a la vez.
- Secuencia: se inyecta un cilindro a la vez en secuencia.
- Individual: se controla individualmente cada cilindro.

Los instantes y sincronía de inyección anteriormente descritos corresponden a la inyección indirecta multipunto, donde cada inyector se localiza en un cilindro. Existe un segundo diseño, llamado monopunto, donde un solo inyector central alimenta todos los cilindros. Tal sistema precisa de un inyector de mayor gasto y se utiliza en motores de no más de cuatro cilindros. La *Tabla 1.1* muestra los sistemas de inyección indirecta comerciales más comunes.

Uno de los inyectores indirectos comerciales más exitosos es el *EVI4* de Bosch, sus características más destacables son: pequeño y ligero, resistente a altas temperaturas, larga vida con un funcionamiento estable, no permite escapar vapor de combustible y opera con mezclas de hasta 85% etanol.

La neblina de combustible atomizada por el inyector queda descrita por:

- Forma: unidireccional o bidireccional, dependiendo si el cilindro cuenta con una o más válvulas de admisión.
- Dirección de flujo: base o centro de la válvula de admisión.
- Tamaño y distribución del diámetro de gota.

### 1.3 Combustión

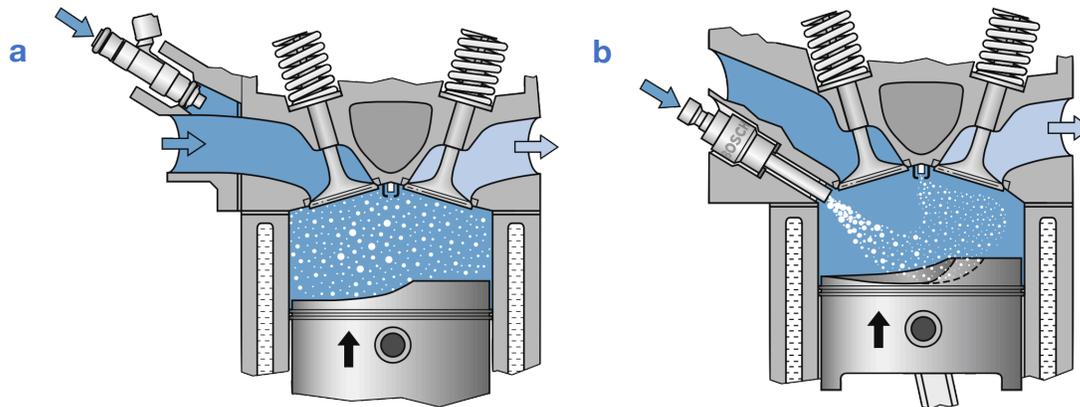
La combustión inicia con la ignición. La ignición depende de la geometría de la bujía, la duración de la chispa, el flujo cercano a la bujía y su exceso de aire. La combustión de la mezcla de aire-combustible dentro del cilindro puede operar de dos formas diferentes: homogénea y estratificada.

#### Mezclas

Una mezcla homogénea significa una distribución uniforme en toda la cámara de combustión, donde se pretende que cada punto tenga la misma relación aire-combustible. La cantidad de aire en el cilindro es el factor decisivo en el par de salida del motor, por lo que la cantidad de combustible inyectado depende del aire ingresado. La operación ocurre en un rango de  $0.8 \leq \lambda \leq 1$  y se trata de un motor dirigido por aire.

inyección  
homogénea

Una mezcla estratificada consiste en una distribución de  $\lambda \approx 1$  alrededor de la bujía durante la ignición y una mezcla extremadamente ligera ( $\lambda \approx 10$ ) en el resto de la cámara de combustión. El par del motor es función únicamente del combustible inyectado, esto debido a que la cantidad de aire—mientras sea en exceso—no afecta al par. Se trata de un motor dirigido por combustible. La *Figura 1.3* ilustra ambos conceptos. La mezcla estratificada permite un mayor control sobre la combustión reduciendo el consumo de combustible hasta en un 15% y aumentando la eficiencia del motor hasta en 5% (Siano 2010).



**Figura 1.3:** Inyección (a) homogénea y (b) estratificada del combustible en el cilindro.

Fuente: Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

### Ignición

La bujía comienza la ignición al descargar una chispa. La adecuada propagación de la flama depende de que  $0.75 \leq \lambda \leq 1.3$ . La combustión ocurre de manera más rápida dónde  $0.8 \leq \lambda \leq 0.9$ , tal operación permite un mejor desempeño del motor a altas velocidades. La combustión es más eficiente dónde  $1.05 \leq \lambda \leq 1.1$ , la desventaja que se presenta es un alza en la producción de óxidos de nitrógeno.

Durante la combustión ocurre la propagación del frente de onda, la cual se divide en tres fases:

- Fase inicial: una débil flama azul se extiende lentamente a partir de la bujía, no produce un incremento apreciable de temperatura ni de presión.
- Fase de crecimiento: “dedos” de flamas se expanden a través de la mezcla generando un mínimo incremento en temperatura y presión.
- Fase de combustión: el frente de flama se propaga generando un considerable aumento en la temperatura y la presión.

Las zonas no tocadas por los “dedos” durante la segunda fase tendrán mayores concentraciones de combustible en la tercera, lo cual puede ocasionar combustión espontánea no controlada, dañando al motor (picado o *auto-ignición*).

### Inicio en frío

Los motores de combustión interna son incapaces de arrancar por si solos. Un motor eléctrico, llamado marcha, los pone en movimiento para que pueda iniciar el ciclo. Estos primeros momentos del arranque se caracterizan por una baja temperatura del motor, no permitiendo la evaporación del combustible. El inicio en frío se divide en cuatro fases.

- Inicio: las primeras revoluciones del motor se caracterizan por requerir de 3 a 4 veces más combustible que en la operación en caliente.
- Post-inicio: la cantidad de combustible demandado comienza a reducirse.

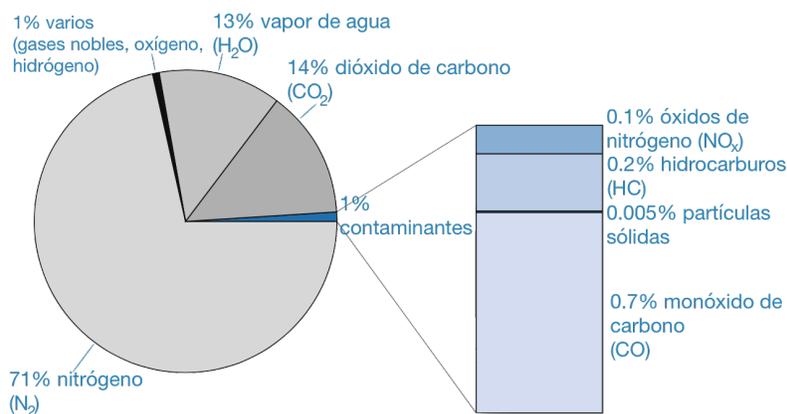
propagación del  
frente de onda

- Calentamiento: aumenta la temperatura del motor, pero se demanda más combustible para realizar un mismo trabajo que a la temperatura nominal.
- Calentamiento del convertidor catalítico: se toman medidas adicionales para forzar el calentamiento del sistema de control de emisiones.

Las condiciones del inicio en frío generan mayor emisión de contaminantes y una mayor demanda de combustible, por lo que medidas innovadoras para mejorar la combustión en esta fase son vitales.

### 1.4 Emisiones

Idealmente los productos de la combustión de gasolina son: agua, nitrógeno y  $CO_2$ . Debido a la presencia de sustancias ajenas en la gasolina y condiciones no ideales de combustión se generan productos tóxicos. Dichos elementos pueden reducirse disminuyendo la presencia de impurezas en la gasolina y promoviendo una combustión más completa. Por más limpio que sea el proceso, la producción de  $CO_2$  no puede disminuirse, ya que depende de la presencia de carbono en el combustible. El  $CO_2$  no es tóxico, pero es uno de los principales gases causantes del cambio climático. La *Figura 1.4* muestra la composición de los gases resultantes de una combustión homogénea con  $\lambda = 1$ .

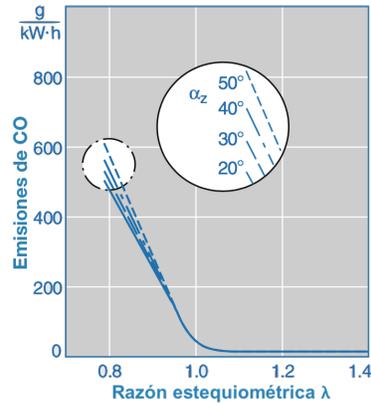


**Figura 1.4:** Composición de los gases de escape de un motor de gasolina durante operación homogénea con aire estequiométrico.

Fuente: Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

#### Monóxidos de carbono

La producción de monóxido de carbono es consecuencia de una combustión incompleta por falta de aire. Causa envenenamiento al reducir la cantidad de oxígeno absorbido en la sangre. La cantidad de emisiones responde a la carga del motor: aumenta con la velocidad, pues hay menor tiempo tanto para preparar la mezcla de aire-combustible como para quemarla; disminuye con el par, pues mayor par implica un aumento en la temperatura del motor, permitiendo una combustión más completa y reacciones secundarias en los gases de escape que lo eliminan.



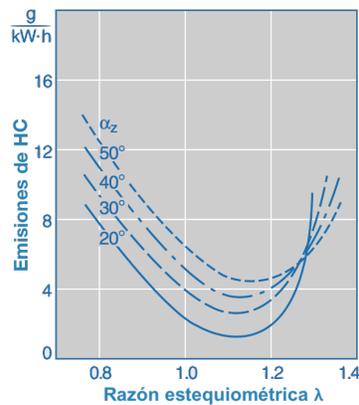
**Figura 1.5:** Producción de monóxido de carbono en función del exceso de aire y el ángulo de ignición.

Fuente: Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

La *Figura 1.5* muestra la relación de la producción de monóxido de carbono con el exceso de aire y la relación de compresión medida como un ángulo previo al punto muerto superior. El efecto del ángulo de ignición es despreciable, al igual que el de la relación aire-combustible mientras exista un exceso de aire.

### Hidrocarburos

Las emisiones de hidrocarburos son producto de una combustión incompleta por falta de oxígeno en la mezcla. Algunos hidrocarburos son agentes cancerígenos, otros se vuelven cancerígenos en la atmósfera al exponerse a los rayos del sol. La cantidad de emisiones responde a la carga del motor de la misma forma que las emisiones de monóxido de carbono. La *Figura 1.6* muestra la relación de la producción de hidrocarburos con el exceso de aire y la



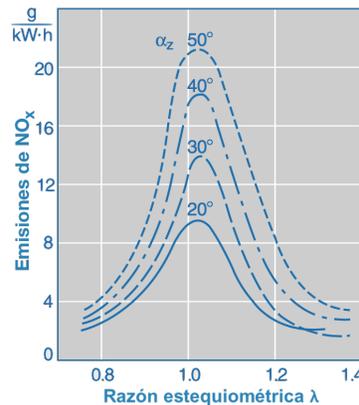
**Figura 1.6:** Producción de hidrocarburos en función del exceso de aire y el ángulo de ignición.

Fuente: Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management*. Springer Vieweg.

relación de compresión. Las emisiones comienzan a aumentar en la zona de mezcla pobre debido a que en los extremos del cilindro la combustión ya no es completa.

### Óxidos de nitrógeno

Las emisiones de óxidos de nitrógeno ocurren en todos los procesos de combustión como resultado de reacciones secundarias con el nitrógeno del aire. Es el principal agente causante del *smog* en las ciudades y de la lluvia ácida, pues se transforma en ozono en la atmósfera. La cantidad de emisiones responde a la carga del motor de forma opuesta al monóxido de carbono y los hidrocarburos. Las altas temperaturas causadas por un aumento en el par promueven su formación, mientras que un aumento en la velocidad limita el tiempo para que ocurran las reacciones secundarias. La *Figura 1.7* muestra la relación de la producción de óxidos de nitrógeno con el exceso de aire y la relación de compresión. Existe un aumento en la temperatura cuando  $\lambda \approx 1$ , catalizando las reacciones secundarias.



**Figura 1.7:** Producción de óxidos de nitrógeno en función del exceso de aire y el ángulo de ignición.

*Fuente: Reif, Konrad. 2015. Gasoline Engine Management. Springer Vieweg.*

### Dióxidos de azufre

La formación de dióxido de azufre es consecuencia del azufre presente en la gasolina. Su producción en los motores de combustión interna es mínima, al grado en el que no se contempla en las legislaciones de emisiones contaminantes. No obstante, daña a los convertidores catalíticos, por lo que debe ser minimizado.

### Partículas sólidas

Las emisiones de partículas sólidas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (carbono negro) igualmente se encuentran ligadas a una combustión incompleta. Normalmente son causadas por motores diésel, siendo despreciable su generación en los motores de gasolina. No obstante, puede encontrarse

presencia significativa en la combustión estratificada de motores de inyección directa, donde su producción se relaciona a zonas de extrema concentración de gasolina en la mezcla.

### Convertidor catalítico

Las medidas tomadas dentro del motor no son suficientes para reducir satisfactoriamente las emisiones contaminantes. Los gases de escape se llevan a un convertidor catalítico que transforma al monóxido de carbono en agua, a los hidrocarburos en bióxido de carbono y a los óxidos de nitrógeno en nitrógeno en una proporción mayor al 98%. La correcta operación del convertidor catalítico depende del oxígeno restante en los gases expulsados, el cual depende directamente del exceso de aire en la mezcla. La transformación máxima de gases tóxicos se da cuando la relación es estequiométrica ( $\lambda = 1$ ). El segundo factor que determina el correcto funcionamiento del convertidor es su temperatura, al punto en que 90% de las emisiones emitidas por un motor de gasolina ocurre cuando el convertidor catalítico no está en su temperatura de operación.

Para reducir las emisiones contaminantes es esencial calentar rápidamente el convertidor catalítico y minimizar las emisiones generadas por la combustión. Para ello se debe conseguir una mezcla de aire-combustible homogénea y esta debe ser lo más similar posible en cada cilindro. La inyección de combustible, sobre los carburadores, otorga una mayor certidumbre y control de estos factores.

### 1.5 Mejoras a la inyección

Las principales mejoras para un motor de gasolina son:

- Aumentar la eficiencia y reducir el consumo de combustible.
- Reducir las emisiones contaminantes, principalmente en la operación en frío.
- Acelerar el calentamiento del motor y del convertidor catalítico a partir del arranque en frío.
- Eliminar la auto-ignición de la gasolina.

Mejoras secundarias son simplificar los componentes y el funcionamiento del motor, al igual que reducir su mantenimiento.

Para una combustión homogénea la eficiencia se mejora con una combustión más completa y balanceada entre cada cilindro del motor. Las emisiones contaminantes en caliente se reducen con la correcta relación de aire-combustible ( $\lambda = 1$ ) y una adecuada temperatura en el convertidor catalítico. Las emisiones contaminantes en frío se reducen con una combustión completa, una relación aire-combustible apropiada a la carga y un rápido calentamiento del convertidor catalítico. El calentamiento del motor se logra con una combustión completa y rápida, que libera la mayor cantidad posible de energía, al igual que con medidas secundarias como el reflujos de gases de deshecho para mantener una temperatura elevada en la cámara de combustión. La auto-ignición de la gasolina se elimina con una mezcla homogénea donde no haya regiones con mayor susceptibilidad a quemarse.

requerimientos

El corazón de un motor de gasolina es la cámara de combustión. Lo que se quema idealmente es una mezcla de aire-combustible completamente gaseosa que en cada punto del cilindro tiene una relación estequiométrica homogénea. Todas las mejoras deseadas en el motor coinciden con apearse al funcionamiento ideal. La mezcla aire-combustible establece cómo se realizará la combustión determinando: la propagación del frente de onda, la energía liberada, la auto-ignición y los gases producidos tanto por la combustión cómo por reacciones secundarias. Mejorar el funcionamiento del motor implica poder generar una mezcla que permita un mayor control sobre sus parámetros.

En los motores modernos, el sistema de inyección de combustible es el encargado de generar y controlar la mezcla de aire-combustible. Mejorar el sistema de inyección optimiza el funcionamiento total del motor. Las condiciones que permitirían generar una mezcla de propiedades óptimas son: reducir y controlar el tamaño del diámetro de las gotas (control de la tasa de evaporación de la gasolina), una distribución estrecha de este diámetro (evaporación homogénea en la mezcla), una respuesta rápida del sistema (inyección en el momento requerido) y un flujo másico de combustible controlable (adecuada relación aire-combustible). Una tecnología que ofrece una pulverización con tales características—y que simplificaría el sistema al no requerir la bomba de alta presión para una inyección indirecta—es la atomización ultrasónica.

inyección  
ultrasónica

## Bibliografía

- Army Correspondence Course Program. 2005. *Principles of Gasoline and Diesel Fuel Systems*. 7° Edición. The Army Institute for Professional Development.
- Banish, Greg. 2009. *Designing and Tuning High-Performance Fuel Injection Systems*. North Branch, Minnesota: CarTech.
- Mecánica Automotriz Fácil. 2015. *Sistema de combustible con carburador e introducción a la inyección electrónica*. Ecatepec, Estado de México: México Digital Comunicación.
- Palocz-Andresen, Michael. 2013. *Decreasing Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in Transportation: Sensing, Control and Reduction of Emissions*. Springer.
- Reif, Konrad. 2015. *Gasoline Engine Management: Systems and Components*. Springer Vieweg.
- Siano, Daniela. 2010. *Fuel Injection*. Rijeka: Sciyo.
- Wrocław University of Science and Technology. s.f. «Stoichiometry of Combustion.» *Faculty of Mechanical and Power Engineering*. Último acceso: 22 de Octubre de 2017. [http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/combustion\\_MiBM/fund/Stoichiometry.pdf](http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/combustion_MiBM/fund/Stoichiometry.pdf).

## 2 Atomización ultrasónica

El tamaño y la concentración de las partículas de combustible en la mezcla afectan una serie de parámetros durante la combustión:

- Velocidad de combustión.
- Qué tanto combustible en la mezcla se quema.
- Temperatura durante la combustión.
- Eficiencia.
- Potencia.
- Emisiones contaminantes resultantes.
- Auto-ignición de la mezcla.
- Tiempo para que el catalizador alcance su temperatura de operación.

