

PREDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DIRECTA PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE DOS TIEMPOS

RESUMEN

El presente artículo describe el procedimiento desarrollado para alcanzar una solución al problema del corto circuito de la mezcla fresca hacia el puerto de escape en los motores de combustión interna de dos tiempos. Se diseñó un sistema de inyección directa para este tipo de motores, el cual permite regular la composición de la mezcla aire-combustible y el momento del ingreso del combustible al cilindro. El diseño alcanzado elimina el problema y de esta forma posibilita una reducción en las emisiones contaminantes. Los parámetros iniciales como presiones, temperaturas y caudales en el motor, fueron determinados por medio de una simulación computacional empleando un modelo de flujo inestable unidimensional denominado GPB.

PALABRAS CLAVES: Motor de combustión interna de dos tiempos, inyector, simulación de motores de combustión, modelo termodinámico unidimensional.

ABSTRACT

This article describes the procedure to reach a solution for the problem of the mixture short circuit to the exhaust port in two stroke internal combustion engines. A design of a direct injection system for two stroke internal combustion engines was made, which allow controlling the air/fuel mixture composition and the time of the fuel injection to the combustion chamber. The design eliminates the mixture short circuit, and this makes a reduction in the polluting emissions (CO and hydrocarbons) possible. The initial parameters like pressure, temperature and volume inside the engine's combustion chamber were determined by means of computational simulation, using a one dimensional unstable flow model named GPB.

KEYWORDS: Two stroke engines, injector, engine simulation, one dimensional thermodynamical model.

1. INTRODUCCIÓN

El balance de beneficios y desventajas para los motores de combustión interna de dos tiempos (MCIDT), perfila este tipo de máquinas para un buen número de aplicaciones. No obstante, este balance también presenta una considerable cantidad de inconvenientes de funcionamiento, los cuales son susceptibles de ser corregidos. Se han desarrollado diversas investigaciones en busca del mejoramiento de las condiciones de operación de los MCIDT, relacionadas con el consumo específico de combustible y la reducción de emisiones tóxicas al medio ambiente [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Estos trabajos han permitido el desarrollo de motores con diseños innovadores [7, 10, 12, 14, 15] aunque con tecnologías de alto costo, las cuales los hace poco atractivos, al menos desde el punto de vista económico, en países en vía de desarrollo. Prueba de esto es la disminución de los MCIDT en el mercado nacional, los cuales han sido reemplazados por motores de cuatro tiempos¹, cuyo desempeño no alcanza el de los motores MCIDT de última tecnología [2]. Así como la masificación de estos nuevos diseños de MCIDT resulta

JUAN MIGUEL MANTILLA G.

Ingeniero Mecánico, M.Sc
Profesor Asistente
Universidad Nacional de Colombia
jmmantillag@unal.edu.co

CARLOS H. GALEANO U.

Ingeniero Mecánico, M.Sc
Profesor Asistente
Universidad Nacional de Colombia
chgaleanou@unal.edu.co

JORGE LUIS OCHOA A.

Ingeniero Mecánico
Gestor de Proyectos
Metalteco Ltda.
jlochoa@hotmail.com

un reto, un problema adicional aparece cuando se piensa en el gran número de motores que actualmente trabajan y que no serán reemplazados por modelos tecnológicamente más avanzados en un futuro próximo. De esta manera la necesidad de diseñar e implementar dispositivos adicionales a los MCIDT que logren mejorar algunas de las características de funcionamiento de los mismos, se convierte en un problema de marcado interés, especialmente si se evalúan las ratas de emisión de gases contaminantes asociadas a estas fuentes [2, 3], y además teniendo en cuenta que buena parte de los motores de combustión interna, de amplio uso a nivel nacional en motocicletas y en pequeña maquinaria, no cumplen las normas ambientales impuestas por los diferentes organismos de control [2, 3, 5].

En este artículo se presentan los resultados de un trabajo para el diseño de un dispositivo que permita el mejoramiento en la dosificación de la mezcla aire-combustible que es inyectada al cilindro del motor, trayendo como consecuencia la reducción² de los índices

¹ Fuente: DANE-Crecimiento de los automóviles y las motocicletas en Colombia 1985-2005.

