

# Estratificación de un motor de inyección directa a gasolina al variar la altitud

Julio, Leguísamo-Milla<sup>1\*</sup>; Santiago, Celi-Ortega<sup>2</sup>;  
Edilberto, Llanes-Cedeño<sup>3</sup>; Juan, Rocha-Hoyos<sup>4</sup>

## Resumen

En este artículo se desarrolla una metodología experimental con el objeto de determinar la estratificación de la mezcla aire-combustible que se produce en un motor de inyección directa a gasolina, que puede ser homogénea, homogénea pobre y estratificada. Al variar el nivel de altura geográfica en el vehículo de 0 a 4000 metros de altura con respecto al nivel del mar. Determinando cuáles son los parámetros que inciden directamente en la estratificación de la mezcla aire combustible conocidos como modo de trabajo, mediante el estudio del sistema GDI y la aplicación de una prueba experimental dinámica en base a normas y protocolos desarrolladas por la SAE. Utilizando un escáner automotriz de última generación y un GPS, aplicados a un vehículo MAZDA CX-5. Los resultados de las pruebas realizadas revelan cuando se producen los modos de trabajo homogéneo pobre, homogéneo y estratificado en las pruebas. Además, indican cómo influye la variación de la altura en la selección de estos modos de trabajo cada 500 metros de altura y muestran cómo se puede identificar cada modo de trabajo con el escáner mediante la línea de datos, y entender los cambios en el funcionamiento debido a la variación del modo de trabajo.

**Palabras clave:** inyección directa gasolina, Mazda cx-5, modo homogéneo, variación de altura

## Stratification of a gasoline direct injection to vary altitude

### Abstract

In this article an experimental methodology is developed in order to determine the stratification of the air-fuel mixture produced in a gasoline direct injection engine, which can be homogeneous, lean homogeneous and stratified. By varying the level of geographical height in the vehicle from 0 to 4000 meters above sea level. Determining which are the parameters that directly affect the stratification of the fuel air mixture known as working mode, through the study of the GDI system and the application of a dynamic experimental test based on standards and protocols developed by the SAE. Using an automotive scanner of last generation and a GPS, applied to a MAZDA CX-5 vehicle. The results of the tests carried out reveal when poor homogeneous, homogeneous and stratified working modes are produced in the tests. In addition, they show how height variation influences the selection of these working modes every 500 metres in height and show how each working mode can be identified with the scanner via the data line, and understand the changes in operation due to variation in working mode.

**Keywords:** direct injection of gasoline, Mazda cx-5, homogeneous mode, height variation

**Recibido:** 18 de julio de 2018  
**Aceptado:** 04 de febrero de 2019

<sup>1</sup> Magíster en Sistemas Automotrices; Docente tiempo completo; Universidad Internacional SEK, Quito- Ecuador; julio.leguisamo@uisek.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0001-5383-1746>

<sup>2</sup> Magíster en Administración y Marketing; Universidad Internacional SEK, Quito- Ecuador; santiago.celi@uisek.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-8302-3413>

<sup>3</sup> PhD en Ciencia; Universidad Internacional SEK, Quito- Ecuador; antonio.llanes@uisek.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0001-6739-7661>

<sup>4</sup> Magíster en Sistemas Automotrices; Docente tiempo completo; Universidad Internacional SEK, Quito- Ecuador; carlos.rocha@uisek.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-0660-7199>

\*Autor para correspondencia: julio.leguisamo@uisek.edu.ec

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se emiten leyes para regular la cantidad de contaminantes emitidos por los motores de combustión a la atmósfera, razón por la cual los fabricantes han desarrollado nuevas tecnologías como vehículos híbridos y eléctricos, pero debido a que este tipo de tecnología todavía no satisface completamente las expectativas de los consumidores, se han visto en la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías usando combustibles fósiles, como la inyección directa a gasolina, con el objetivo de cumplir estas normas. Esta tecnología se comercializa en todo el mundo e introduce nuevos conceptos y elementos, además de rediseñar el funcionamiento de algunos elementos ya utilizados en los sistemas tradicionales de inyección indirecta a gasolina los cuales se manifiestan con respecto al ingreso de aire, el suministro de combustible, el salto de chispa y la emisión de gases contaminantes (Rodríguez and Cheng, 2016); (C. Huang et al., 2016). Pero la variación del funcionamiento de los distintos elementos depende del modo de trabajo seleccionado por el módulo de control electrónico, por esto la importancia de conocer la selección del modo de trabajo ya que no hay ningún indicador o parámetro de identificación en la línea de datos que indique el modo de trabajo que se está ejecutando.

Entre los muchos fenómenos complejos que se producen durante la preparación de la mezcla de combustible, como el movimiento en el cilindro de flujo, diseño del pistón, la ubicación del inyector, la presión de inyección, características de pulverización, la interacción de combustible con la pared, salto de chispa, etc. Cuando el motor funciona debido a las exigencias del conductor que varían en función de la carga y velocidad la Ecu del vehículo adopta diferentes modos de trabajo que son los que establecen las características que guían el plan de trabajo del motor, que en un instante determinado y poder ser estratificada, homogéneo y homogéneo pobre; que se basan en la proporción de la mezcla aire combustible que se encuentra en el cilindro (Seong, 2014). En el modo estratificado ingresa al motor una mezcla pobre cuando el vehículo se desplaza en condiciones de carga parcial. La mezcla pobre se concentra alrededor de la bujía y acumula una sola capa de aire para

eliminar la estrangulación y conseguir el ahorro de combustible. El modo homogéneo prepara una mezcla homogénea en todo el cilindro cuando se necesita la mayor potencia del motor es decir a los regímenes más elevados. La inyección varía de manera automática y el combustible es inyectado en la fase de compresión y en la de admisión. El modo de operación homogéneo-pobre se produce durante la transición entre el modo estratificado y el homogéneo. En este modo se realiza la inyección de combustible en las mismas condiciones que el modo homogéneo pero el ingreso de aire mantiene las mismas condiciones del modo estratificado (Lopez, 2012).