En la combustión homogénea la mezcla se produce al pulverizar combustible y transportarlo con un flujo de aire a la cámara de combustión. Idealmente la mezcla tiene la misma concentración de combustible en cada punto y se evapora durante el transporte. El control sobre las propiedades de la mezcla aire-combustible reside en la atomización de la gasolina y su adecuado transporte.

En este capítulo se estudia la atomización de un líquido y la caracterización de la neblina generada. Posteriormente se explica el fenómeno físico de la atomización y los métodos con que se logra. Finalmente se identifican las opciones comerciales factibles para atomizar gasolina ultrasónicamente.

### 2.1 Atomizadores

La atomización es la desintegración de un líquido en una neblina de pequeñas gotas. Para atomizar, el líquido se somete a fuerzas que exceden su tensión superficial desprendiendo partículas. La manera más simple de producir tales fuerzas es por medio de un gradiente de velocidad entre el líquido y la interfaz gaseosa que lo rodea; los principales mecanismos de atomización se basan en este principio.

Mecanismo	Descripción	Características	Aplicaciones
Presión	El líquido se desintegra al ser expulsado por una tobera que lo acelera.	Simples de construir Bajo costo	Combustión
Rotatorio	El líquido se desintegra a partir del centro de un disco que rota y se atomiza al ser expulsado.	Atomiza radialmente un arco de 360° Distribución uniforme de partículas	Recubrimientos Secado
Doble fluido	Un flujo de gas a alta velocidad se impacta con el líquido desintegrándolo.	Simples de construir Buen control de la concentración de partículas	Refrigeración Combustión
Electroestático	Una carga eléctrica expande la superficie del líquido desintegrándolo.	Partículas finas Bajo flujo atomizado Baja velocidad de expulsión	Impresión Secado Recubrimientos
Ultrasónico	Vibraciones desprenden partículas de la superficie del líquido.	Partículas finas y homogéneas Baja velocidad de expulsión	Humidificación Suministro de medicamentos

**Tabla 2.1:** Tipos de atomizadores.

Cada mecanismo de atomización produce neblinas de características específicas adecuadas para diferentes aplicaciones. En la *Tabla 2.1* se describen brevemente los mecanismos de atomización actuales (Lefebvre y McDonell 2017).

### 2.2 Ultrasonido de potencia

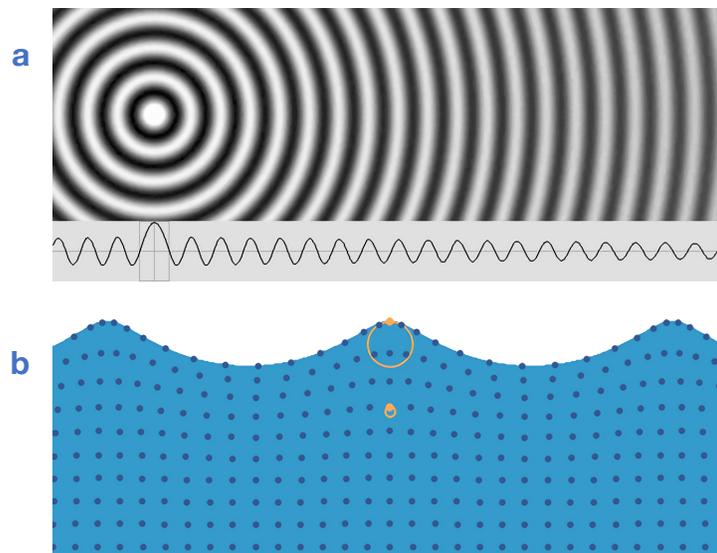
Las vibraciones ultrasónicas sólo logran atomizar un líquido cuando llevan la suficiente intensidad. El ultrasonido de potencia estudia este tipo de ondas y sus fenómenos relacionados.

#### Acústica

El sonido es una forma de energía mecánica que se transmite a través de un medio en forma de ondas de esfuerzo. El medio—al ser materia—está formado por elementos discretos que interactúan dinámicamente transmitiendo (propagando) y disipando su momentum. Cualquier perturbación externa al medio desencadena tales interacciones. Las cuatro fuentes de sonido son: turbulencia, entropía, arrastre y vibración (Phanphanit 2011).

Dependiendo del medio, el sonido puede propagarse en diferentes tipos de ondas; para aplicaciones ultrasónicas las principales son:

- Compresión: también conocida como longitudinal, es una oscilación tangente a su dirección de propagación; ocurre en sólidos, líquidos y gases (*Figura 2.1a*).
- Cortante: también conocida como transversal, es una oscilación normal a su dirección de propagación; ocurre únicamente en sólidos.
- Superficial: es una sinusoide que aparece en la superficie del medio y es normal a su dirección de propagación; en sólidos puede ser una onda tipo *Rayleigh* (normal a la superficie) o tipo *Love* (tangencial a la superficie), en líquidos puede ser una onda capilar (la fuerza restauradora es la tensión superficial) o de gravedad (la fuerza restauradora es la gravedad) y ambas son normales a la superficie (*Figura 2.1b*).



**Figura 2.1:** Onda de compresión (a) las zonas claras representan alta presión y las zonas oscuras baja presión; en la gráfica de presión se aprecia la disipación de la intensidad. Onda capilar (b) los puntos representan partículas, en naranja se resaltan las trayectorias que recorren durante un ciclo.

Fuente: (a) LaFreniere, Grabiell. 2009. Mysearch: mysearch.org.uk.

(b) Russell, Daniel A. 2016. Acoustics and Vibration Animations: acs.psu.edu.

El estudio de las ondas acústicas parte de la *ecuación de conservación de momentum de Euler* (*Ecuación 2.1*), la cual relaciona a la presión  $p$ , la densidad  $\rho$  y la velocidad  $v$ ; las tres, junto al desplazamiento  $r$ , describen los fenómenos acústicos y se separan en sus componentes medios  $(\bar{p}, \bar{\rho}, \bar{v}, \bar{r})$  y sus componentes acústicos (fluctuación temporal:  $\tilde{p}, \tilde{\rho}, \tilde{v}, \tilde{r}$ ), *Ecuación 2.2*.

$$\frac{D(\rho \vec{v})}{Dt} = \nabla p + \rho \vec{g} \quad 2.1$$

$$r = \bar{r} + \tilde{r} \quad 2.2$$

La *ecuación de onda general* (Ecuación 2.3) describe la propagación del sonido, en ella  $c$  es la rapidez del sonido en el medio.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad 2.3$$

### Potencia

Originalmente la acústica estudiaba las ondas percibidas por el oído humano, con el tiempo el campo se extendió a frecuencias mayores (ultrasonido  $f > 20 \text{ kHz}$ ) y menores (infrasonido  $f < 20 \text{ Hz}$ ).

ultrasonido de  
potencia

La acústica es no lineal; su estudio es aproximado ya que a baja potencia sólo el efecto lineal se aprecia, no obstante, al incrementar la intensidad y la frecuencia se observan efectos particulares. El ultrasonido de potencia es la rama de la acústica que estudia las ondas ultrasónicas de alta intensidad: ondas que modifican las propiedades del medio donde se propagan.

### Cavitación

La aplicación de ondas ultrasónicas de alta intensidad en líquidos produce efectos fisicoquímicos que dan paso a la rama de la sonoquímica. La cavitación es el mecanismo encargado de generar tales fenómenos (Chen, et al. 2012).

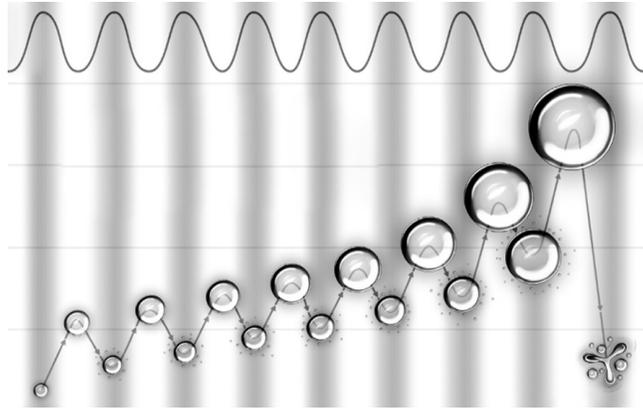
La presión vacuométrica requerida para evaporar un líquido se conoce como *umbral de cavitación estático*. Para un líquido puro depende únicamente de las fuerzas de unión molecular, razón por la que los valores son de cientos de megapascuales. Un líquido real tiene *núcleos de cavitación*, es decir, impurezas (*heterogeneidades*) que disminuyen el valor del umbral a decenas de megapascuales.

Cuando los núcleos de cavitación se exponen a ondas acústicas de suficiente intensidad se evaporan en burbujas dentro del líquido. Las burbujas se expanden durante el periodo de rarefacción y se contraen durante el de compresión. Cuando se expande más gas puede ingresar en ella—debido a su mayor superficie—que cuando se contrae. Este proceso se conoce como *difusión rectificada* (Gallego Juárez y Graff 2015).

El *umbral de cavitación acústico* es la amplitud de la onda de presión acústica requerida para evaporar al fluido. Es común expresarlo en términos de su intensidad acústica equivalente (Yasuda, et al. 2011). Su valor parte del umbral estático, para una frecuencia de cero, y aumenta a partir de una cierta frecuencia de corte, comúnmente en el orden de unidades de megahertz. La reducción en la duración del período limita al proceso de difusión rectificada (Mason y Peters 2002).

Eventualmente la burbuja alcanza un tamaño resonante y puede explotar violentamente o desintegrarse en pequeñas burbujas. La *Figura 2.2* muestra el proceso de difusión rectificada y colapso de la burbuja.

El primer caso se conoce como *cavitación transitoria* y se caracteriza por una repentina contracción, generando presiones locales de hasta 2 000 atm, temperaturas de más de 5 000 °C



**Figura 2.2:** Crecimiento de la burbuja mediante difusión rectificada, las zonas claras representan el periodo de rarefacción mientras las oscuras representan el de compresión. Al alcanzar el tamaño resonante la burbuja colapsa.

Fuente: Gallego Juárez, Juan A. 2015. *Power Ultrasonics*. Woodhead Publishing.

y sonoluminiscencia. Si no existen perturbaciones en la vecindad de la burbuja, esta colapsa de forma simétrica y genera una onda de choque. Si existe alguna frontera en la vecindad de la burbuja, ésta colapsa asimétricamente y genera un microflujo de hasta  $100 \frac{m}{s}$  cuya fuerza puede erosionar la superficie de frontera. Dichos colapsos generan los cambios en el medio que caracterizan a una *burbuja activa*.

Si la burbuja se desintegra antes de colapsar, el fenómeno se llama *cavitación estable* y se dice que la burbuja es *inactiva* (no produce actividad sonoquímica). Los restos de la burbuja comienzan el proceso de difusión rectificada de nuevo—consecuencia de la repetición cíclica del proceso—generando altos esfuerzos cortantes en su vecindad (Grieser, et al. 2015).

## Flujo

Un fluido no solo se comprime en respuesta a las ondas acústicas, también fluye ante su propagación. Este fenómeno se explica mediante el término advectivo de la ecuación de Euler, el cual sólo existe si hay un gradiente en la velocidad del fluido con la distancia, *Ecuación 2.4*. Tal gradiente puede ser causado por la disipación de las ondas acústicas en el fluido (*viento de cuarzo* o *viento de Eckart*) y por la acción de una onda estacionaria (*flujos de Rayleigh* y *Schlichting*).

$$\frac{D(\rho \vec{v})}{Dt} = \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla(\rho \vec{v}) \tag{2.4}$$

El viento de cuarzo de Eckart es causado por diferencias de presión en distintos puntos del fluido. Los gradientes de presión son consecuencia de la disipación de la onda acústica, pues las oscilaciones son de mayor intensidad en zonas adyacentes al origen del sonido que en zonas distantes. El gradiente de la *intensidad acústica*  $I_a$  (*Ecuación 2.5*) produce una *fuerza de radiación acústica*  $F_a$  (*Ecuación 2.6*) sobre el medio que desplaza partículas del fluido junto

con la onda al propagarse. El viento de cuarzo es inherente a la propagación del sonido, aunque solo es observable en ondas de alta intensidad y frecuencia (Cavalieri, et al. 2016).

$$I_a = c \bar{\rho} \tilde{v}^2 \quad 2.5$$

$$F_a = -\frac{1}{c} \frac{\partial I_a}{\partial x} \quad 2.6$$

### 2.3 Atomización acústica

Cuando las ondas ultrasónicas se dirigen a una interfaz líquido-gaseosa, de portar suficiente intensidad, desprenderán y expulsarán pequeñas partículas de la superficie.

#### Mecanismos

Los mecanismos causantes de la atomización ultrasónica aún no son comprendidos, no obstante, las observaciones experimentales han demostrado que la cavitación y las ondas capilares son los principales ejecutores.

La hipótesis de las ondas capilares parte de la observación de ondas superficiales ante la acción de radiación acústica. Las crestas de las ondas capilares crecen hasta el punto en que desprenden partículas. Partiendo de esta hipótesis, la primera ecuación de predicción de diámetro de partícula atomizada  $\bar{d}$  (Lang 1962) asume que será una fracción  $a$  de la longitud de onda superficial  $\lambda$ . La longitud de onda es función de la frecuencia de la onda ultrasónica  $f$ , la densidad y la tensión superficial del líquido  $\sigma$ . La fracción se ha aproximado a 0.34 para frecuencias en los rangos de kilohertz y 0.96 para frecuencias en los rangos de megahertz.

$$\bar{d} = a \lambda \quad 2.7$$

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{8 \pi \sigma}{\bar{\rho} f}} \quad 2.8$$

La hipótesis de cavitación sugiere que la atomización es consecuencia de las ondas de choque de burbujas activas en la superficie. La cavitación es el fenómeno dominante cuando el valor del umbral de cavitación acústico es menor al del *umbral de atomización*: la intensidad ultrasónica mínima para atomizar un líquido.

#### Fineza de la neblina

El proceso de atomización no produce partículas de un tamaño único, por ende, la neblina se caracteriza por la distribución del tamaño de sus partículas. El tamaño suele medirse mediante el diámetro de las partículas, aunque también es posible utilizar la superficie y el volumen.

El proceso de atomización no depende únicamente de las ondas capilares, para predecir satisfactoriamente el diámetro medio de la neblina se deben tomar en cuenta:

- El flujo mediante el *número de Weber*  $We$  (Ecuación 2.9 donde  $\dot{V}$  es el gasto volumétrico).

- Los efectos viscosos mediante el *número de Ohnesorge*  $Oh$  (Ecuación 2.10 donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica).
- La energía acústica mediante el *número de intensidad*  $In$  (Ecuación 2.11 donde  $\tilde{r}_M$  es la amplitud de la vibración (Dalmoro, et al. 2013), Ecuación 2.12).

El resultado es una correlación universal de predicción de diámetro de partícula (Ecuación 2.13), donde  $k_A$  es una constante que vale 0.1 (Rajan y Pandit 2001).

$$We = \frac{f \dot{V} \bar{\rho}}{\sigma} \quad 2.9$$

$$Oh = \frac{\mu}{f \tilde{r}_M^2 \bar{\rho}} \quad 2.10$$

$$In = \frac{f^2 \tilde{r}_M^4}{c \dot{V}} \quad 2.11$$

$$\tilde{r}_M = \frac{1}{\pi f} \sqrt{\frac{I_a}{2 c \bar{\rho}}} \quad 2.12$$

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\frac{\pi \sigma}{\bar{\rho} f^2}} (1 + k_A We^{0.22} Oh^{0.166} In^{-0.0277}) \quad 2.13$$

La completa caracterización de la neblina sólo se obtiene a partir de ajustar datos experimentales a una distribución, las más utilizadas son la normal y la Rosin-Rammler, Ecuación 2.14;  $V_d$  es la fracción volumétrica de las partículas de diámetro menor a  $d$  y  $s_R$  es una medida de la dispersión de las partículas.

$$V_d = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^{s_R}} \quad 2.14$$

Para las aplicaciones de combustión el parámetro más útil es el diámetro medio de Sauter ( $SMD$  por sus siglas en inglés). Es un indicador de la transferencia de masa y rapidez de reacción ya que expresa la relación volumen/superficie en la neblina. La Ecuación 2.15 indica el cálculo del diámetro:  $i$  representa un rango de tamaño,  $N_i$  el número de partículas en ese rango y  $d_i$  el diámetro medio de dichas partículas.

$$SMD = \frac{\sum N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2} \quad 2.15$$

Una mezcla aire-combustible con una neblina de  $SMD$  de  $10 \mu\text{m}$  o menor se quema a la misma velocidad que la mezcla en estado gaseoso, mientras que una neblina con un  $SMD$  mayor a los  $30 \mu\text{m}$  inhibe la propagación de la flama (Meacham 2006).

finiza de la  
mezcla y  
combustión

Las características que diferencian a la atomización ultrasónica son:

- Una distribución uniforme del tamaño de sus partículas.
- El diámetro de las partículas puede llegar a valores micrométricos.
- No es necesario presurizar el líquido para atomizarlo.
- No produce un aumento de temperatura.
- El tamaño de las partículas se puede controlar (disminuye al aumentar la frecuencia) y no es afectado por el flujo atomizado.

atomización  
ultrasónica

- El flujo puede aumentar hasta un valor máximo y produce una baja velocidad de expulsión.

El flujo máximo depende de la geometría del atomizador (superficie de radiación), de la intensidad acústica y de la disipación de la energía en el líquido, los cuales afectan que tan rápidamente se atomiza el líquido; de ser demasiado rápido el líquido no podrá extenderse sobre la superficie del atomizador y aumentará el tamaño de las partículas.

### Fenómenos secundarios

Al atomizar una solución—dependiendo de las propiedades químicas del solvente y el soluto—la neblina posee una concentración distinta de soluto que la encontrada en la solución original; éste es el principio básico de la separación. Se ha observado que la atmósfera dónde ocurre la atomización influencia la concentración de soluto en la neblina (Grieser, et al. 2015).