Fecha de Recepción: 09 Febrero de 2007

Fecha de Aceptación: 22 Marzo de 2007

² Se busca eliminar la componente de hidrocarburos sin quemar (HC) proveniente del corto circuito entre la admisión y el escape en los MCIDT, mientras simultáneamente se reduce la componente de HC

de escape de mezcla sin quemar a la atmósfera, lo cual se constituye en uno de los principales contaminantes por hidrocarburos al medio [2, 3].

El logro de este objetivo permite un ahorro en el consumo de combustible, un mejoramiento en el proceso de combustión y una disminución en las emisiones de monóxido de carbono (CO), esto último gracias a la implementación de un control que maneje la cantidad de gasolina inyectada, junto con el instante en el que debe saltar la chispa en la bujía. En la primera parte del artículo se describe el problema estudiado y se precisa la solución propuesta para el mismo, con base en algunas referencias de estudios previos. En la segunda parte se presenta un modelo numérico empleado para la simulación del MCIDT, requerido para la determinación de parámetros de entrada para el diseño, tales como la presión, temperatura y cantidad de mezcla en la cámara de combustión, para diferentes regímenes de funcionamiento del motor. Posteriormente se presenta el diseño final del inyector y se explica el funcionamiento del mismo. En la parte final del artículo se plantean las conclusiones asociadas al trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los MCIDT se caracterizan por la simplicidad constructiva, y la baja relación peso/potencia, dada la ausencia de válvulas para el manejo de los puertos de admisión y descarga. Sin embargo, este aspecto genera un importante problema de funcionamiento, el paso de mezcla fresca hacia el puerto de escape del motor durante la carrera de expansión (compresión del cárter), tal como se ilustra en la Figura 1.

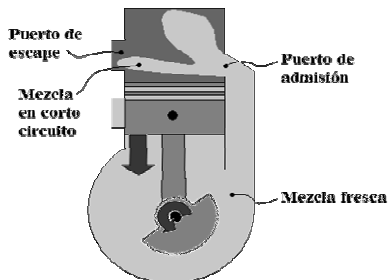


Figura 1. Corto circuito de mezcla fresca hacia el puerto de escape del motor.

Este fenómeno se conoce normalmente como corto circuito [2, 3, 5, 7], lo cual aporta una componente importante de hidrocarburos sin quemar en los gases de salida en el motor, aumentando por ende el consumo del mismo y las emisiones contaminantes asociadas a una mala combustión, producida por una baja pureza³ de la mezcla atrapada dentro del cilindro, antes de la carrera de compresión (expansión del cárter).

producto de la combustión incompleta asociada al funcionamiento del motor.

³ Se entiende como pureza la relación entre la masa de aire fresco y la masa de productos de combustión dentro del cilindro.

El objetivo del trabajo desarrollado consiste en el diseño de un dispositivo adaptable a los modelos de MCIDT que normalmente se encuentran en el contexto nacional, el cual permita la eliminación del efecto de corto circuito de la mezcla fresca, mejorando de esta forma el consumo del mismo y el nivel de emisiones del motor.

Se han desarrollado diversas soluciones buscando eliminar el efecto del corto circuito de mezcla, las cuales se pueden agrupar en tres familias: la primera se basa en el desvío de la mezcla durante su entrada al cilindro, la segunda busca controlar los instantes de entrada o salida de los gases de admisión o escape, respectivamente. Entre tanto el tercer grupo de soluciones se basa en la inyección de combustible en puntos y momentos definidos. Dentro del primer grupo de soluciones se encuentra la utilización de pistones con deflectores [2], los cuales, tal como se muestra en la Figura 2, cambian la trayectoria de la mezcla fresca durante su entrada al cilindro. En este grupo también se encuentra la técnica de disposición cruzada de los puertos de admisión (motores de barrido cruzado [2]), cuyo efecto se ilustra en la Figura 3.

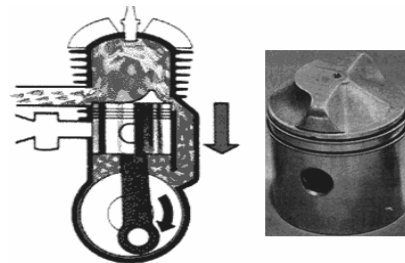


Figura 2. Efecto de un pistón con deflector en el camino de la mezcla fresca durante su entrada al cilindro.

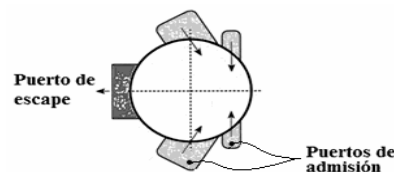


Figura 3. Distribución cruzada de los puertos de admisión.