Al atomizar sólidos en suspensión es posible separar partículas de tamaños específicos al atraparlas en la neblina. El tamaño de las partículas capturadas cae en el rango de los diámetros de las partículas atomizadas, las partículas de menor tamaño no son atrapadas en la neblina. Esto implica que la neblina es capaz de reconocer el tamaño de partículas cuándo estas son de algunos cientos de nanómetros (Cavalieri, et al. 2016).

Los mecanismos que hacen posible las separaciones de soluciones y de partículas aún son desconocidos. Ambos fenómenos implican una gran rama de oportunidades tanto de innovación como de investigación.

## 2.4 Generador ultrasónico

reacción  
ultrasónica

Una reacción ultrasónica ocurre cuando un transductor ultrasónico controlado por un generador electrónico radia, a través de un sonotrodo, ondas acústicas al medio a modificar (carga).

sistema  
mecatrónico

El dispositivo que produce una reacción ultrasónica se conoce como generador ultrasónico; consiste en tres componentes fundamentales que acoplan subsistemas electrónicos y mecánicos para lograr efectos fisicoquímicos controlados (Cheers 2016). Se trata de un sistema mecatrónico.

### Transductor

Es el componente que genera las oscilaciones mecánicas al transformar la energía suministrada en energía acústica. Existen transductores electromecánicos (piezoeléctricos y magnetostrictivos), neumáticos e hidráulicos (silbato y sirenas), ópticos (láseres y microondas) y mecánicos.

Para las aplicaciones de alta potencia los transductores electromecánicos son los que pueden suministrar la intensidad requerida. Los transductores magnetostrictivos se caracterizan por una larga vida útil, eficiencias menores al 50% y no operan a altas frecuencias ultrasónicas (megahertz). Los transductores piezoeléctricos presentan eficiencias de hasta 95% y operan a

Parámetro	Unidades	Descripción
Frecuencia de operación	Hz	Frecuencia de resonancia, normalmente se indica junto con una varianza.
Potencia	W	Potencia nominal a la que el cristal opera.
Voltaje	V	Voltaje máximo pico a pico al que el cristal opera.
Impedancia en resonancia	$\Omega$	Pérdidas eléctricas del cristal en resonancia.
Capacitancia estática	nF	Capacitancia del cristal sin carga.
Superficie de radiación	mm <sup>2</sup>	Área que oscilará.
Capacidad de atomización	$\frac{cm^3}{min}$	Volumen por unidad de tiempo que el cristal es capaz de atomizar a su potencia nominal.
Temperatura de operación	°C	Rango de temperatura donde el cristal puede operar.
Coefficiente de acoplamiento electromecánico	%	Eficiencia con que la potencia eléctrica se transforma en mecánica.
Tiempo de vida	hrs	Tiempo de operación esperado del cristal antes de fallar.

**Tabla 2.2:** Parámetros de un cristal atomizador piezoeléctrico.

altas frecuencias ultrasónicas, suelen sobrecalentarse y pierden su eficiencia con el tiempo (Peshkovsky y Peshkovsky 2010).

En la atomización—dadas las altas frecuencias y la baja potencia relativas a otras aplicaciones de ultrasonido de potencia—el transductor utilizado son los cristales piezoeléctricos de *titanato zirconato de plomo* (PZT). La *Tabla 2.2* expresa los parámetros que describen un transductor piezoeléctrico atomizador comercial.

Durante los años 60 se desarrollaron quemadores ultrasónicos que utilizaban silbatos neumáticos para atomizar el combustible y alimentar calderas. Dichos quemadores generaron aumentos en la temperatura de combustión al igual que en la eficiencia (Ensminger y Bond 2012).

### Generador electrónico

Es el componente que produce las ondas eléctricas que otorgan potencia al transductor. Puede ser un sistema de lazo abierto—únicamente produce un voltaje de corriente alterna fijo—o de lazo cerrado que sintoniza la frecuencia del oscilador con la frecuencia de resonancia del sistema;

dependiendo de la aplicación puede incorporar un control de amplitud para asegurar que la intensidad ultrasónica es constante.

El generador se compone de subsistemas eléctricos y electrónicos (Alvarado Maldonado 2013):

- Oscilador: produce la señal de la forma y frecuencia deseada; de tener control de frecuencia éste es el dispositivo que la modifica.
- Amplificador: amplifica la señal de entrada al voltaje requerido y suministra la corriente que el transductor demanda; de tener control de amplitud éste es el dispositivo que la modifica.
- Acoplador de impedancias: maximiza la potencia suministrada a la carga, pues es una impedancia compleja.

### Sonotrodo

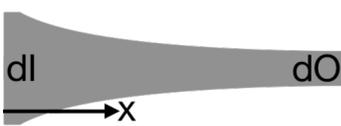
Análogo a un electrodo, es el componente que suministra las oscilaciones mecánicas de la manera que el proceso requiera.

La opción más simple de suministrar las ondas es poner en contacto directo el *transductor* y el líquido (*Figura 2.3a*). Es posible suministrar el líquido al cristal (película delgada) o sumergirlo en él. La *Ecuación 2.16* calcula la potencia que el sonotrodo suministra al fluido,  $A$  es la superficie de radiación.

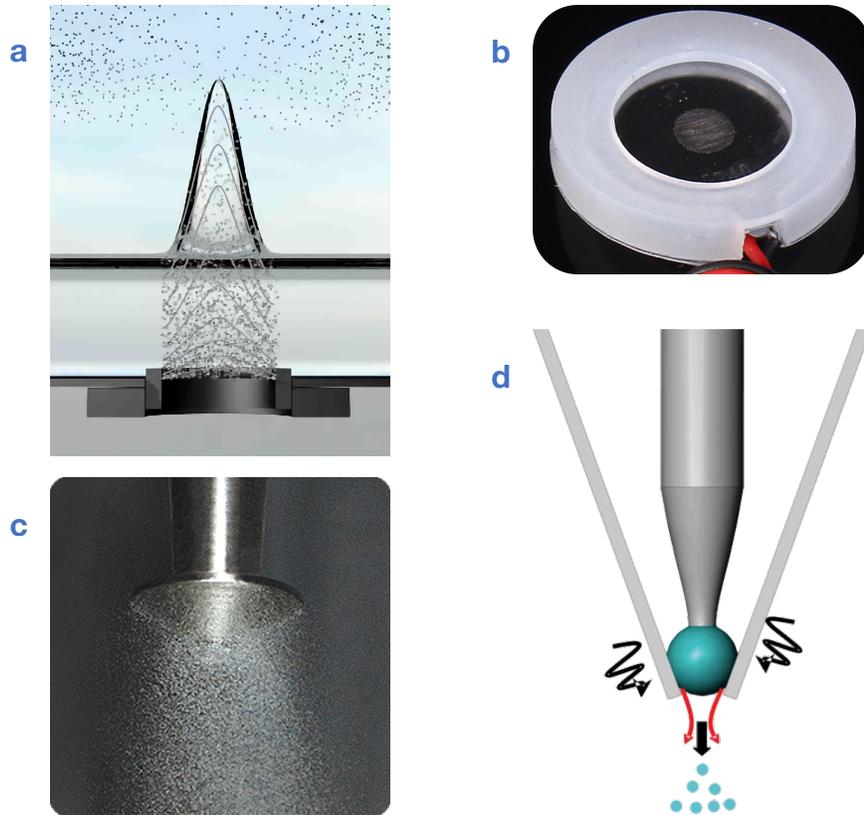
$$\dot{E} = \frac{2 \pi^3 \rho f^4 A^2 \tilde{r}_M^2}{c} \quad 2.16$$

Las *microtoberas* (*Figura 2.3b*) son microporos cónicos en una hoja metálica acoplada al transductor. Sus ventajas son su bajo consumo energético y su capacidad de trabajar a frecuencias desde decenas de kilohertz hasta unidades de megahertz.

Las *puntas amplificadoras* (*Figura 2.3c*) son cuerpos de aluminio o titanio acoplados al transductor que concentran la energía acústica y amplifican la amplitud de las oscilaciones; se diseñan para ser resonantes con el transductor y la carga. La *Tabla 2.3* muestra los dos diseños más simples de puntas amplificadoras y sus ecuaciones características donde  $d$  es el diámetro

Punta	Diagrama	Ecuación	Factor de amplificación	Punto de esfuerzo máximo
Escalonada		$d = \begin{cases} d_I, & x \leq \frac{\lambda}{4} \\ d_O, & x > \frac{\lambda}{4} \end{cases}$	$\frac{d_O^2}{d_I^2}$	$x = \frac{\lambda}{4}$
Exponencial		$d = d_I e^{-\gamma x}$	$\frac{d_O}{d_I}$	$x = \frac{c}{\omega} \operatorname{atan} \left( -\frac{2 \omega}{\gamma c} \right)$

**Tabla 2.3:** Puntas amplificadoras,  $d_I$  es el diámetro inicial y  $d_O$  el final.



**Figura 2.3:** Tipos de sonotrodos para atomización: (a) cristal piezoeléctrico (b) microtoberas (c) punta amplificadora (d) oscilador de onda superficial.

*Fuente: (a) Derrick, Jason. 2015. How Ultrasonic Humidifiers Work: blog.stulz-usa.com.*

*(b) ICStation. 2018. Micropores Ultrasonic Atomizing Transducer: icstation.com.*

*(c) Sono-Tek. 2018. Operating Considerations: sono-tek.com.*

*(d) Darmawan, Marten. 2015. Rapid and Sustainable Surface Acoustic Wave Atomizer: Aerosol Science and Technology.*

de la sección transversal, el cual varía con la dirección de desplazamiento  $x$ . La longitud de la punta amplificadora debe ser  $\frac{\lambda}{2}$  y el transductor se ubica en un nodo resonante (Ensminger y Bond 2012).

Los *osciladores de ondas acústicas superficiales* (Figura 2.3d) son finas láminas de cristales piezoeléctricos depositados sobre un papel capilar que transmite las oscilaciones en forma de ondas de Rayleigh. El fluido se atomiza al ser depositado sobre el papel capilar. Este tipo de sonotrodo aún es experimental (Darmawan, et al. 2015); sus ventajas son un bajo consumo energético y capacidad de operar frecuencias en el rango de decenas de megahertz.

Modelado del sistema

La respuesta permanente de los sistemas acústicos y mecánicos pueden modelarse análogamente a los sistemas eléctricos de corriente alterna. Es conveniente plantear un modelo lineal de todo el sistema como primera aproximación para su estudio y diseño.

El modelo del sistema ultrasónico consiste en un circuito equivalente que representa al transductor y la carga mecánica. Para los componentes mecánicos la fuerza que ejerce el sonotrodo en el medio es análoga al voltaje y la velocidad a la que se desplaza es análoga a la corriente. Para el sistema acústico la presión en un punto del medio es análoga al voltaje y la velocidad a la que se desplazan las partículas de ese punto es análoga a la corriente. A partir de estas equivalencias se definen dos parámetros: la impedancia mecánica  $Z_m$  (Ecuación 2.17) y la impedancia acústica  $Z_a$  (Ecuación 2.18).

$$Z_m \doteq \frac{F}{v} \tag{2.17}$$

$$Z_a \doteq \frac{\tilde{p}}{\tilde{v}} = c \bar{\rho} \tag{2.18}$$

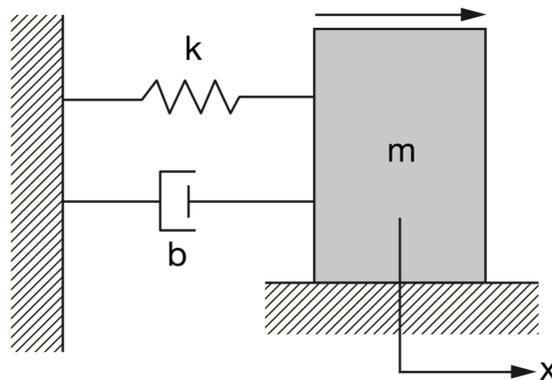
El circuito equivalente de un transductor piezoeléctrico se divide en sus componentes eléctricos y mecánicos. Eléctricamente queda representado por la capacitancia del cristal  $C_t$  y una resistencia que representa las pérdidas dieléctricas en él  $R_d$ .

Mecánicamente el sistema se representa por un modelo lineal del transductor y la carga. Se compone de la masa del transductor  $m$  (Ecuación 2.19), un resorte que representa su elasticidad  $k$  (Ecuación 2.20) y un amortiguador  $b$  (Ecuación 2.21) que modela la carga. El espesor del transductor es  $l$  y  $Y$  es su módulo de elasticidad. La Figura 2.4 modela la representación lineal del sistema.

$$m = \frac{\rho A l}{2} \tag{2.19}$$

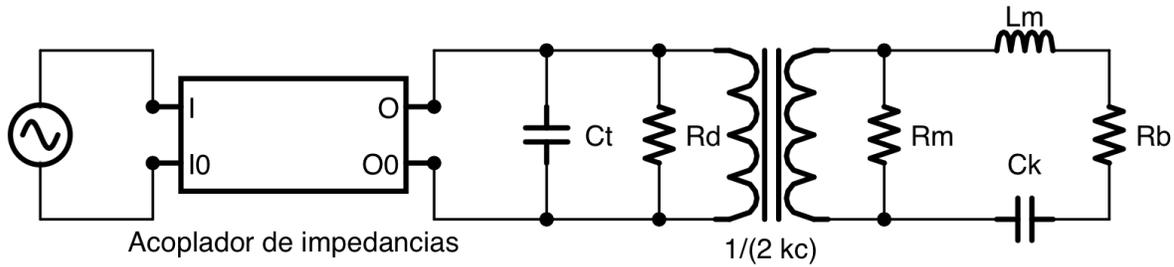
$$k = \frac{\pi^2 A Y}{2 l} \tag{2.20}$$

$$b = Z_a A \tag{2.21}$$



**Figura 2.4:** Modelo lineal del sistema ultrasónico.

Fuente: Gallego Juárez, Juan A. 2015. *Power Ultrasonics*. Woodhead Publishing.



**Figura 2.5:** Circuito equivalente del generador ultrasónico.

Dichos parámetros se operan por un *factor de transformación*  $\alpha$  (Ecuación 2.22) para obtener una inductancia  $L_m$  (Ecuación 2.23), una capacitancia  $C_k$  (Ecuación 2.24) y una resistencia  $R_b$  (Ecuación 2.25) equivalentes. Una segunda resistencia representa las pérdidas mecánicas del sistema  $R_m$ . El circuito equivalente del sistema ultrasónico se encuentra acoplado al sistema eléctrico mediante un transformador que modela la eficiencia de transformación del transductor mediante el coeficiente de acoplamiento electromecánico  $k_c$ , *Figura 2.5*.

$$\alpha = C_t \frac{AY}{l} \tag{2.22}$$

$$L_m = \frac{m}{\alpha} \tag{2.23}$$

$$C_k = \frac{\alpha}{k} \tag{2.24}$$

$$R_b = \frac{b}{\alpha} \tag{2.25}$$

No toda la potencia suministrada a la carga genera un efecto fisicoquímico en el medio, parte de la energía es disipada. La energía disipada puede medirse a través del aumento en la temperatura del medio, no obstante, para la atomización esta temperatura es despreciable por lo que la energía disipada se puede considerar como cero.

### 2.5 Selección del sonotrodo

El diseño del inyector ultrasónico se determina por el sonotrodo que utiliza para pulverizar, pues es el dispositivo que rige el principio de funcionamiento del inyector.

El desarrollo del inyector comienza identificando las opciones factibles de sonotrodos. Un análisis de los sonotrodos investigados nos permite descartar las opciones no viables.

#### Transductor

Al atomizar directamente sobre el transductor se puede operar a altas frecuencias. El funcionamiento del sonotrodo permite definir dos variantes de diseño:

- Sumergir el transductor en el combustible y controlar el gasto con la potencia suministrada. El viento de cuarzo producirá una fuente que habrá que separar.

- Operar el transductor a una potencia fija y distribuir el combustible sobre su superficie. Se requerirá implementar el sistema de suministro de gasto controlado.

### *Microtoberas*

Permiten producir una neblina con una fineza que ronda los  $10 \mu\text{m}$  operando a frecuencias en el rango de  $100 \text{ kHz}$ . Su principal desventaja es generar un gasto menor al del transductor directo.

### *Oscilador de onda superficial*

Estos sonotrodos producen la neblina más fina con una mínima demanda de potencia, pero se encuentran en etapa experimental. Al no ser comerciales no son una opción para implementarse en el inyector.

### *Punta amplificadora*

La forma de la punta permite definir la geometría de la neblina expulsada y el dispositivo ofrece el mayor gasto de todos los sonotrodos al amplificar las vibraciones.

La punta se debe diseñar para resonar a la frecuencia de atomización establecida. Utilizando las ecuaciones de diseño resumidas en la *Tabla 2.3* se calculan las dimensiones que requiere la punta. Estableciendo una frecuencia de  $1.7 \text{ MHz}$  y aluminio como material de fabricación ( $c = 5.1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  (ZVEI 1980)), se obtiene que la punta amplificadora debe tener una longitud de  $3 \text{ mm}$ .

La necesidad de que las puntas amplificadoras sean resonantes a la frecuencia de operación las vuelve opciones no factibles para aplicaciones de altas frecuencias dadas las dimensiones obtenidas, descartando a las puntas como un posible sonotrodo.

## Bibliografía

- Alvarado Maldonado, José R. 2013. "Etapa de potencia de 50 W para aplicaciones de ultrasonido." Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cavalieri, Francesca, Farid Chemat, Okitsu Kenji, Anandan Sambandam, Kyuichi Yasui, y Bogdan Zisu. 2016. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. Springer Reference.
- Cheers, Christopher F. 2016. *PowerUltrasonics*. 2 de Junio. Último acceso: 29 de Diciembre de 2017. <http://www.powerultrasonics.com>.
- Chen, Dong, Sanjay K. Sharma, y Ackmez Mudhoo. 2012. *Handbook on Applications of Ultrasound*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Dalmoro, Annalisa, Matteo d'Amore, y Anna A. Barba. 2013. «Droplet Size Prediction in the Production of Drug Delivery Microsystems by Ultrasonic Atomization.» *Translational Medicine* 7 (2): 6-11.
- Darmawan, Marten, Jaehyun Lee, Jihoon Kim, y Doyoung Byun. 2015. «Rapid and Sustainable Surface Acoustic Wave Atomizer.» *Aerosol Science and Technology* 49 (12): 1271-1280.
- Ensminger, Dale, y Leonard J. Bond. 2012. *Ultrasonics Fundamentals, Technologies, and Applications*. 3ª Edición. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Gallego Juárez, Juan A., y Karl F. Graff. 2015. *Power Ultrasonics*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing.
- Grieser, Franz, Pak-Kon Choi, Naoya Enomoto, Hisashi Harada, Kenji Okitsu, y Kyuichi Yasui. 2015. *Sonochemistry and the Acoustic Bubble*. Waltham, Massachusetts: Elsevier.
- Lang, Robert J. 1962. «Ultrasonic Atomization of Liquids.» *The Journal of the Acoustical Society of America* 34 (1): 6-8.
- Lefebvre, Arthur H., y Vincent G. McDonell. 2017. *Atomization and Sprays*. 2ª Edición. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Mason, Timoty J., y Dietmar Peters. 2002. *Practical Sonochemistry*. 2ª Edición. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Meacham, John Marcus. 2006. "A Micromachined Ultrasonic Droplet Generator Design, Fabrication, Visualization, and Modeling." Tesis doctoral. Georgia Institute of Technology.
- Peshkovsky, Alexey S., y Sergei L. Peshkovsky. 2010. *Acoustic Cavitation Theory and Equipment Design Principles for Industrial Applications of High-Intensity Ultrasound*. Nueva York: Nova Science Publishers.
- Phanphanit, Phattharawadee. 2011. "Experimental and Computational Study of an Ultrasonic Atomizer." Tesis doctoral. Universidad de Manchester.

- Rajan, Raghavachari, y Aniruddha B. Pandit. 2001. «Correlations to Predict Droplet Size in Ultrasonic Atomisation.» *Ultrasonics* (39): 235-255.
- Yasuda, Keiji, Hiroyuki Honma, Zheng Xu, Yoshiyuki Asakura, y Shinobu Koda. 2011. «Ultrasonic Atomization Amount for Different Frequencies.» *Japanese Journal of Applied Physics* (50): 07HE23.
- ZVEI. 1980. *Ultrasonic assembly of thermoplastic mouldings and semi-finished products - Recommendations on methods, construction and applications*. Frankfurt am Main: Fachverband Elektroschweissgeräte.

## 3 Implementación del inyector ultrasónico

La atomización ultrasónica a altas frecuencias produce una neblina de un diámetro de partícula micrométrico y una distribución estrecha con un *SMD* menor a los obtenidos por un carburador o un inyector. Dicho mejora en la pulverización de combustible se refleja en un elevando su eficiencia, acelerando su calentamiento y cambiando las relaciones de sus emisiones.

Al comienzo del capítulo se presenta el motor y la instrumentación utilizada durante las pruebas. Posteriormente se desarrolla un sistema de muestreo para tomar lecturas representativas de las emisiones. Finalmente se diseña y fabrica el inyector de acuerdo con las necesidades del motor.

### 3.1 Banco de pruebas

La investigación de las ventajas de un inyector ultrasónico se realiza en un motor de gasolina de cuatro tiempos. El desempeño del inyector se juzga con respecto del desempeño normal del motor equipado con su carburador original.

#### Especificaciones del motor

El motor proviene de una motocicleta *Honda CGL 125*, se trata de un motor de ignición por chispa de cuatro tiempos y un cilindro; sus especificaciones mecánicas se enlistan en la *Tabla 3.1* (Moto Honda da Amazônia Ltda. 2001).

Las especificaciones de las válvulas y la bujía son:

- Las válvulas de admisión y escape abren 1 *mm*.
- La admisión abre en el punto muerto superior y cierra 30° después del punto muerto inferior.
- El escape abre 30° antes del punto muerto inferior y cierra en el punto muerto superior.
- La bujía dispara la chispa 15° antes del punto muerto superior.

Parámetro	Descripción
Diámetro del pistón	56.5 mm
Carrera	49.5 mm
Cilindrada	124.1 cm <sup>3</sup>
Relación de compresión	9: 1
Válvulas	OHV (válvulas en la culata)
Lubricación	Forzada a presión y baño en aceite
Enfriamiento	Forzado por aire
Peso en seco	29.8 kg
Encendido	CDI (ignición por descarga de capacitor)

**Tabla 3.1:** Especificaciones mecánicas del motor Honda CGL 125.



**Figura 3.1:** Motor sin el escape montado en el banco de pruebas: (a) tanque de combustible (b) culata (c) cárter (d) pedal de arranque (e) carburador (f) colector de admisión.

Las especificaciones del carburador son:

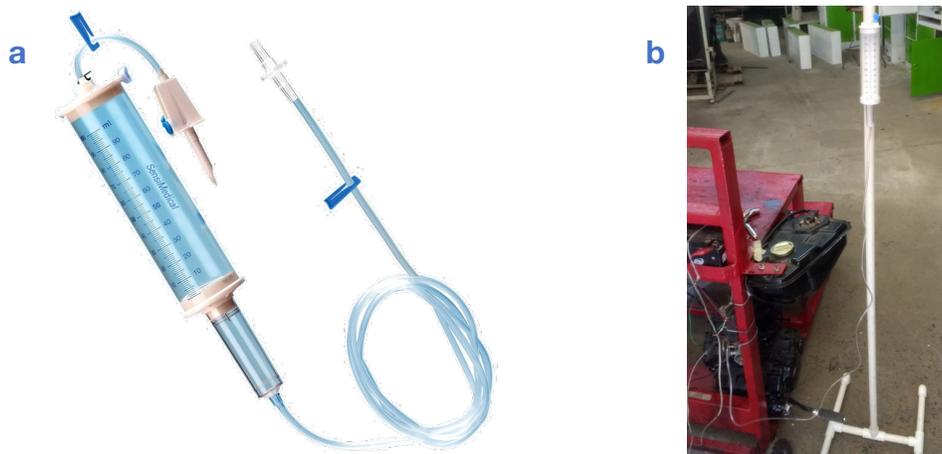
- Acelerador tipo válvula de pistón.
- Venturi de 20 mm de diámetro.
- Surtidor principal #120.
- Surtidor de ralentí #38.

La *Figura 3.1* muestra los principales componentes y accesorios del motor montado en el banco de pruebas.

### Desempeño del motor e instrumentación

Con el fin de caracterizar el desempeño nominal del motor se realizó un primer ensayo. Se midió el consumo de combustible durante el arranque en frío, la temperatura de operación después de veinte minutos de funcionamiento y las emisiones del motor equipado con el carburador.

El consumo de combustible se evaluó con una bureta de infusión médica; se aprovechó que es un recipiente graduado con una capacidad de 100 ml y una resolución de 1 ml, que cuenta con un filtro de partículas de 15  $\mu\text{m}$  y una manguera integrada de metro y medio de longitud (*Figura 3.2a*). A la bureta se le retiró el flotador interno de silicona después de observar que dicho material tiende a absorber gasolina y expandirse. El dispositivo se conectó al carburador y se montó en una estructura externa al banco para evitar el ruido de la vibración del motor en las lecturas (*Figura 3.2b*).



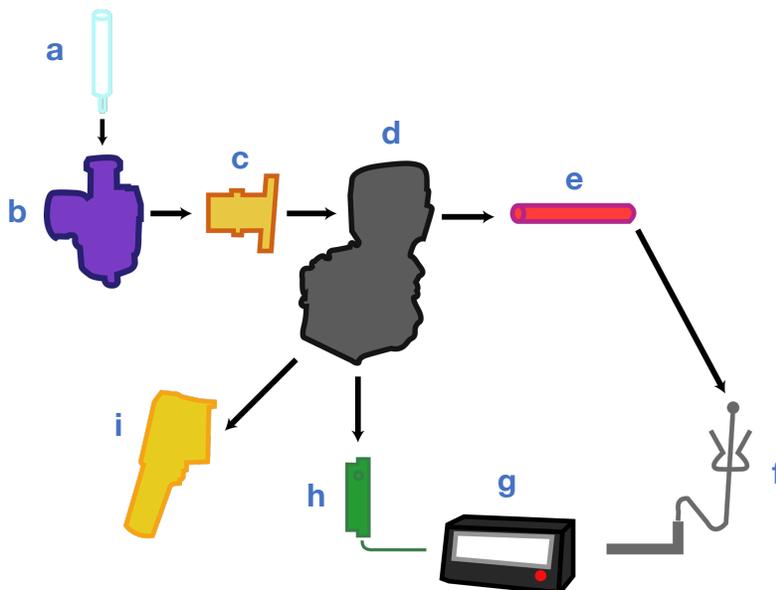
**Figura 3.2:** Medidor de consumo de combustible: (a) bureta (b) estructura de soporte.

Las emisiones, la relación estequiométrica y la velocidad del motor se midieron utilizando el analizador de gases *BrainBee AGS-688*. La *Tabla 3.2* detalla las lecturas que el analizador puede tomar. El tiempo de respuesta del dispositivo puede ser de hasta 15 segundos para las emisiones de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{HC}$  (Brain Bee S.p.A. n.d.).

Parámetro	Unidades	Lectura mínima	Lectura máxima	Tolerancia
CO	% vol	0	9.99	0.01
CO <sub>2</sub>	% vol	0	19.99	0.1
HC hexano	ppm vol	0	9 999	1
O <sub>2</sub>	% vol	0	25	0.01
NO <sub>x</sub>	ppm vol	0	5 000	1
$\lambda$		0.7	5	0.001
Velocidad	rpm	300	9 990	10
Temperatura de aceite	°C	20	150	1

**Tabla 3.2:** Características técnicas del analizador de gases de emisiones AGS-688.

La temperatura del motor se midió en su superficie utilizando la cámara termográfica *Fluke Ti400*, la cual permite adquirir imágenes térmicas con una resolución de  $320 \times 240$  puntos y mide temperaturas de  $-20$  °C a  $1200$  °C con una precisión de  $\pm 2$  °C. Se registraron las temperaturas del cárter, la culata y el colector de admisión.



**Figura 3.3:** Esquema del arreglo de la prueba preliminar: (a) medidor de consumo de combustible (b) carburador (c) colector de admisión (d) motor (e) escape (f) sonda (g) analizador de gases (h) tacómetro (i) cámara termográfica.

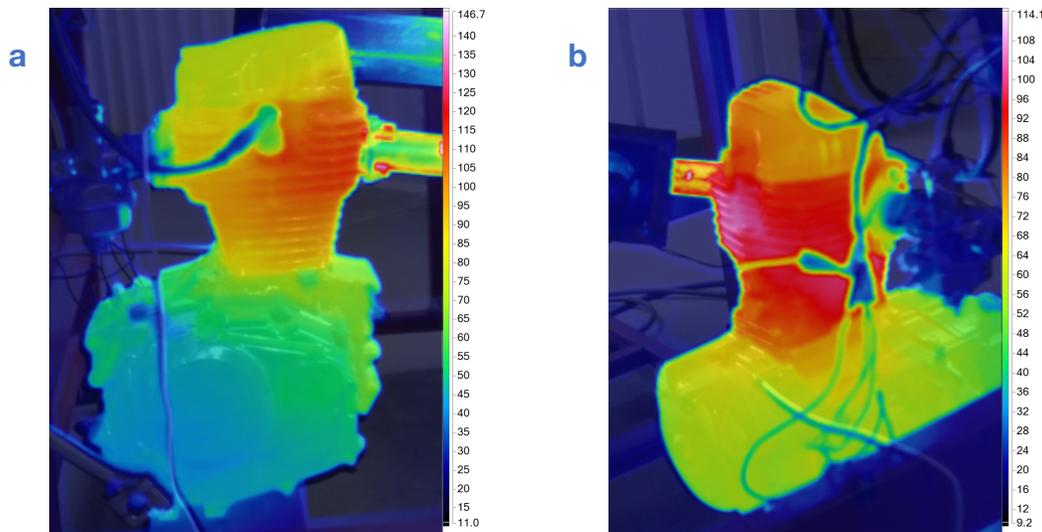
El esquema de la instrumentación del ensayo se muestra en la *Figura 3.3*.

Las pruebas se realizaron con el motor en ralentí. Para la caracterización del consumo de combustible el motor se encendió y durante seis minutos se registró su consumo. La *Tabla 3.3* muestra las lecturas, el combustible utilizado fue gasolina Premium.

Minuto	Velocidad rpm	Consumo ml
1	3 500	6.5
2	3 500	5
3	3 500	5
4	3 600	6
5	3 600	5
6	3 600	5

**Tabla 3.3:** Prueba a partir de arranque en frío en ralentí del consumo de combustible del motor.

El motor se dejó operar durante 20 minutos y, posteriormente, se registraron sus temperaturas y emisiones. La *Figura 3.4* muestra las temperaturas de operación del motor: 110 °C en la culata, 60 °C en el cárter y 30 °C en el colector de admisión. La lectura de emisiones se detuvo



**Figura 3.4:** Foto termográfica del motor después de 20 minutos operando en ralentí a 3 800 rpm: (a) vista de perfil (b) detalle frontal. Las escalas de temperatura están en °C.

al advertir que el nivel de monóxido superó el rango medible y que los hidrocarburos superaron las 2 000 *ppm*, niveles peligrosos para el sensor pues pueden saturarlo. Se observó que la relación estequiométrica con que opera el motor es de 0.7.

Dados los niveles de monóxido e hidrocarburos que emitió el motor, se decidió construir un sistema de muestreo que permita tomar medidas representativas de las emisiones.

### 3.2 Sistema de muestreo

El objetivo de los sistemas de muestreo es acondicionar una muestra de emisiones para que cumpla con los requisitos del instrumento de medición utilizado. El sistema debe preservar las propiedades fisicoquímicas de la muestra.

El flujo de las emisiones del motor varía continuamente, no obstante, la mayor parte de los métodos de muestreo requieren de un flujo constante para realizar las mediciones. Tal requisito se obtiene poniendo al motor a trabajar a una velocidad y carga fija y con un sistema de muestreo de volumen constante, *CVS*. En estos sistemas el flujo de emisiones se diluye con aire para amortiguar las pulsaciones del escape del motor, disminuir la concentración de las emisiones en la muestra a medir y evitar condensación de agua y la deposición de partículas sólidas (Fonseca González, et al. 2016).

Un *CVS* consta de (Code of Federal Regulations 2018):

- Túnel de dilución: túnel que mezcla los gases provenientes del escape del motor con aire atmosférico, el escape del motor se orienta aguas abajo. De ser necesario, debe mantener la temperatura de la mezcla por encima de los 190 °C para evitar condensación del agua atmosférica.
- Sistema de medición del flujo de mezcla: medidor de flujo para controlar el factor de dilución.
- Puerto de muestreo de la mezcla: punto en el túnel donde se garantiza la homogeneidad de la mezcla y se toma la muestra.
- Sistema de muestreo de la mezcla: puede ser continuo (una sonda que mide constantemente) o de bolsa (se empaqueta un cierto volumen de mezcla y se analiza).
- Puerto de muestreo del aire: punto de dónde se pueda tomar una muestra del aire atmosférico utilizado para la dilución.
- Sistema de muestreo del flujo de aire: puede ser continuo o de bolsa.

### Diseño y construcción

Dado que no se miden partículas sólidas—únicamente las emisiones gaseosas—los efectos de nucleación y condensación en la muestra no afectan. Como consecuencia, tampoco afectan significativamente la disminución de la temperatura en la muestra ni el tiempo que pasa dentro del sistema de muestreo. No obstante, es de vital importancia evitar reacciones químicas, por lo que el túnel de mezclado debe estar fabricado de un material inerte a los gases de escape (Burtscher y Majewski 2016).

Como túnel de dilución se utilizó un tubo de acero galvanizado de 1.3 m de largo y 69 mm de diámetro interno. En un extremo del tubo se colocó un ventilador que induce el flujo de aire para la mezcla, el otro extremo del tubo fungió como puerto de muestreo. El escape del motor se conectó al túnel a una distancia de 25 cm del ventilador, con un ángulo de 60° en dirección al puerto de muestreo. El ángulo permite disminuir el regreso de gases hacia el ventilador, mientras que la distancia al puerto permite favorecer la homogeneidad de la mezcla.

La sonda del analizador de gases se calibró con aire atmosférico, posteriormente se conectó a la salida del túnel de mezclado. Se trata de un sistema continuo de muestreo. La *Figura 3.5* muestra el sistema de muestreo y sus componentes.



**Figura 3.5:** Sistema de muestreo de volumen constante: (a) ventilador (b) conexión con el escape del motor (c) túnel de mezclado (d) puerto de muestreo.

Para calibrar el sistema de dilución, el motor se encendió a 4 000 *rpm* con el carburador y se varió la potencia del ventilador hasta obtener mediciones en el rango del analizador. Las mediciones de  $NO_x$  y relación estequiométrica no se midieron por la magnitud de la dilución.

Se evaluaron las velocidades de los flujos utilizando el anemómetro de tubo de Pitot *Extech HD350*: la velocidad del flujo del ventilador fue de  $25 \frac{cm}{s}$ , mientras que la del flujo promedio del escape del motor fue de  $52 \frac{cm}{s}$ .

### 3.3 Inyector ultrasónico

El atomizador ultrasónico debe adecuarse a las demandas del motor tanto en producción y suministro de neblina como en su disposición geométrica y propiedades del material. Identificar tales parámetros fue la base sobre la que se fundamentó el diseño.

### Parámetros de diseño

Se sabe que mientras más fina sea la neblina se obtendrá una mejor combustión, no obstante, producir oscilaciones de alta potencia a frecuencias superiores a 1 MHz requiere de circuitos complejos y, al aumentar la frecuencia, de mayor costo. Encontrar el equilibrio entre la fineza de la neblina y la frecuencia permite reducir la complejidad del sistema.

*Lefebvre* descubrió que una neblina de iso-octano con un *SMD* de 20  $\mu\text{m}$  se quema a una velocidad similar a la que se quemaría siendo completamente vapor. Por el contrario, una neblina con un *SMD* mayor a 30  $\mu\text{m}$  inhibe la propagación de la flama y la velocidad disminuye rápidamente con el aumento del diámetro (Ballal y Lefebvre 1981). A partir de 10  $\mu\text{m}$  y menores, ya no es apreciable ninguna diferencia en la velocidad de combustión (Meacham 2006).