Otras alternativas consisten en administrar precisamente los tiempos de admisión o escape mediante válvulas, de forma análoga a un motor de cuatro tiempos, como se ilustra en la Figura 4. Por último se encuentran las soluciones que implementan sistemas de inyección directa, los cuales administran la forma como es alimentado el combustible en el cilindro [7, 9, 10, 12, 13, 14]. Un ejemplo de este tipo de MCIDT se muestra en la Figura 5. Resulta claro que buena parte de estas soluciones alcanzadas involucran la forma constructiva y funcional, por lo cual no son soluciones viables cuando se piensa en alternativas para el mejoramiento en consumo y emisiones de los MCIDT ya diseñados, construidos y en funcionamiento. Por esta razón, para el desarrollo del trabajo se decide implementar un sistema de inyección directa de gasolina a la cámara de

combustión. La inyección directa de combustible permite un control preciso de la relación aire-combustible alrededor del valor estequiométrico, reduciendo las cantidades emitidas de monóxido de carbono (al no existir exceso de combustible), e incrementando los procesos de pulverización y evaporación de la gasolina, mejorando la combustión y elevando la eficiencia térmica del motor.

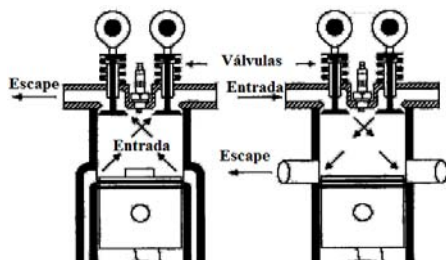


Figura 4. Motores de dos tiempos implementados con válvulas de admisión y escape.

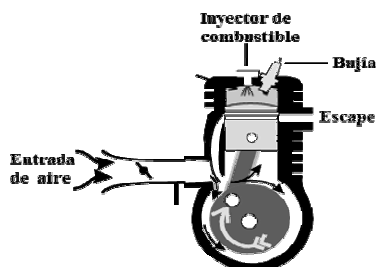


Figura 5. Motor de dos tiempos con inyección directa de combustible.

Resulta importante aclarar que en todo caso la inyección de combustible requiere estar acompañada de cierta cantidad de aire, la cual permita la pulverización de la gasolina y por tanto una fácil combustión. Sin embargo las cantidades de aire adicional que pasan por el tipo de inyector de combustible seleccionado son muy pequeñas comparadas con la masa de aire fresco que queda dentro del cilindro después del proceso de barrido, de manera que esta alternativa no debe confundirse con un proceso de supercarga del motor.

Como primer paso en el proceso de diseño del inyector de combustible se opta por un modelo de MCIDT. Se seleccionó un motor representativo y de gran uso en el medio, las características principales de dicho motor son listadas en la Tabla 1.

3. MODELO NUMÉRICO DESARROLLADO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Como segundo paso para el diseño, se requiere el conocimiento de ciertos parámetros de funcionamiento del motor seleccionado, tales como: (i) Presión en el cilindro. (ii) Presión en el cárter. (iii) Temperatura en el cilindro. (iv) Temperatura en el cárter. (v) Masa en el cilindro (mezcla fresca y productos de la combustión). (vi) Caudal en el puerto de entrada. (vii) Caudal en los ductos de transferencia. (viii) Caudal después del

carburador. (ix) Caudal en el puerto de escape. Estos parámetros pueden ser calculados por vía experimental siguiendo la norma SAE J1349 (equivalente a la norma colombiana NTC1930), lo cual requiere de una implementación de sensores y transductores con especificaciones de funcionamiento particulares. En lugar del modelo experimental, se prefiere la implementación de un modelo numérico para la simulación del motor, que permita la determinación de los parámetros de funcionamiento del mismo para los diferentes regímenes de servicio.