El principal objetivo es atomizar una neblina cuyo *SMD* se mantenga por debajo de 30  $\mu\text{m}$ . No se han investigado ecuaciones que pronostiquen el *SMD* obtenido por atomización ultrasónica, si desea conocerse debe ser medido de una muestra de neblina. Se calculo el diámetro medio  $\bar{d}$  con la *Ecuación 2.13* y—dada la menor dispersión de tamaños de partículas en la atomización ultrasónica—se tomó como el *SMD* de la neblina. La *Tabla 3.4* muestra las propiedades de la gasolina Premium utilizadas para los cálculos (Castillo Hernández 2008).

Propiedad	Valor
Densidad	706 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Tensión superficial	22 $\frac{\text{mN}}{\text{m}}$
Viscosidad	0.5 mPa · s
Módulo de compresibilidad	1.125 GPa

**Tabla 3.4:** Propiedades físicas de la gasolina Premium.

La *Tabla 3.5* ilustra los resultados obtenidos para diversas frecuencias y diámetros de cristales comerciales. El cálculo del  $\bar{d}$  se realizó asumiendo una potencia de 5 W y se utilizó el valor del gasto volumétrico reportado en las hojas de datos de cada cristal. Tal valor se refiere a la atomización de agua, por lo que los resultados son preliminares y se utilizan para fines comparativos.

A partir de los análisis preliminares del desempeño del motor y de la fineza de la neblina se identificaron los parámetros que guiaron el diseño del inyector:

- El cristal piezoeléctrico por utilizar debe operar a una frecuencia de al menos 1.7 MHz.
- La parte del atomizador que esté en contacto con el colector debe soportar temperaturas de 100 °C.
- Se debe pulverizar un gasto de al menos 5  $\frac{\text{ml}}{\text{min}}$ .

Frecuencia	Gasto	Diámetro $\bar{d}$	
MHz	ml/h	mm	$\mu\text{m}$
1	380	25	27
1.7	380	25	23
2.4	350	16	18
3	300	16	16

**Tabla 3.5:** Diámetro medio de la neblina para cuatro cristales de distintos tamaños y frecuencias atomizando gasolina Premium.

El transporte de la neblina produce pérdidas de calidad, por lo que minimizar la distancia y mantener un flujo laminar son factores para tener en cuenta en el diseño final.

### Modelado del sistema

De acuerdo con los posibles sonotrodos identificados en el capítulo dos, se adquirieron tres transductores piezoeléctricos junto a sus respectivos generadores electrónicos. Los generadores comprados trabajan a una potencia establecida produciendo un gasto fijo.

Para caracterizar el gasto volumétrico de los transductores con gasolina, se pusieron a operar durante diez minutos y se midió su consumo de combustible cada minuto. La *Tabla 3.6* expresa los parámetros de los cristales junto a su gasto y  $\bar{d}$  estimado.

El primer análisis de un generador ultrasónico es su modelado como un oscilador simple amortiguado. De acuerdo con la *Ecuación 2.18*, la impedancia acústica para la gasolina Premium es de  $891 \frac{\text{kPa}\cdot\text{s}}{\text{m}}$ . La masa de los transductores se midió utilizando una báscula con precisión de centésimas de gramo. La elasticidad del material se calculó con la *Ecuación 2.20*–

Sonotrodo	Frecuencia	Diámetro	Espesor	Capacitancia	Voltaje	kc	Gasto	$\bar{d}$
	MHz	mm	mm	nF	V		ml/min	$\mu\text{m}$
Microtoberas	0.113	20	0.6	3	< 70	> 50%	0.6	10
Transductor	1.7	20	1.2	1.8	< 48	> 52%	10	24
Transductor	2.4	16	0.9	1.7	< 60	> 50%	2	15

**Tabla 3.6:** Parámetros y propiedades físicas de los transductores piezoeléctricos adquiridos.

Sonotrodo	Frecuencia	Masa	Elasticidad	Amortiguamiento
	MHz	g	GN/m	N · s/m
Microtoberas	0.113	0.54	122.09	209.99
Transductor	1.7	1.48	77.52	279.98
Transductor	2.4	0.68	69.45	179.19

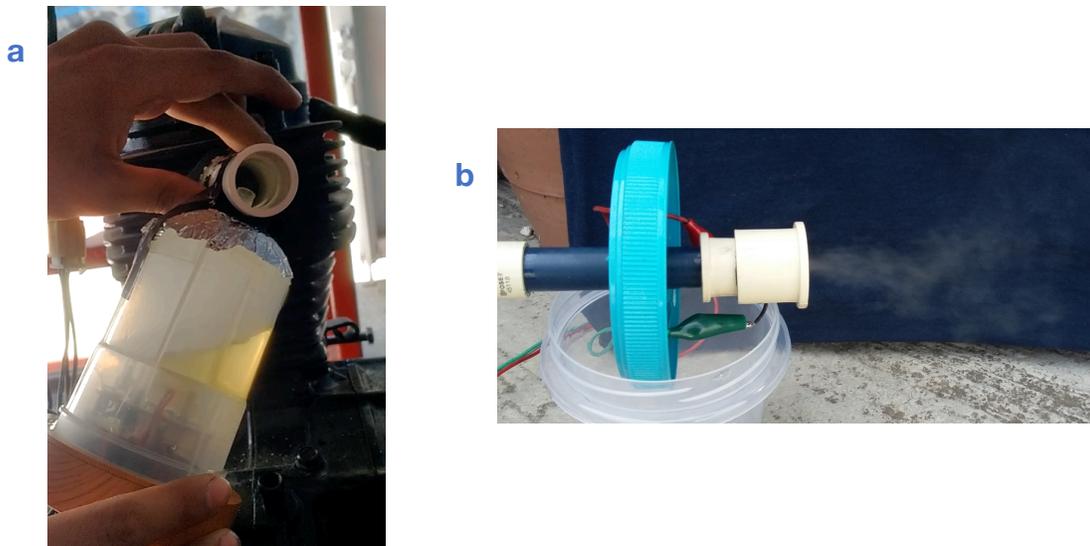
**Tabla 3.7:** Parámetros del modelo masa-resorte-amortiguador de los transductores piezoeléctricos

se consideró un módulo de Young de 63 GPa para el PZT (MEMS and Nanotechnology Exchange n.d.). La *Tabla 3.7* expresa los parámetros del modelo.

### Pruebas de concepto de sonotrodos

Para seleccionar el principio de funcionamiento se realizó una prueba con las dos opciones de sonotrodo identificadas. Se evaluó la capacidad de los sonotrodos de arrancar el motor y de mantener una velocidad constante.

El transductor de 2.4 MHz se obtuvo de un humidificador. El dispositivo se aprovechó para atomizar gasolina y depositarla en el colector de admisión del motor (*Figura 3.4a*). El motor arrancó en frío y mantuvo una combustión estable por un periodo de 20 segundos antes de apagarse.



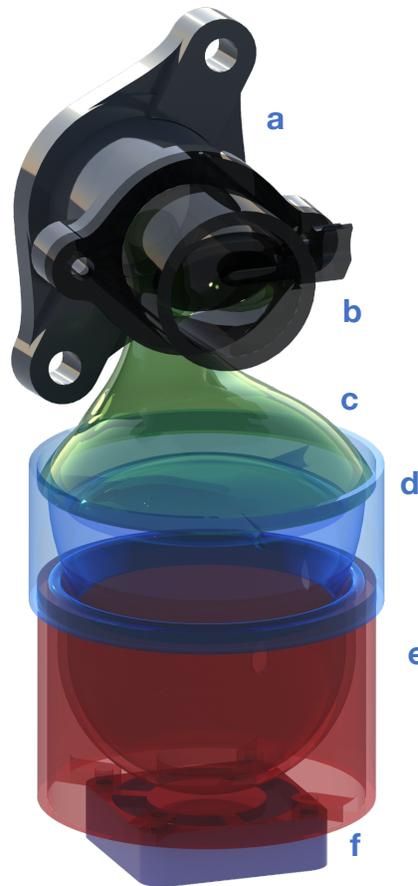
**Figura 3.6:** Pruebas de concepto de los sonotrodos (a) atomizador de cristal sumergido en combustible (b) atomizador de microtoberas.

Utilizando dos sonotrodos de microtoberas se construyó un atomizador que deposita la neblina a la entrada del colector (*Figura 3.4b*). El motor no logró ser arrancado.

Como resultado de esta primera prueba se decidió utilizar al transductor como sonotrodo. Se observó que la cámara dónde se realiza la atomización se satura y un ventilador induce una corriente de aire para circular la neblina. Se decidió sumergir al transductor en combustible por su simplicidad en fabricación y separar la neblina mediante una trampa dentro del pulverizador. La corriente de aire será inducida por la succión del motor.

### Diseño

El funcionamiento del inyector se basa en una cámara de pulverización, una trampa de separación y una boquilla que suministra la neblina al colector de admisión. Adicionalmente se diseña una válvula mariposa que se conecta al colector de admisión para controlar la entrada de aire a la cámara de combustión. Las partes principales del inyector se muestra en la *Figura 3.7*.

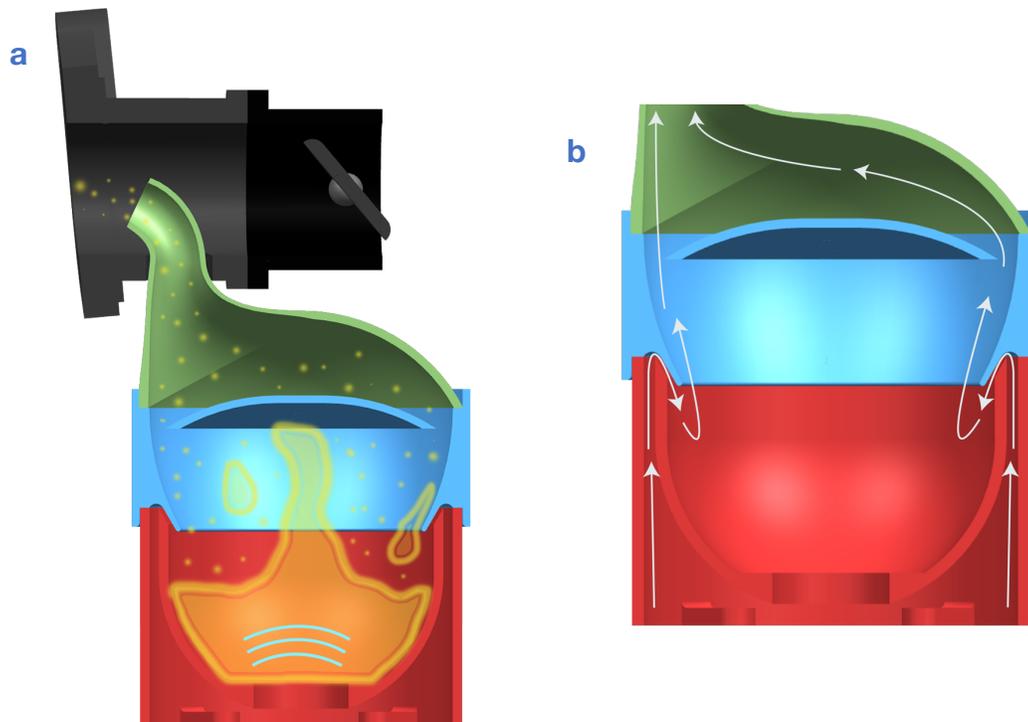


**Figura 3.7:** Partes del inyector de combustible: (a) colector de admisión (b) válvula mariposa (c) boquilla (d) trampa de separación (e) cámara de pulverización (f) ventilador opcional.

La cámara de pulverización es un depósito de combustible en cuyo fondo se encuentra el transductor. En dicha cámara se atomiza el combustible y aparece la fuente consecuencia del viento de cuarzo (*Figura 3.8a*). Por los bordes de la cámara ingresa un flujo de aire que arrastra la neblina hacia la trampa de separación (*Figura 3.8b*). El flujo de aire puede ser causado por la succión del motor o inducido por un ventilador.

La trampa de separación consiste en un plato invertido que detiene a la fuente y contiene las gotas que lanza. A su alrededor fluye la neblina hacia la boquilla, la cual acelera el flujo y lo inyecta a la entrada del colector de admisión (*Figura 3.8a*).

El dispositivo se ubica en el espacio comprendido debajo del colector de admisión. Debido a la forma del cárter y la distancia del colector a la culata, la altura del dispositivo debe ser menor a 130 mm y la distancia lateral de la boquilla a la culata debe ser inferior a 10 mm.



**Figura 3.8:** 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.

### Manufactura

El proceso de manufactura para fabricar el modelo estuvo condicionado por la forma geométrica a elaborar y por el material a utilizar.

Se escogió la manufactura aditiva como proceso de fabricación del prototipo gracias a su capacidad de producir piezas de geometrías complejas con un tiempo de manufactura relativamente rápido; así como por su disponibilidad y su bajo costo. Teniendo en cuenta que

Propiedad	Descripción
Densidad	1 120 $\frac{kg}{m^3}$
Resistencia a la tracción	57 MPa
Alargamiento de rotura	196 %
Resistencia a flexión	57 MPa
Resistencia a impacto	15 $\frac{kJ}{m^2}$
Temperatura de fusión	180 °C

**Tabla 3.8:** Propiedades mecánicas y térmicas del Nylon PA12 de ColorPlus.

el inyector estará en contacto directo con gasolina y que debe resistir temperaturas de 100 °C, se decidió utilizar nylon para elaborar el modelo.

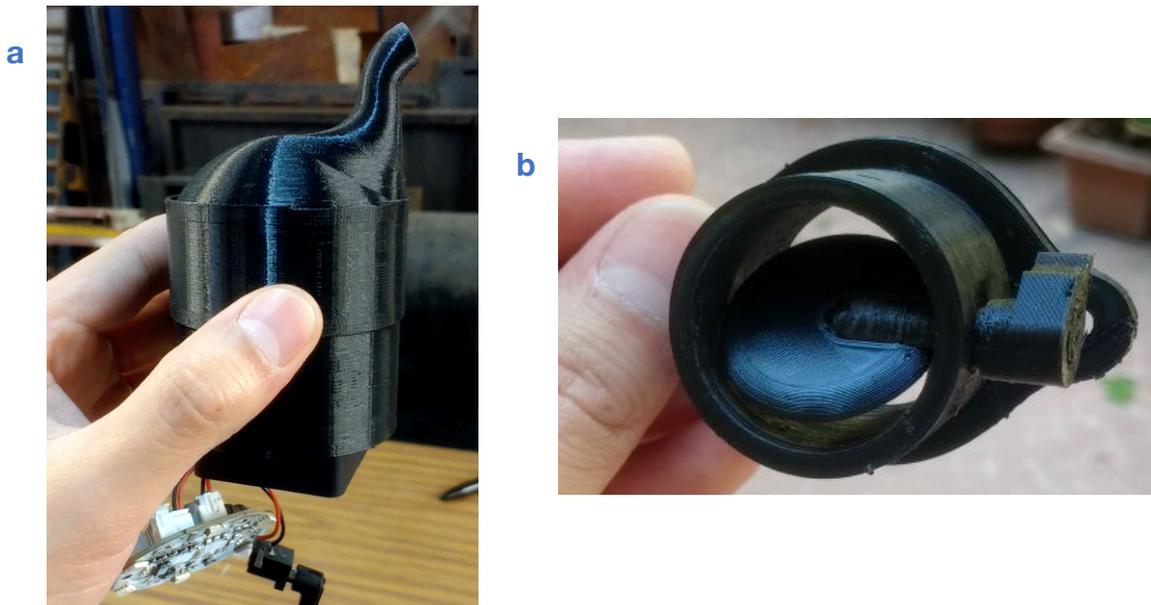
La poliamida 12 (*PA12*) se caracteriza por su alta estabilidad química, siendo recomendado para su uso con combustibles; posee propiedades mecánicas que le confieren resistencia a las vibraciones del motor, así como una temperatura de fusión elevada que lo vuelve apto para operar en contacto con el colector de admisión. Para la manufactura se utilizó filamento de nylon PA12 fabricado por *ColorPlus*, las propiedades técnicas del material se expresan en la *Tabla 3.8* (ColorPlus 2016).

El inyector se manufacturó en una impresora *Raised 3D N2* y la válvula mariposa en una impresora *Dobot Mooz*. Al ser un material higroscópico, el filamento de PA12 se deshidrató en un horno a 70 °C durante seis horas previas a su uso. Las impresiones se realizaron sobre una cama de adhesivo *PVA* (acetato de polivinilo) pues se observó que la base de la pieza tendía a

Parámetro	Descripción
Espesor de capa	0.25 mm
Temperatura de extrusor	25 °C
Temperatura de cama	90 °C
Velocidad de impresión	50 $\frac{mm}{s}$
Diámetro de la boquilla	0.4 mm
Velocidad del ventilador	0 %

**Tabla 3.9:** Parámetros utilizados para la manufactura aditiva del prototipo de Nylon PA12.

pandearse—lo que terminaba despegando la pieza de la cama de impresión. La *Tabla 3.9* enlista los parámetros utilizados durante la manufactura de los prototipos. El prototipo final del inyector se observa en la *Figura 3.9a*, mientras que la válvula mariposa se observa en la *Figura 3.9b*.



**Figura 3.9:** Prototipos fabricados por manufactura aditiva: (a) inyector ultrasónico (b) válvula mariposa.

### Desempeño preliminar

Se realizó una prueba para comprobar la funcionalidad del modelo (*Figura 3.10*). El motor encendió tanto en frío (30 °C superficial en la culata) como en caliente (100 °C superficial en la culata). Se observó que la combustión no fue constante a bajas velocidades por lo que el motor no logró operar más de 20 segundos aún en caliente. Se identificó que reduciendo la entrada de aire al atomizador—se bloquea parcialmente la base—y abriendo completamente la válvula mariposa, se obtiene una combustión constante a 7 000 *rpm*.



**Figura 3.10:** Prueba preliminar del funcionamiento del inyector ultrasónico conectado al colector de admisión junto con la válvula mariposa.

## Bibliografía

- Ballal, Dilip R., y Arthur H. Lefebvre. 1981. «Flame Propagation in Heterogeneous Mixtures of Fuel Droplets, Fuel Vapor and Air.» *Symposium (International) on Combustion* 18 (1): 321-328.
- Brain Bee S.p.A. s.f. *AGS-688 Gas Analyser 2 or 4 stroke petrol engines User manual*. Parma: Brain Bee S.p.A.
- Burtscher, Heinz, y Addy W. Majewski. 2016. «Exhaust Gas Sampling and Conditioning.» *DieselNet*.
- Castillo Hernández, Patricia. 2008. "Estudio de la propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos con etanol al 10% y 15% en volumen." Tesis de maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Code of Federal Regulations. 2018. *CVS concept of exhaust gas sampling system*. Vol. 40 CFR 90.420. Office of the Federal Register.
- ColorPlus. 2016. *Ficha técnica filamento Nylon Premium*. ColorPlus.
- Fonseca González, Natalia, Jesús Casanova Kindelán, y José María López Martínez. 2016. «Methodology for Instantaneous Average Exhaust Gas Mass Flow Rate Measurement.» *Flow Measurement and Instrumentation* 49: 52-62.
- Meacham, John Marcus. 2006. *A Micromachined Ultrasonic Droplet Generator Design, Fabrication, Visualization, and Modeling*. Tesis doctoral. Georgia Institute of Technology.
- MEMS and Nanotechnology Exchange. s.f. *MEMSnet*. Último acceso: 12 de Mayo de 2018. <https://www.memsnnet.org/material/leadzirconatetitanatepzt/>.
- Moto Honda da Amazônia Ltda. 2001. *Manual taller CGL125 1/2/3WH*. Honda South America.

## 4 Desempeño del inyector ultrasónico

La neblina de mayor calidad, que la atomización ultrasónica produce, se evidencia en cambios en las emisiones del motor con respecto de los sistemas de pulverización comerciales:

- Disminución de  $O_2$ .
- Aumento de  $CO_2$ .
- Disminución de  $CO$ .
- Disminución de  $HC$ .
- Aumento de  $NO_x$ .

emisiones de la  
pulverización  
ultrasónica

Una combustión más completa promueve una mayor temperatura de operación y un menor consumo de combustible. En conjunto se produce un aumento en la eficiencia del motor.

El desempeño del inyector ultrasónico se evaluó comparando el desempeño del motor equipado con el inyector contra el desempeño equipado con el carburador.

Para realizar una comparación significativa se comenzó por estudiar las normas nacionales de verificación de motores de motocicletas, tal información fungió como base para establecer la metodología a seguir durante la prueba. Posterior a la realización de las pruebas se presentan los resultados obtenidos y su discusión.

### 4.1 Experimento

Para comparar en condiciones estandarizadas el desempeño del motor equipado con el inyector ultrasónico contra su desempeño equipado con el carburador, se estableció un protocolo basado en la normatividad vigente de verificación de motocicletas.

#### Normativa en pruebas de motocicletas

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones (Aguillón Martínez 2015), en 1999 las motocicletas generaban el 0.23% de  $NO_x$ , el 0.68% de  $COVs$  y el 0.65% de  $CO$  con una flota vehicular de 250 mil unidades en el país. Dada la insignificante cantidad de motocicletas y

Volumen de desplazamiento nominal	CO	HC
cm <sup>3</sup>	% vol	ppm vol
50 – 249	3.5	450.0
250 – 749	4.0	500.0
750 en adelante	4.5	550.0

**Tabla 4.1:** Emisiones máximas permitidas para motocicletas de gasolina en México.

emisiones, no se dio importancia a una estricta regulación. No obstante, en los últimos años su incremento en el mercado ha sido considerable, mas no existen estudios recientes respecto a sus emisiones.

La *NOM 48* emitida por la *SEMARNAT* en 1993 (*SEMARNAT 1993*) establece los límites de las emisiones contaminantes provenientes del escape de motocicletas (*Tabla 4.1*); mientras que la *NOM 49* (*SEMARNAT 1993*) establece el procedimiento a seguir para medir sus emisiones. Para una motocicleta que consume gasolina se establece que:

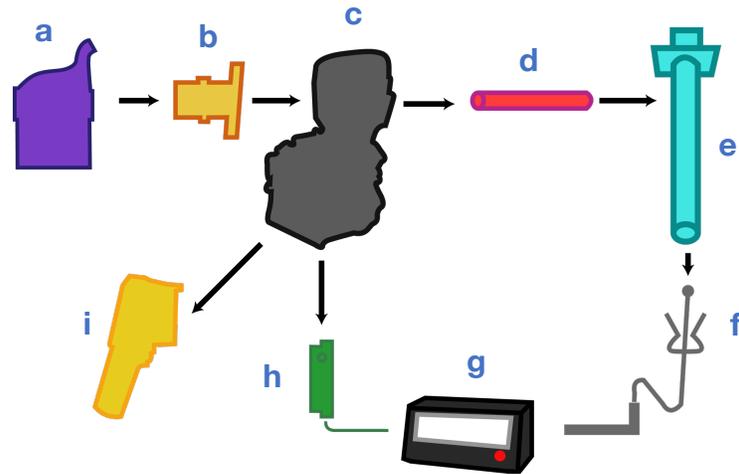
1. La motocicleta, debe trabajar a su temperatura nominal de operación, el selector debe estar en neutro y se debe desconectar la manguera del respiradero del cárter.
2. Si la emisión de humo es ostensible se suspende la prueba y la motocicleta no es aprobada.
3. Se realiza una prueba estática en marcha lenta sin carga: se conecta la sonda, se esperan de 10 a 20 segundos a que se estabilicen las medidas y se anotan los valores leídos.
4. Se realiza una prueba estática en cruce: se conecta el tacómetro y la motocicleta se acelera a  $2\ 500\ rpm \pm 250\ rpm$ , se esperan de 10 a 20 segundos a que se estabilicen las medidas y se anotan los valores leídos.

### Metodología de la prueba

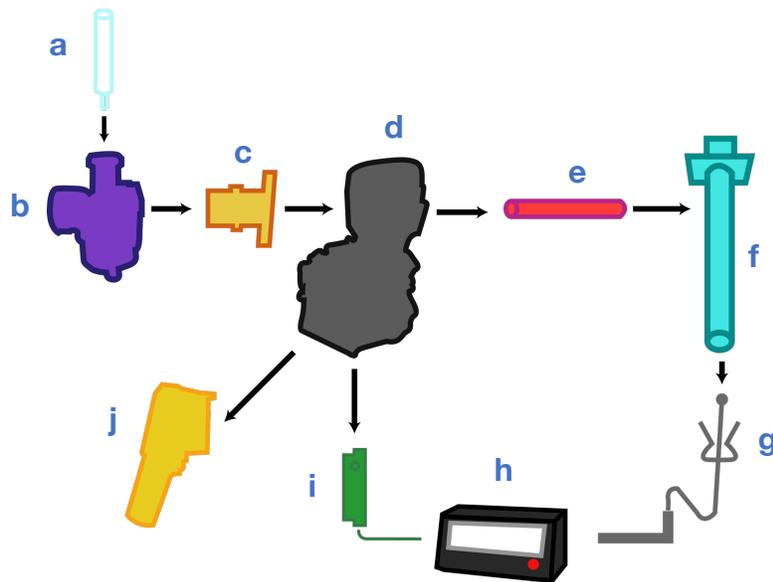
Se estableció un protocolo con el propósito de medir las emisiones contaminantes del motor tanto en la operación nominal como durante el arranque en frío con ambos pulverizadores. Se tomo como base el protocolo de la *NOM-049-SEMARNAT-1993*.

Las pruebas se realizaron en ralentí y la velocidad se ajustó a  $7\ 000\ rpm$ , pues fue la velocidad dónde el motor equipado con el inyector ultrasónico operó de manera más estable ( $\pm 1\ 000\ rpm$ ).

La *Figura 4.1* muestra el arreglo utilizado para registrar las medidas durante los ensayos que emplean al inyector. La *Figura 4.2* muestra el arreglo que permite registrar las medidas obtenidas con el carburador.



**Figura 4.1:** Esquema del arreglo del ensayo con el inyector ultrasónico: (a) inyector ultrasónico (b) colector de admisión (c) motor (d) escape (e) sistema de muestreo (f) sonda (g) analizador de gases (h) tacómetro (i) cámara termográfica.



**Figura 4.2:** Esquema del arreglo del ensayo con el carburador: (a) medidor de consumo de combustible (b) carburador (c) colector de admisión (d) motor (e) escape (f) sistema de muestreo (g) sonda (h) analizador de gases (i) tacómetro (j) cámara termográfica.

### Preparación del banco de pruebas

1. Abrir el respiradero del cárter a la atmósfera.
2. Calibrar el analizador de gases con aire atmosférico.
3. Conectar la sonda al puerto de muestreo (*Figura 4.1f*).
4. Conectar el tacómetro a la bujía (*Figura 4.1h*).

### Ensayo de arranque en frío

1. Conectar el inyector ultrasónico al colector de admisión (*Figura 4.1a*).
2. A partir de la temperatura ambiente encender el motor y llevarlo a 7 000 rpm.
3. Esperar 20 segundos para estabilizar las mediciones.
4. Durante 10 segundos registrar las emisiones de  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  y  $HC$  (*Figura 4.1g*).
5. Retirar el inyector ultrasónico para colocar el carburador (*Figura 4.2b*).
6. Repetir la prueba.

procedimiento  
de las pruebas

### Ensayo de operación en caliente

1. Encender el motor y dejarlo operar en ralentí.
2. Cuando la culata alcance 100 °C medir las emisiones durante 10 segundos (*Figura 4.2j*).
3. Esperar a que la culata alcance 120 °C para cambiar el carburador por el inyector ultrasónico. Esperar a que el motor baje su temperatura a 100 °C.
4. Encender el motor y llevarlo a 7 000 rpm.
5. Esperar 20 segundos para estabilizar las mediciones.
6. Durante 10 segundos registrar las emisiones de  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  y  $HC$ .

## 4.2 Resultados y discusión

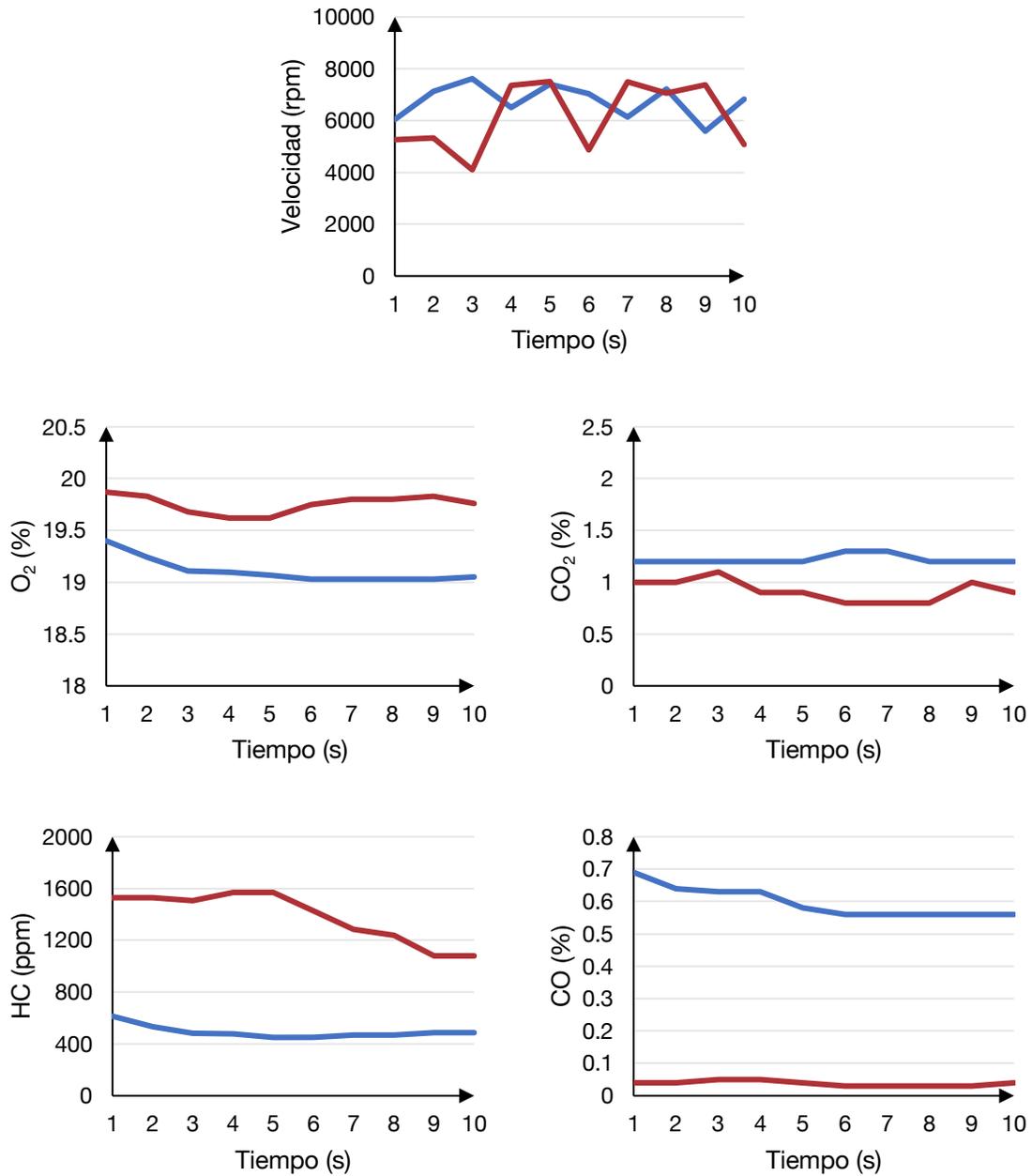
Los niveles de monóxido de carbono e hidrocarburos provenientes del motor equipado con el carburador superaron los establecidos por las regulaciones nacionales y los leídos por el analizador de gases. Por ello se desarrolló un sistema de muestreo. Las mediciones obtenidas sirven con fines únicamente comparativos, pues los valores no son absolutos y las emisiones reales son mayores. Consecuencia de la dilución no se midió la relación estequiométrica de la combustión ni las emisiones de  $NO_x$ .

La prueba del desempeño de los pulverizadores se realizó dos veces en dos días distintos. Las mediciones registradas se presentan en gráficas de *lectura vs. tiempo* que comparan los resultados del inyector (rojo) contra los del carburador (azul). Posteriormente se calcularon los valores medios y la desviación estándar de las lecturas. Los valores medios sirven como herramienta para comparar las medidas, mientras que la desviación permite tomar en cuenta la estabilidad de la combustión durante la operación.

Primera prueba

- Oxígeno del aire atmosférico: 21.7%.
- Temperatura ambiente al comenzar la prueba: 27 °C.

Ensayo de arranque en frío



**Figura 4.3:** Primera prueba de arranque en frío, las lecturas del carburador durante los 10 segundos se ilustran en azul y las del inyector ultrasónico en rojo.

Pulverizador	Media					Desviación				
	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC
	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>
Carburador	6 751	19.11	1.22	0.60	492	661	0.12	0.04	0.047	49
Inyector ultrasónico	6 144	19.76	0.92	0.04	1 382	1 329	0.09	0.10	0.008	196

**Tabla 4.2:** Valores medios y desviación estándar de las mediciones obtenidas durante el arranque en frío de la primera prueba del carburador y del inyector ultrasónico.

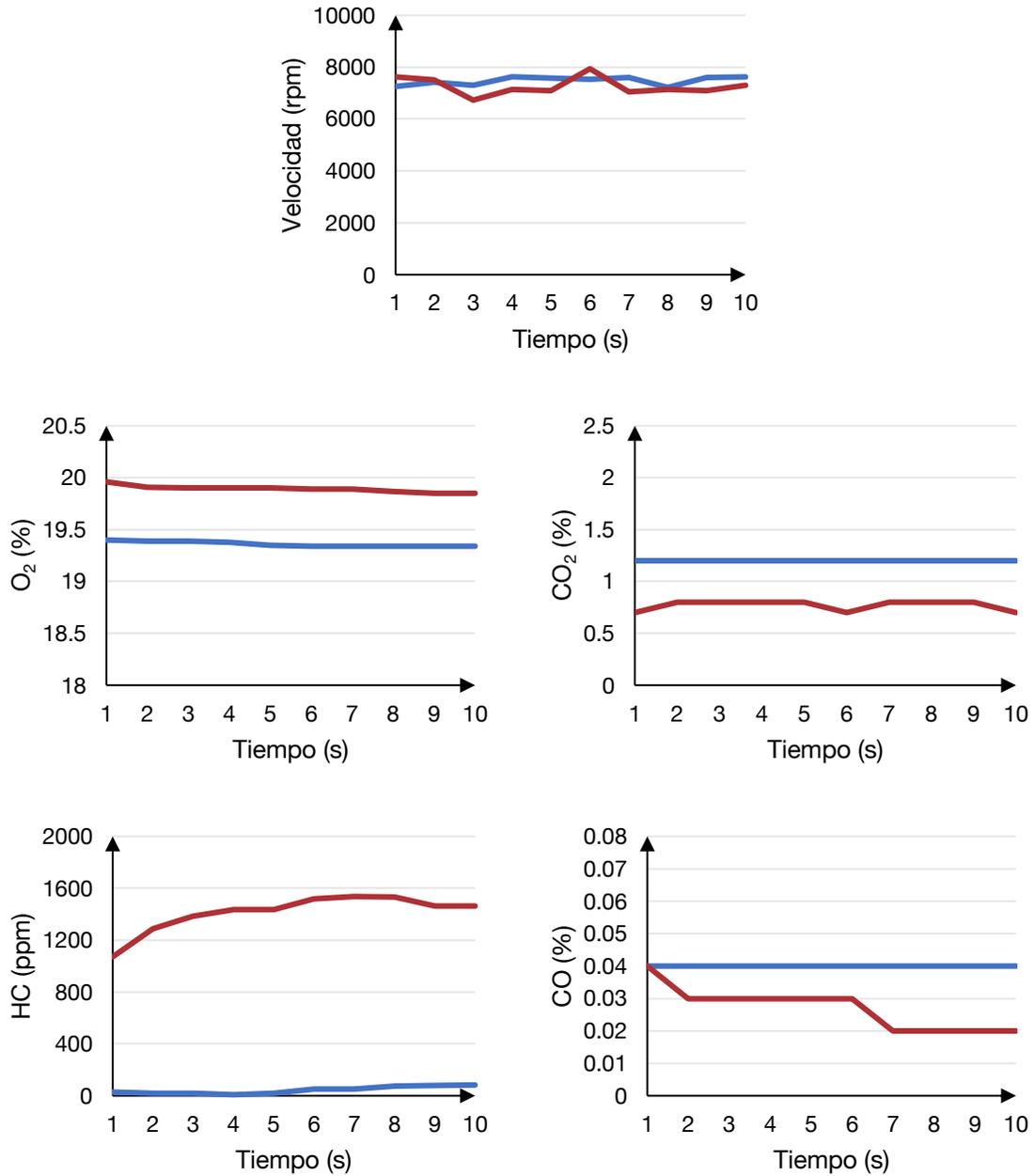
La *Figura 4.3* compara las lecturas realizadas durante el arranque en frío del carburador y del inyector ultrasónico. La *Tabla 4.2* resume los valores medios y la desviación estándar de las mediciones.