Motor	
Tipo de Motor	2-Tiempos, enfriado por aire, válvula de lámina en el cárter.
Desplazamiento	1 Cilindro inclinado hacia adelante. 79 cm ³
HP / rpm	6.7 hp / 6000 rpm
Torque / rpm	0.82 kgm / 4000 rpm
Consumo de Combustible	1.2 litros / 100 km (82 km/litro) (A velocidad constante de 50 km/h)
Diámetro y carrera	47 x 45.6 mm
Relación de compresión real	6.8 : 1 (confinamiento)
Lubricación	Lubricación separada (Sistema Yamaha Autolube)
Sistema de Ignición	C.D.I (Ignición por descarga capacitiva)
Sistema de Combustible	
Tipo	Carburador sencillo Mikunim15SC
Tipo de gasolina	Corriente
Capacidad del tanque de gasolina	5.3 litros (incluidos 0.4 litros de reserva)
Sistema Eléctrico	
Modelo y tipo de generador	Yamaha F4F8, volante con magneto
Especificaciones de la batería	6N4-2 ^a -9
Servicio amperio - hora	6V, 4Ah
Especificaciones del arranque	Arranque con pedal
Detalle de sistema de control del voltaje	Semiconductor – corto circuito

Tabla 1. Especificaciones del motor empleado.

En este punto resulta importante resaltar que en la simulación de motores de combustión interna se deben tener en cuenta los diferentes procesos que se dan durante un ciclo de operación. En primera instancia se aclara que el funcionamiento de los MCIDT es altamente dependiente del movimiento de las ondas de presión durante los procesos de barrido, inducción y escape. De modo que un modelo adecuado para los MCIDT debe tener en cuenta los efectos producidos por la transmisión, propagación y reflexión de dichas ondas de presión sobre los tres procesos anteriormente mencionados. Además deben tenerse en cuenta los modelos termodinámicos y químicos para los procesos de compresión, combustión y expansión.

Dentro de la amplia variedad de modelos desarrollados para la simulación de motores, se escoge el GPB (por su creador Gordon P. Blair), [1, 2, 4] desarrollado en la Queen's University of Belfast, y probado por grandes empresas de desarrollo tecnológico en el campo de motores de combustión interna, como General Motors, Ford y Volvo. El GPB es un modelo termodinámico unidimensional y de base fenomenológica, el cual incorpora los siguientes elementos en la simulación del motor: (i) la geometría física del motor, de modo que todas las áreas de los puertos, volúmenes del cilindro y cárter, puedan ser conocidos para cualquier ángulo del cigüeñal. (ii) un modelo del flujo de gas inestable, para los ductos de entrada, transferencia, y escape del motor. (iii) un modelo del flujo de gas inestable, para los extremos de los ductos de entrada, transferencia y escape del motor, donde se localizan elementos como los cilindros, el cárter, los bloques con válvulas de lámina y de descarga a la atmósfera, así como ramificaciones, expansiones y contracciones dentro de la tubería. (iv) un modelo del comportamiento de la termodinámica y de la dinámica del gas dentro del cilindro y en el cárter del motor, mientras los puertos están abiertos (en el período de ciclo abierto). (v) un modelo del proceso de barrido, que permita predecir la proporción de carga fresca retenida. (vi) un modelo del comportamiento termodinámico dentro del cilindro del motor mientras los puertos están cerrados (en el período de ciclo cerrado).

El código para la simulación se desarrollo en Matlab® y permite determinar todas las variaciones de presión, temperatura y volumen dentro del motor, así como calcular las características de desempeño resultantes: potencia, torque y flujo de aire. A continuación se presentan algunas curvas construidas a partir de los datos arrojados por la simulación. Estas variaciones de presión, volumen y rata de flujo de gas, junto con su efecto neto sobre la potencia de salida y el consumo de combustible, suministran a los diseñadores de elementos indispensables para el cálculo y selección de los elementos del inyector.

Se puede apreciar en las gráficas de la Figura 6 y de la Figura 7, los datos provistos por la simulación, que corresponden a la potencia y torque del motor, los cuales presentan diferencias menores al 2% con respecto a los datos indicados por el fabricante en la carta de especificaciones técnicas del motor (ver Tabla 1). Estas diferencias permiten validar la implementación del modelo realizado por los autores. Es importante aclarar que los algoritmos de simulación deben ser calculados para una velocidad de giro específica del motor, lo que junto con el costo computacional del proceso, restringe el número de puntos para el trazado de las curvas de las Figuras 6 y 7.

4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO Y DISEÑO FINAL

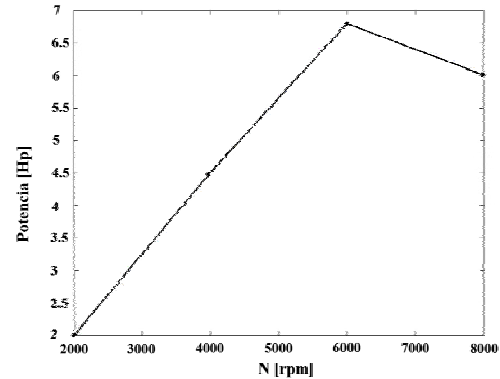


Figura 6. Curva de potencia obtenida con simulación en cuatro puntos.