Respecto del carburador, el inyector ultrasónico produjo un incremento en las emisiones de hidrocarburos y oxígeno, pero una disminución en las emisiones de monóxido y bióxido de carbono. La velocidad media del motor fue menor a la del carburador, mas su desviación fue mayor.

La desviación de la velocidad del motor equipado con el inyector excedió las 1 000 *rpm* y duplicó la mostrada por el carburador.

Respecto del carburador, las emisiones de hidrocarburos se triplicaron (281 %) con el inyector ultrasónico. Tal incremento junto con el aumento de oxígeno y la disminución de bióxido de carbono indican una menor cantidad de combustible quemado.

Ensayo de operación en caliente



**Figura 4.4:** Primera prueba de operación en caliente, las lecturas del carburador durante los 10 segundos se ilustran en azul y las del inyector ultrasónico en rojo.

Pulverizador	Media					Desviación				
	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC
	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>
Carburador	7 474	19.36	1.20	0.04	44	162	0.03	0.00	0.000	28
Inyector ultrasónico	7 264	19.89	0.77	0.03	1 413	344	0.03	0.05	0.007	141

**Tabla 4.3:** Valores medios y desviación estándar de las mediciones obtenidas durante la operación en caliente de la primera prueba del carburador y del inyector ultrasónico.

La *Figura 4.4* compara las lecturas realizadas durante la operación en caliente del carburador y del inyector ultrasónico. La *Tabla 4.3* resume los valores medios y la desviación estándar de las mediciones.

Al igual que en el arranque en frío, con el inyector ultrasónico se observó un incremento en las emisiones de hidrocarburos y oxígeno, pero una disminución en las emisiones de monóxido y bióxido de carbono. La velocidad media del motor nuevamente fue menor a la del carburador con una mayor desviación.

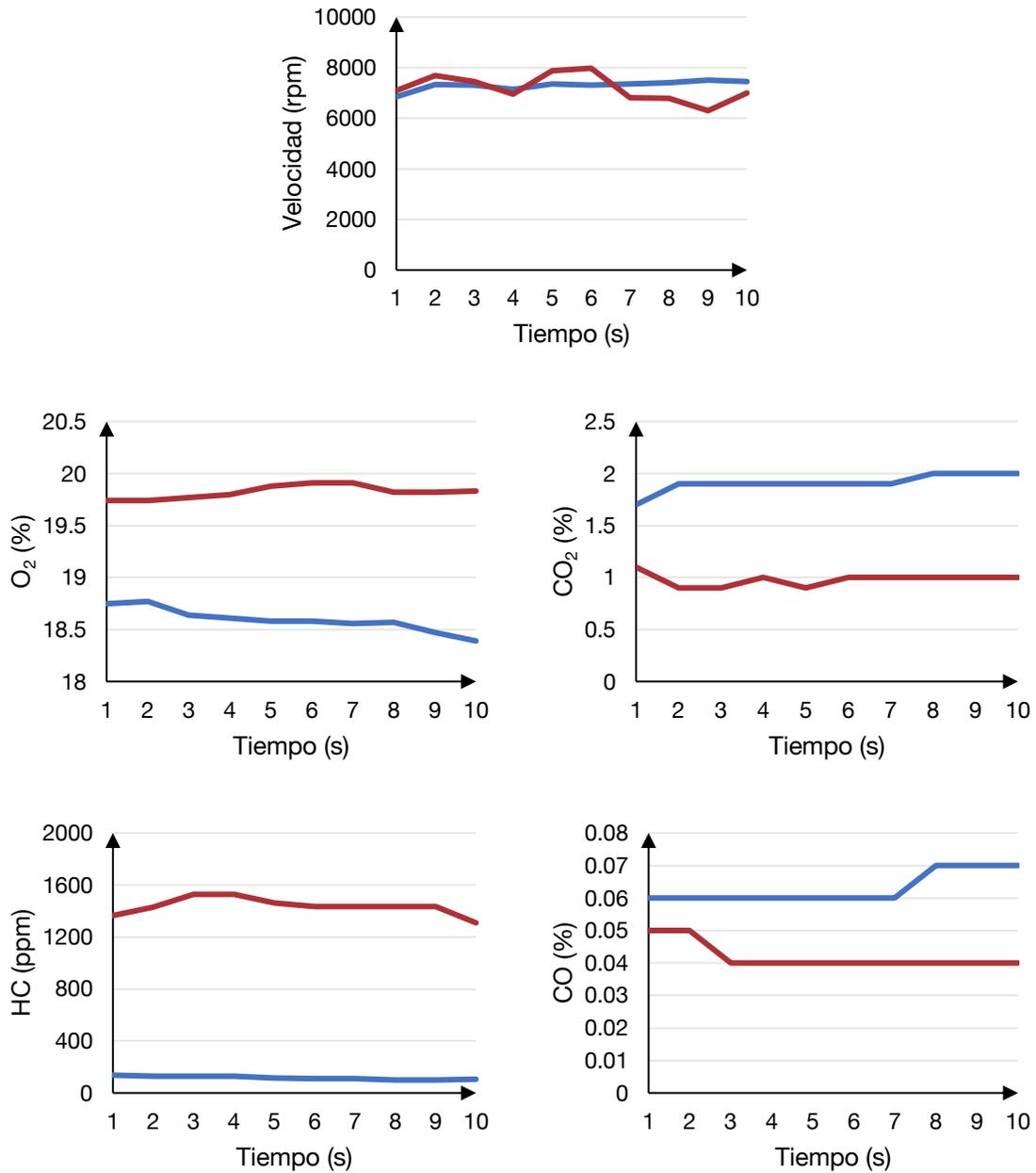
El motor presentó una menor velocidad al equiparse con el inyector ultrasónico, en este ensayo la diferencia fue de 210 *rpm*. La desviación de la velocidad disminuyó a 344 *rpm*, no obstante, continuó siendo el doble de la que presentó el carburador. En ambos casos, la disminución en la variación indica que el aumento en la temperatura del motor afecta la ignición de la mezcla, mostrando una combustión más estable para ambos sistemas a altas temperaturas.

Consecuencia de la mayor estabilidad, se observó una disminución en las emisiones de hidrocarburos del motor con el carburador respecto del comportamiento en frío, no obstante, las emisiones de hidrocarburos con el inyector aumentaron respecto a la prueba en frío.

Segunda prueba

- Oxígeno del aire atmosférico: 20.94%.
- Temperatura ambiente al comenzar la prueba: 30 °C.

Ensayo de arranque en frío



**Figura 4.5:** Segunda prueba de arranque en frío, las lecturas del carburador durante los 10 segundos se ilustran en azul y las del inyector ultrasónico en rojo.

Pulverizador	Media					Desviación				
	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC
	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>
Carburador	7 303	18.59	1.91	0.06	116	186	0.11	0.09	0.005	13
Inyector ultrasónico	7 198	19.82	0.98	0.04	1 436	541	0.06	0.06	0.004	65

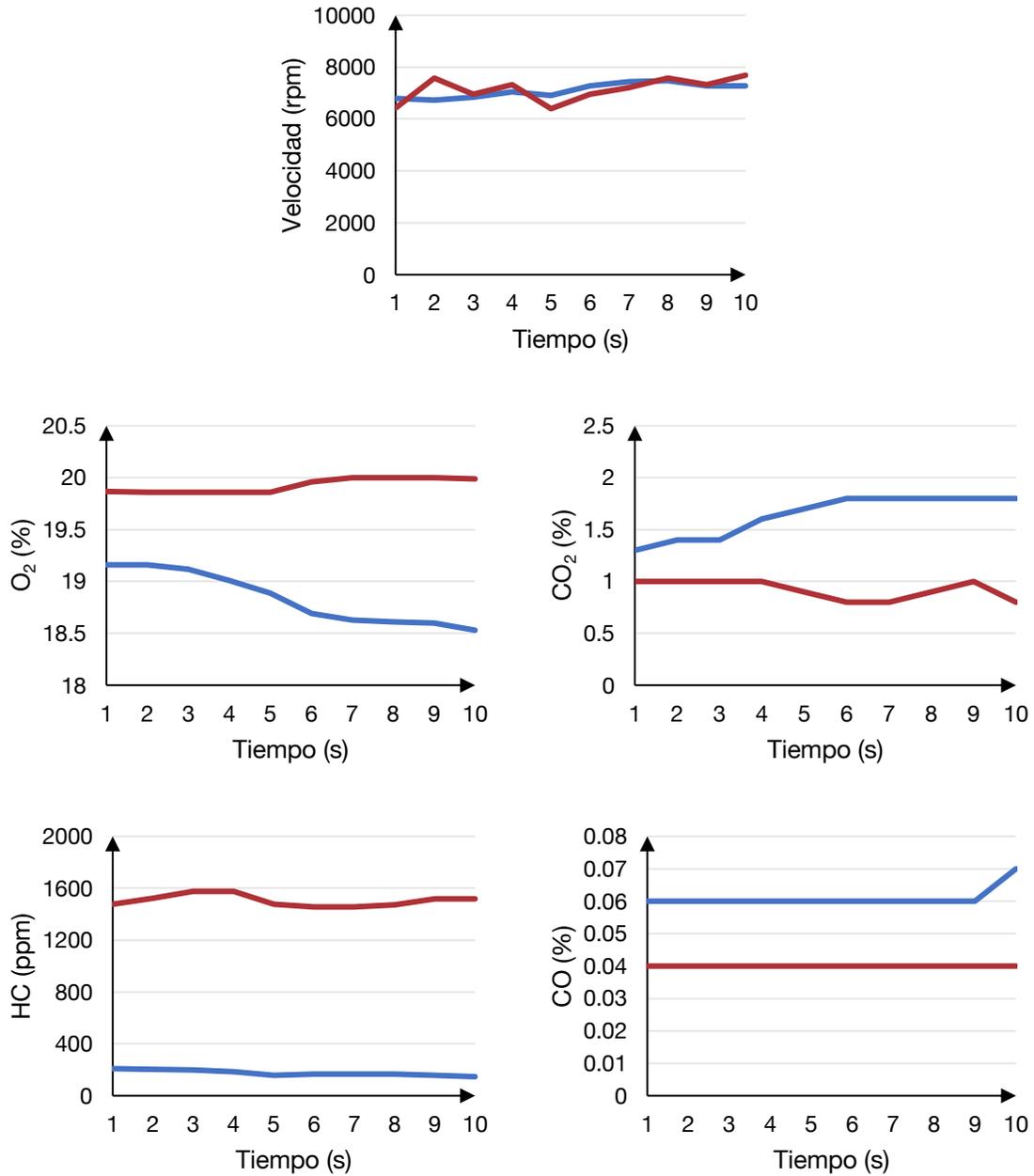
**Tabla 4.4:** Valores medios y desviación estándar de las mediciones obtenidas durante el arranque en frío de la segunda prueba del carburador y del inyector ultrasónico.

La *Figura 4.5* compara las lecturas realizadas durante el arranque en frío del carburador y del inyector ultrasónico. La *Tabla 4.4* resume los valores medios y la desviación estándar de las mediciones.

Al igual que en la prueba anterior, con el inyector ultrasónico se observó un incremento en las emisiones de hidrocarburos y oxígeno, pero una disminución en las emisiones de monóxido y bióxido de carbono. La velocidad media del motor nuevamente fue menor a la del carburador con una mayor desviación.

A diferencia de la primera prueba de arranque en frío, en este ensayo la velocidad del motor equipado con el inyector fue 105 *rpm* menor respecto del carburador. La desviación de la velocidad fue de casi el triple de la del carburador. Pese a la mayor inconsistencia en la combustión, se observó que la variación de las emisiones en esta prueba fue menor con el inyector que con el carburador.

Ensayo de operación en caliente



**Figura 4.6:** Segunda prueba de operación en caliente, las lecturas del carburador durante los 10 segundos se ilustran en azul y las del inyector ultrasónico en rojo.

Pulverizador	Media					Desviación				
	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC	RPM	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	HC
	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>	<i>rpm</i>	%	%	%	<i>ppm</i>
Carburador	7 110	18.84	1.64	0.06	176	279	0.26	0.20	0.003	22
Inyector ultrasónico	7 145	19.93	0.92	0.04	1 505	457	0.07	0.09	0.000	45

**Tabla 4.5:** Valores medios y desviación estándar de las mediciones obtenidas durante la operación en caliente de la segunda prueba del carburador y del inyector ultrasónico.

La *Figura 4.6* compara las lecturas realizadas durante la operación en caliente del carburador y del inyector ultrasónico. La *Tabla 4.5* resume los valores medios y la desviación estándar de las mediciones.

Correspondiendo con los ensayos realizados hasta ahora, con el inyector ultrasónico se observó un incremento en las emisiones de hidrocarburos y oxígeno, pero una disminución en las emisiones de monóxido y bióxido de carbono. En este ensayo la velocidad media del motor fue superior a la del carburador, mas continuó presentando una mayor desviación.

La velocidad media alcanzada con el inyector superó a la del carburador con una diferencia de 35 *rpm*, la desviación fue menor al doble de la producida por el carburador. Este ensayo fue el más estable de los cuatro realizados.

Respecto del ensayo en frío, el motor mostró un incremento en las emisiones de hidrocarburos para ambos pulverizadores. No obstante, se observó una disminución del monóxido y del bióxido de carbono. La desviación de la velocidad del motor equipado con el carburador aumentó, mas del inyector disminuyó.

### Discusión

En todas las pruebas se observó una constante tendencia en las emisiones medidas del motor equipado con el inyector: las emisiones de oxígeno de la muestra aumentaron, el bióxido de carbono disminuyó, el monóxido de carbono disminuyó y los hidrocarburos aumentaron.

resultado de las pruebas

Durante el arranque en frío el oxígeno medido en la mezcla aumentó 5 % en promedio mientras que el bióxido de carbono medido en la mezcla disminuyó 37 %. Las emisiones de monóxido de carbono disminuyeron 63 % en promedio. Las emisiones de hidrocarburos tuvieron una media de 1 409 *ppm*, 363 % más que las obtenidas por el carburador.

Durante los ensayos en caliente el oxígeno aumentó 4 %, mientras que el bióxido de carbono disminuyó 40 %. Las emisiones de monóxido de carbono disminuyeron 29 % y las emisiones de hidrocarburos tuvieron una media de 1 459 *ppm*, 1 226 % más que las obtenidas por el carburador.

La velocidad del motor equipado con el inyector mostró, en todas las pruebas, una mayor desviación respecto de la del carburador, 2.46 veces en promedio mayor durante el arranque y 1.88 veces mayor durante la operación en caliente. La combustión con el inyector fue menos consistente.

La elevada presencia de hidrocarburos no quemados y el aumento en el oxígeno de la muestra representan fallos en la ignición o *misfiring*. Tal fenómeno provocó que el motor expulsara, en algunos ciclos, la mezcla de aire-combustible sin quemar. Este comportamiento se observó en todas las pruebas.

análisis de los  
resultados

Tal inconsistencia en la combustión se corrobora con la mayor desviación en la velocidad del motor equipado con el inyector, pues la combustión en el motor no ocurrió de forma constante.

El motor equipado con el carburador disminuyó sus emisiones de hidrocarburos durante la operación en caliente; mientras que el motor equipado con el inyector, en frío o en caliente, emitió las mismas cantidades. Tal fenómeno igualmente corresponde con la presencia de fallos en la ignición, pues las emisiones de hidrocarburos del inyector no están ligadas a la temperatura de operación del motor durante la combustión.

Considerando que las emisiones de bióxido de carbono son proporcionales al combustible quemado por el motor, el inyector ultrasónico permitió al motor operar, en promedio, con 38 % menos combustible del que requirió para el carburador. A pesar de ello, el motor demandó una mayor cantidad de combustible que no quemó por los fallos en la ignición.

Dada la presencia del fenómeno, la disminución en el monóxido de carbono reportada se debe, principalmente, a una menor cantidad de combustible quemado. La reducción promedio del monóxido fue de 46 %, 8 % mayor a la reducción de bióxido de carbono.

Al poder generar una neblina más fina de combustible se tiene una combustión más completa, lo que reduce las emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos; así como disminuye el consumo de combustible y aumenta la temperatura de operación del motor. Dicho comportamiento fue obtenido por *Kumar* (Kumar Rout, et al. 2013) y por *Namiyama* (Namiyama, et al. 1989). Namiyama utilizó una punta amplificadora como sonotrodo a una frecuencia de 60 kHz, mientras que Kumar utilizó directamente al transductor sumergido en combustible como sonotrodo a una frecuencia de 1.65 MHz.

Un comportamiento similar al observado—se elevaron los hidrocarburos, pero bajaron las demás emisiones contaminantes y el  $CO_2$ —fue obtenido por *Balasubramanian* (Balasubramanian, et al. 2015). Balasubramanian igualmente utilizó al transductor sumergido en combustible como sonotrodo a una frecuencia de 2.4 MHz. Kumar y Balasubramanian destacan la importancia del control del ingreso de aire para evitar fallos en la ignición, causados por una relación aire-combustible excesivamente alta. Kumar controló tal fenómeno y reportó que el atomizador ultrasónico permitió el funcionamiento a relaciones aire-combustible altas, pero a partir de 21 ocurrieron fallos en la ignición y los hidrocarburos se dispararon. Balasubramanian realizó sus experimentos a relaciones aire-combustible de 20 a 27, lo cual lo llevó a observar grandes cantidades de hidrocarburos no quemados a la salida del motor.