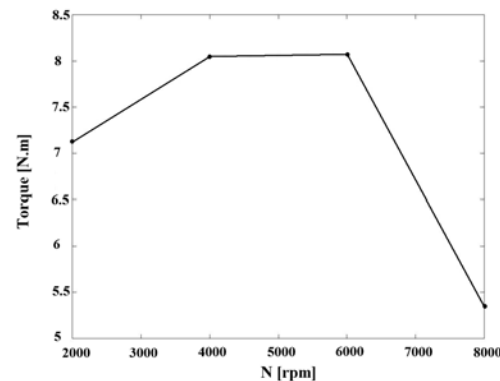


Figura 7. Curva de torque obtenida con simulación en cuatro puntos.

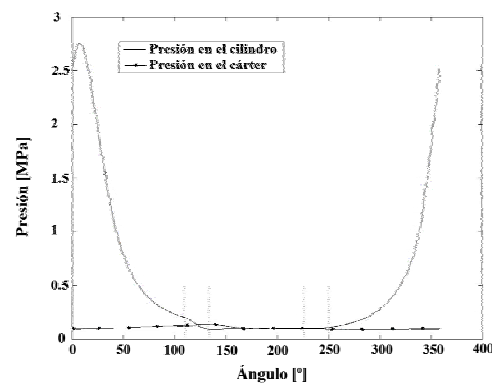


Figura 8. Presiones internas en el cilindro y cárter del motor a 2000 rpm.

El inyector diseñado se compone de los siguientes elementos: (i) un compresor eléctrico. (ii) un filtro de aire auxiliar. (iii) un cuerpo central (inyector de aire e inyector de gasolina). (iv) una válvula de paso de gasolina. (v) sensores de caudal, temperatura de aire y posición del cigüeñal. (vi) un final de carrera para el pistón diferencial (ubicado en el cuerpo central). (vii) un contador de pulsos en el terminal negativo de la bobina de encendido. (viii) una unidad electrónica de control (ECU). (Ver Figura 9)

A su vez el cuerpo central del inyector consta de las siguientes partes: (i) un solenoide para la válvula de aire. (ii) un solenoide para la válvula de combustible. (iii) un solenoide para la recarga del pistón de combustible. (iv) un pistón diferencial. (v) resortes para el retroceso de los solenoides de aire y combustible.

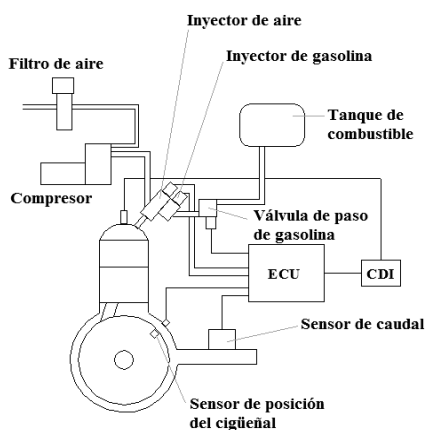


Figura 9. Esquema del montaje del dispositivo en el motor.

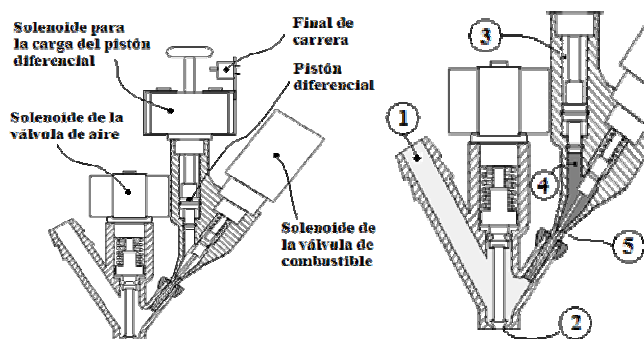


Figura 10. Vista en corte del cuerpo central del inyector.

El funcionamiento del dispositivo se describe a continuación: inicialmente la válvula de aire que comunica la descarga del compresor (punto 1 en la Figura 10) con la cámara de combustión (punto 2 en la Figura 10), se encuentra cerrada; de esta forma el compresor mantiene su máxima presión (600 kPa). Otra línea de aire comprimido, que se deriva hacia el pistón diferencial (punto 3 de la Figura 10), empuja el combustible almacenado en la recámara del extremo de menor área del pistón (punto 4 de la Figura 10), amplificando 1.73 veces la presión de alimentación. Es de observar que esta presión de alimentación cae rápidamente una vez abierta la válvula de aire, por lo cual es importante conocer la curva de comportamiento de esta si se desea saber la presión disponible para la inyección de combustible. Esta variación en la presión del aire durante la apertura de la válvula fue simulada empleando un modelo GPB, considerando las condiciones internas del cilindro (derivadas previamente de la simulación del motor); obteniéndose las curvas de la Figura 11, para diferentes velocidades de giro del motor.

La inyección de gasolina se inicia con una señal enviada por la ECU al solenoide de la válvula de combustible,

permitiendo el paso de la misma hacia la cámara de combustión (punto 5 de la Figura 10), con lo cual el líquido es atomizado al encontrarse con la corriente de aire que ya circula hacia el cilindro. El proceso de atomización y homogenización de la mezcla continua durante la entrada de esta última a la cámara de combustión. Gracias a la turbulencia adicional generada, a la premezcla del aire con el combustible y a la inducción de esta misma en un instante posterior al cierre de los puertos, se puede obtener un mejor proceso de combustión que a su vez permite obtener menores emisiones contaminantes a la atmósfera.

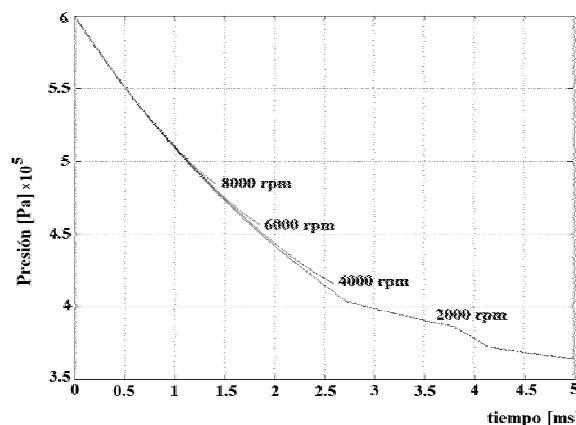


Figura 11. Variación de la presión al interior del inyector después de abierta la válvula de aire.

Los tiempos de inyección varían de acuerdo con la velocidad del motor, dato obtenido a partir del contador de impulsos en la terminal negativa de la batería. La inyección de aire se inicia primero y luego se realiza la inyección de combustible sobre este flujo de aire. De esta forma, aunque el instante en el que comienza la inyección de aire es igual para todo el régimen de funcionamiento del motor (34.7° dpmi⁴), el instante en el que comienza la inyección de gasolina es controlado por la ECU de acuerdo al régimen del motor. Para funcionamiento sin carga (ralentí), la relación de aire combustible se aumenta considerablemente hasta un valor entre 60-80, y el instante de la inyección de combustible se atrasa coincidiendo casi con el instante del salto de la chispa. Lográndose de esta forma una estratificación de la carga, es decir, garantizando una mínima pero suficiente cantidad de gasolina en la cámara de combustión, debidamente distribuida en zonas cercanas al electrodo de la bujía, lo cual se traduce en una disminución en el consumo de combustible. De manera similar, para el caso de arranque en frío (condición que se determina con la medida de dada por el sensor de temperatura de aire), la carga es igualmente estratificada, pero la relación aire-combustible se mantiene entre 20 y 30. Para condiciones normales de operación la relación de aire combustible se mantiene igual a la estequiométrica y es controlada a partir de la medida del sensor de flujo de aire.

⁴ dpmi: después del punto muerto inferior

5. CONCLUSIONES

Este trabajo es un esfuerzo para el desarrollo de un dispositivo inyector novedoso, de bajo costo y eficiente, que mejore el desempeño de los motores de combustión interna de dos tiempos. Este mejoramiento se basa en: (i) la reducción del consumo de combustible, gracias al uso de carga estratificada a bajas velocidades del motor y al uso de una relación aire-combustible muy cercana a la estequiométrica para los otros casos. (ii) la reducción de las emisiones contaminantes de hidrocarburos no quemados, dado que la entrada de combustible se realiza directamente en la cámara de combustión cuando los puertos se han cerrado. (iii) la reducción en los índices de emisión de CO, debido a que la relación aire-combustible en todo el rango de funcionamiento del motor asegura que la mayoría del combustible se queme, dado que sólo se suministra el combustible necesario para el aire presente en la cámara de combustión.