Las emisiones medidas y el comportamiento no constante observado del motor equipado con el inyector ultrasónico demuestran que se trabajó con una relación aire-combustible ligera que

no permitió la combustión constante de la mezcla suministrada. Dado lo reportado por Balasubramanian y Kumar, la relación a la que operó el motor fue superior a 21.

### 4.3 Conclusiones

El trabajo realizado representa una prueba de concepto sobre la viabilidad de utilizar la atomización ultrasónica como método de pulverización de gasolina, y su posibilidad de aplicarla comercialmente como alternativa para cumplir con las crecientes exigencias ambientales que enfrenta la industria automotriz.

Se desarrolló un inyector de combustible que pulveriza gasolina mediante vibraciones ultrasónicas para obtener una neblina de combustible con un *SMD* menor a  $30 \mu\text{m}$ . Se demostró su capacidad de generar una neblina más fina y homogénea que la de un carburador al lograr operar un motor de motocicleta de cuatro tiempos con una relación aire-combustible superior a 21.

El desempeño del inyector ultrasónico se comparó con el del carburador original del motor midiendo las emisiones contaminantes de ambos. Para obtener lecturas representativas se implementó un sistema de muestreo de volumen constante. Los valores medidos mostraron una disminución en el monóxido, pero un aumento significativo en las emisiones de hidrocarburos. Tal aumento se debió a la mezcla pobre con que operó el inyector, la cual produjo fallas en la ignición y una combustión inconstante.

### Trabajo a futuro

Los resultados corroboraron la posibilidad de implementar un inyector ultrasónico y demostraron la capacidad de mejorar el desempeño del motor gracias a un menor *SMD* en la neblina atomizada.

Se requieren de modificaciones al inyector para obtener una combustión ininterrumpida del motor que permita controlar su velocidad; así como modificaciones a la instrumentación para poder caracterizar el desempeño del inyector y compararlo con sistemas comerciales.

Para realizar estas mejoras los puntos a cubrir son:

- Controlar la relación aire combustible de la mezcla.  
Controlar el gasto atomizado y el ingreso de aire al motor para obtener una combustión con una relación aire-combustible controlada.
- Medir el consumo de combustible del inyector.  
Implementar un sistema de suministro de combustible al inyector para que sea posible medir su consumo durante las pruebas.
- Medir la temperatura de operación y tiempo de calentamiento del motor.  
Modificar el banco de pruebas para que la temperatura pueda ser medida en el aceite del motor y poder caracterizar su temperatura de operación y tiempo de calentamiento.
- Medir los valores reales de las emisiones.

Modificar el sistema de muestreo para poder medir los valores reales de las emisiones, la relación estequiométrica de la mezcla y los  $NO_x$ .

- Caracterizar el *SMD* de la neblina atomizada.

Utilizar una cámara microscópica para analizar muestras de neblina y obtener el *SMD* inyectado al colector de admisión.

- Realizar ensayos a diferentes velocidades y cargas.

Acoplar un dinamómetro al motor y modificar el inyector para que permita controlar la velocidad y efectuar una caracterización con distintas cargas.

- Implementar el sistema en un vehículo comercial.

Poder montar el sistema en un vehículo comercial y probarlo con un ciclo de manejo para caracterizar el desempeño real del inyector ultrasónico.

El ultrasonido de potencia es una tecnología que recientemente ha comenzado a ser estudiada, por lo que los fenómenos que rodean la atomización ultrasónica abren oportunidades de investigación e innovación:

No existen ecuaciones para calcular el *SMD* producido por atomización ultrasónica. Se requiere desarrollar una ecuación que lo calcule para una neblina producida por un cristal piezoeléctrico inmerso en el fluido a atomizar.

La gasolina es una mezcla y es sabido que la atomización ultrasónica de mezclas modifica las concentraciones de soluto y solvente en la neblina. Una oportunidad de investigación es estudiar los efectos de dicho fenómeno en la combustión.

### Potencial del desarrollo comercial de la tecnología

De implementar esta tecnología comercialmente las ventajas que directamente observará el usuario final es una mejor respuesta del motor y un menor consumo de combustible. Para la industria, la principal ventaja será la simplificación en los sistemas que componen al vehículo al prescindir de una bomba de alta presión para realizar la inyección.

Debido a que las emisiones del inyector ultrasónico son distintas a las de un carburador o inyector comercial—y a que parte de sus ventajas se encuentra en la operación con exceso de aire—será necesario rediseñar un convertidor catalítico de tres vías adecuado al sistema ultrasónico.

La tecnología puede aplicarse en motores diésel. La principal ventaja será la eliminación de las emisiones de partículas sólidas (carbono negro) e, incluso, la posibilidad de operar motores de gasolina con diésel eficientemente (Tsurutani, et al. 1991).

Es posible utilizar la inyección ultrasónica para reducir las emisiones contaminantes de un motor de combustión interna e, incluso, las emisiones de  $CO_2$ —como se observó en las pruebas—gracias al menor consumo de combustible que permite la tecnología.

## Bibliografía

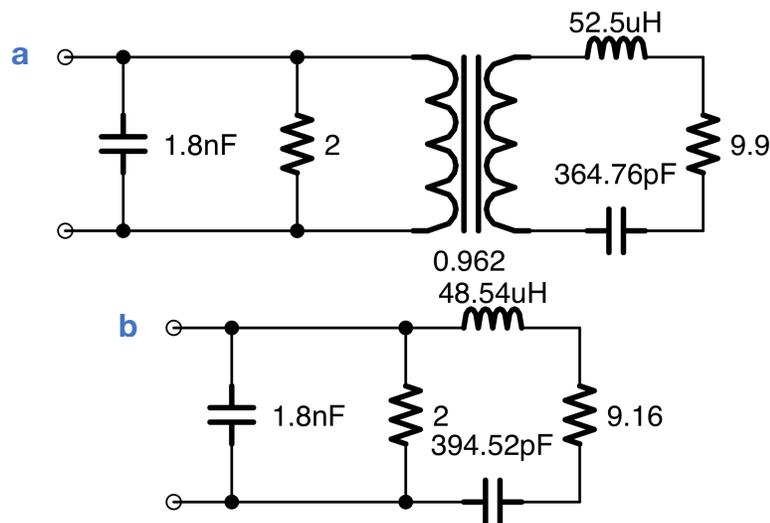
- Aguillón Martínez, Javier Eduardo. 2015. *Manual de buenas prácticas ambientales y de manejo de las motocicletas en México*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Balasubramanian, N., Ganesh Keerthi, y T. N. C. Anand. 2015. «Fuelling a Two-Wheeler Engine by Ultrasonic Atomization.» *Small Engine Technologies Conference & Exhibition*. Osaka. 2015-32-0757.
- Kumar Rout, Saswat, M. Ajay, y T. N. C. Anand. 2013. «Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer.» *23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion*. 10.13140/2.1.3421.0881.
- Namiyama, Kazuyoshi, Hiromi Nakamura, Kakuro Kokubo, y Daijiro Hosogai. 1989. «Development of Ultrasonic Atomizer and Its Application to S.I. Engines.» *SAE Technical Paper 890430*.
- SEMARNAT. 1993. *Norma oficial mexicana, que establece las características del equipo y el procedimiento de medición, para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulación que usan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible*. SEMARNAT.
- . 1993. *Norma oficial mexicana, que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y humo, provenientes del escape de las motocicletas en circulación que utilizan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible*. SEMARNAT.
- Tsurutani, Kazushi, Hiroyuki Takezi, y Daijiro Hosogai. 1991. «Development of a Diesel Fuel S.I. Engine Using an Ultrasonic Atomizer.» *SAE Technical Paper 910667*.

## Anexo Generador electrónico

El primer análisis de un generador ultrasónico es el modelado del sistema. Dicho modelo permite desarrollar el generador electrónico que lo impulsará, pues representa el sonotrodo como una impedancia.

### A.1 Modelo eléctrico del sistema

Con la finalidad de poder controlar el gasto pulverizado mediante la variación de la potencia suministrada a los transductores, así como de poder operar transductores que resuenen a frecuencias de 100 kHz a 10 MHz, se desarrolló un generador electrónico de frecuencia y potencia variable.



**Figura A.1:** (a) Modelo eléctrico del sistema ultrasónico (b) modelo simplificado.

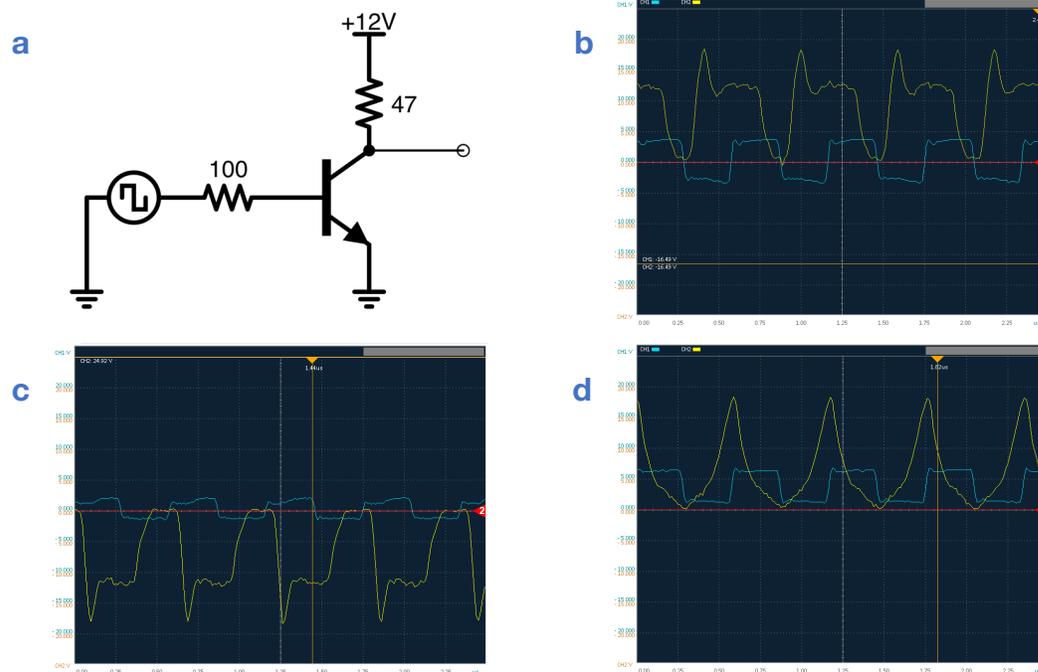
Se tomó al cristal de 1.7 MHz como modelo base para la impedancia de carga del generador. La *Figura A.1* muestra la representación eléctrica del sistema atomizador que se utilizó durante el proceso de diseño. Los valores se calcularon a partir de la *Tabla 3.6* y la *Tabla 3.7* utilizando las *Ecuaciones 2.22* a *2.25*.

El generador electrónico consiste en un amplificador de alta frecuencia que recibe una señal de entrada de un generador de funciones, y a su salida emite una señal de alto voltaje y potencia capaz de hacer resonar al transductor piezoeléctrico.

Dada la alta frecuencia y potencia, no es posible utilizar amplificadores de audio comerciales como generadores electrónicos. Los amplificadores de radio frecuencia son de precios elevados y sus anchos de banda son de frecuencias mayores a los de los transductores piezoeléctricos. Por las razones anteriores se decidió diseñar un amplificador.

### A.2 Selección del transistor

Por su capacidad de respuesta a la frecuencia se propusieron como amplificadores los transistores *BJT BU406* (tipo *NPN*) y *TIP127* (tipo *PNP*), así como el transistor *MOSFET IRFZ34* (canal *N*). Su desempeño se evaluó conectando los transistores en una configuración de amplificación tipo *A* energizada a 12 V (*Figura A.2a*) con una carga de 47  $\Omega$ . La amplitud y polarización de la señal del generador de funciones se acondicionó a cada transistor. La



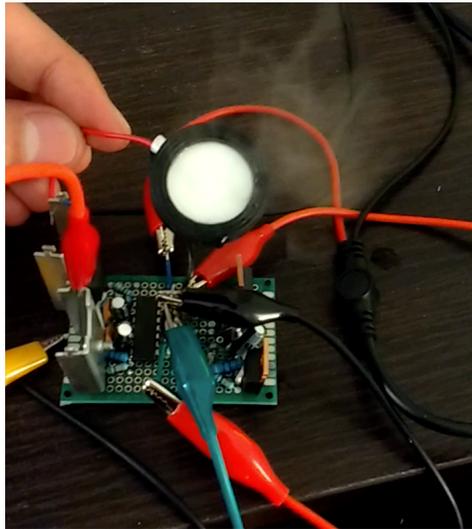
**Figura A.2:** Desempeño de los transistores: (a) circuito amplificador clase A (b) BU406 (c) TIP127 (d) IRFZ34, la onda azul es la señal de entrada mientras que la onda amarilla es la señal de salida.

*Figura A.2* muestra los resultados, la onda azul es la señal de entrada mientras la onda amarilla el la amplificada.

Se diseñó un amplificador clase D, siguiendo una topología tipo puente H. Tal decisión se justificó en los satisfactorios resultados reportados en investigaciones (Jakiela, et al. 2012), y en la cualidad de este amplificador de poder duplicar el voltaje a su salida respecto al voltaje con que se alimenta (Agbossou, et al. 2000).

### A.3 Desarrollo del amplificador

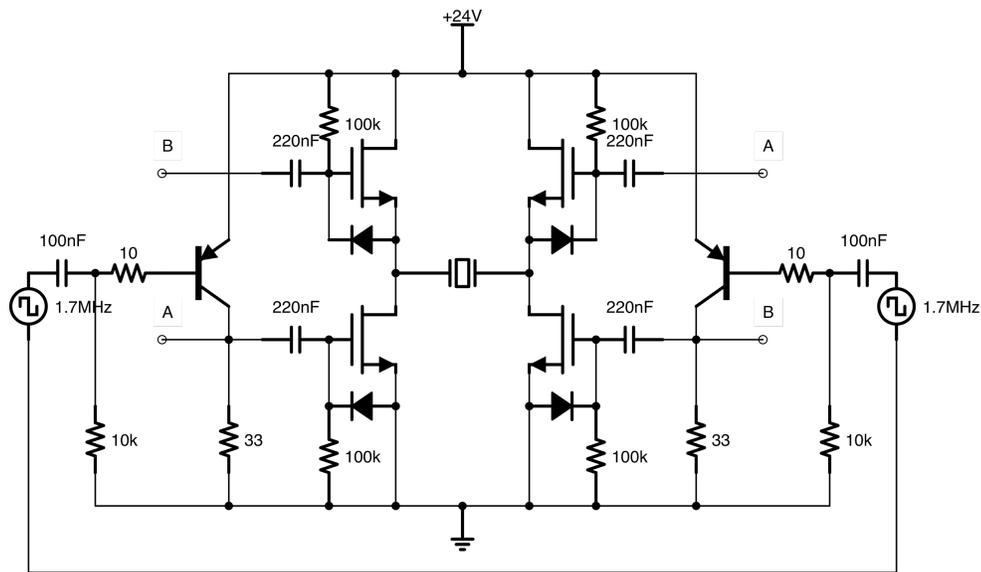
Se armó un amplificador que utilizó transistores IRFZ44 con el driver de MOSFET *IR2113* (GreatScott! 2017). Se probó una mitad del circuito y se obtuvieron resultados favorables (*Figura A.3*). Si bien los transistores IRFZ44 operan a frecuencias mayores a los 2 MHz, el driver no trabaja a esa frecuencia, por lo que fue necesario rediseñar el circuito para que prescindiera de los drivers.



**Figura A.3:** Medio amplificador clase D operando el cristal de 1.7 MHz.

Para el rediseño se utilizaron transistores *IRFZ34*, pues su diferencia respecto a los IRFZ44 es soportar un menor voltaje máximo (60 V), el cual cumple con los requerimientos—se necesita un voltaje pico a pico menor a 70 V, con el amplificador tipo puente H se obtienen  $120 V_{pp}$  a la salida—y son de menor costo.

Se utilizaron transistores BJT *TIP127* en una configuración de amplificador clase A como preamplificadores de la señal para saturar los IRFZ34. Los *TIP127* reciben la señal de un generador de funciones a través de un capacitor. El objetivo de la etapa de pre amplificación es aislar eléctricamente la señal del generador de funciones y que tal señal no requiera de un voltaje mayor a 5 V. De esta forma, de no contar con un generador de funciones, la señal puede ser



**Figura A.4:** Diagrama del amplificador.

producida por medios digitales. El diagrama del diseño se observa en la *Figura A.4*, las señales de entrada se encuentran desfasadas  $180^\circ$  entre si.

### A.4 Resultados y conclusiones

Durante la operación el circuito pudo amplificar la señal y hacer que el transistor vibrara ligeramente, más no logró suministrar la potencia adecuada para hacerlo atomizar. El amplificador demandó más corriente de los 5 A que la fuente con que se alimentó podía suministrar.

Dado el inadecuado ancho de banda del primer amplificador y la ineficiencia del segundo, ninguno de los dos se utilizó en el inyector y se optó por ocupar los circuitos comerciales propios de los cristales.

El desarrollo de los generadores demuestra la posibilidad de implementar un control eficiente en la atomización de los combustibles.

## Bibliografía

- Agbossou, Kodjo, Jean-Luc Dion, Sylvain Carignan, Meftah Abdelkrim, y Ahmed Cheriti. 2000. «Class D Amplifier for a Power Piezoelectric Load.» *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 47 (4): 1036 - 1041.
- GreatScott! 2017. *Ultrasonic Mist Maker // DIY or Buy*. Último acceso: 10 de Febrero de 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=aKhPj7uFD0Y>.
- Jakiela, Slawomir, Jan Zaslona, y Jacek A. Michalski . 2012. «Square Wave Driver for Piezoceramic Actuators.» *Actuators* 1 (1): 12-20.