El carácter innovador de este dispositivo se centra en los requerimientos de diseño impuestos, lo cuales fueron planteados para países en donde los MCIDT convencionales siguen presentando un gran auge dada su sencillez y economía, (características que no se pierden con el nuevo dispositivo), en los cuales la producción de estos sistemas no tiene signos de ser discontinuada a corto plazo y en los que la evolución de los MCIDT es frenada por los altos costos de implementación de nuevas tecnologías.

El empleo de un modelo unidimensional de flujo inestable de ondas de presión permite la simulación de un motor y la determinación precisa de todos sus parámetros de funcionamiento. Estos datos posibilitan el diseño posterior del dispositivo de inyección.

Como actividades en curso de este proyecto se encuentran, el estudio del mejoramiento de las técnicas de manufactura asociadas al cuerpo del inyector, las pruebas de desempeño del motor modificado con la inyección directa, en cuanto a consumo y emisiones.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] S.J. Kirkpatrick, G.P. Blair, R. Fleck, R.K. McMullan, "Experimental Evaluation of 1-D Computer Codes for the Simulation of Unsteady Gas Flow Through Engines- A First Phase", SAE Paper No. 941685, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1994.

[2] G.P. Blair, Design and Simulation of Two Stroke Engines, SAE R-161, Warrendale, PA, ISBN 1-56091-685-0, 1996.

[3] J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-100499-8, 1989.

[4] G.P. Blair, D. McBurney, P. McDonald, P. McKernan, R. Fleck, Some Fundamental Aspects of the Discharge Coefficients of Cylinder Porting And

Ducting Restrictions, SAE Paper No. 980764, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1998.

[5] C. Stan, J.L. Lefebvre, M. Lebrun, Development, Modelling and Engine Adaptation of a Gasoline Direct Injection System for Scooter Engines, SAE Paper 1999-01-3313, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1999.

[6] M. Pontoppidan, M. Nuti, D. Caponi, A. De Maio, L. Andreassi, Experimental and Numerical Approach to Productionizing a GDI-2 Stroke Spark Ignited Small Displacement Engine Design, SAE Paper 1999-01-3290, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1999.

[7] S. Leighton, S. Ahern, M. Southern, M. Cebis, The Orbital Combustion Process for Future Small Two-Stroke Engines, Presentado al Instituto Frances del Petróleo, París, Francia, 1993.

[8] R. Houston, R. Newmann, M. Moore, M. Archer, Development of a Durable Emissions Control System for an Automotive Two-Stroke Engine, Presentado en el congreso internacional y exposición de la SAE, Michigan, USA, 1996.

[9] H. Stocker, W. Schürz, R. Houston, D. Worth, Specific Engine Control Functions for an Air-Assisted Gasoline DI System, Orbital Engine Company and Siemens AG, Australia, 1998.

[10] D. Shawcross, C. Pumphrey, D. Arnall, A Five-Million Kilometre, 100-Vehicle Fleet Trial, of an Air-Assisted Direct Fuel Injected, Automotive Two-Stroke Engine, SAE Paper 00P-59, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1999.

[11] G. Catchcart, C. Zavier, Fundamental Characteristics of an Air-Assisted Direct Injection Combustion System as Applied to 4 Stroke Automotive Gasoline Engines, SAE Paper 00P-245, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, USA, 1999.

[12] N. Coplin, Simplification of Air Assisted Direct Injection via Performance Benchmarking, SAE Paper 1999-01-3310, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, USA, 1999.

[13] G. Bell, C. Finucci, Exhaust Emissions Sensitivities with Direct Injection on a 50cc Scooter, SAE Paper 970365, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, USA, 1997.

[14] S. Leighton, M. Cebis, S. Ahern, M. Southern, Lou Horner, The OCP Small Engine Fuel Injection System for Future Two-Stroke Marine Engines, SAE Paper 941687, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, USA, 1994.

[15] D. Worth, N. Coplin, M. McNiff, M. Stannard, Design Considerations for the Application of Air-Assisted Direct In-Cylinder Injection Systems, SAE Paper 972074, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, USA, 1997.