El análisis de la formación de la mezcla y el desarrollo de la llama en un motor de inyección directa (Costa et al., 2014); (Saw and Mallikarjuna, 2017) se estudia a través de simulaciones numéricas y de imagen digital ultravioleta donde se indica que la inyección de combustible temprana dio como resultado la formación de mezcla homogénea que dio lugar a una combustión estable. Además, se determina que la mezcla estratificada aumentó variaciones ciclo por ciclo. Donde se investigó el efecto de la inyección y el encendido de tiempo en el desarrollo de propagación de la llama y se determinó que este tipo de mezcla se ejecuta en un rango de trabajo con respecto al tiempo de inyección y al tiempo de encendido. Las pruebas se llevaron a cabo en un motor mono cilíndrico de inyección directa a gasolina de cuatro válvulas y el crecimiento de la llama se detectó por una cámara de vídeo UV Nikon instalada en el interior del pistón, la cual se utilizó para observar la combustión en el cilindro.

Se desarrolla una investigación donde se reproducen los tres modos de trabajo para determinar los diferentes tamaños del material particulado que se producen en las emisiones de un motor inyección directa. Donde se varía la presión y el caudal máximo de acuerdo a cada modo de trabajo en 12 MPa, 5,5 MPa y 3,0 MPa de presión respectivamente y se obtiene una descripción completa del comportamiento dinámico del combustible que sale en cada modo de trabajo. Las presiones de inyección más altas promueven una altura de penetración y de pulverización que incide en el ángulo del cono de pulverización, penetración

de la punta y la morfología de pulverización para todas las tres presiones de inyección, antes y después del choque lo que nos indica una vez más la importancia de conocer cuando se producen los modos de trabajo en un vehículo con motor inyección directa a gasolina (Montanaro, 2013).

Un motor de inyección directa gasolina opera típicamente en diferentes modos de mezcla, a cargas más altas una mezcla homogénea mientras que una mezcla estratificada en condiciones de baja carga. Es importante determinar un método para conocer cuando se producen estos modos de trabajo, debido a que en cada modo las condiciones de la dinámica del proceso de mezcla son diferentes con respecto a velocidad, flujos, cantidad y tiempo de los principales elementos que producen la combustión. Los cuales inciden directamente en

los parámetros de economía de combustible, la densidad de potencia, par-velocidad y emisiones contaminantes. Por lo que es importante determinar si la variación de la altura con respecto al nivel influye en la selección del modo de trabajo por parte de la ECU.

## II. DESARROLLO

### 1. Metodología

El vehículo que se utilizó en la investigación fue un MAZDA CX-5 el cual empezó su producción en el 2012 y se mantiene hasta la actualidad con el sistema de inyección directa a gasolina que constituye uno de los componentes de la tecnología Skyactiv que promoción Mazda en este vehículo. Las especificaciones técnicas se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas Mazda CX-5

Especificación técnica	Característica
Posición del motor	Delantero Transversal
Número cilindros	4 en línea
Cilindrada	1998 (cc)
Potencia Máxima	165 Cv (121 kW) / 6.000 r.p.m
Par motor maxima	210 Nm / 4.000 r.p.m.
Diámetro x Carrera (mm)	83,5 mm x 91,2 mm
Relación de compression	14,0 : 1
Alimentación	Inyección directa.
Normativa de emisión de gases	Euro V
Combustible	Gasolina

Fuente: Mazda, 2013

Se utiliza un escáner automotriz que cumple la legislación de protocolo de comunicación OBDII que prescribe una estandarización de las informaciones de lectura en la línea de datos conforme a las especificaciones (Society of Automotive Engineers, 2002). Se usa el scanner MAXIDAS de la marca Autel que es un equipo genérico, con el cual se puede observar en el equipo los valores de trabajo de los sensores, actuadores e interruptores. En la pantalla de datos cada sensor y actuador posee una línea de datos denominada PID.

Para verificar la ubicación del vehículo en las diferentes posiciones de prueba del auto se utiliza un GPS Garmin e-trex 20 con el cual se puede determinar la altura con respecto al nivel y la

presión atmosférica del lugar de prueba y tiene una memoria interna de 1,7 GB, 2000 puntos de referencia para ubicación de coordenadas y un puede almacenar hasta 10.000 trayectos.

### Método identificación modo de trabajo

Los parámetros para determinar el modo de trabajo estratificado, homogéneo y homogéneo pobre se indican el manual del fabricante (Mazda, 2013) y se observa los rangos de trabajo en función de la carga y velocidad angular del motor como se indica en la figura 1. Además, las principales variables para determinar los modos de trabajo son: las revoluciones del motor que es la velocidad angular con que gira el cigüeñal y se mide en rpm. La carga representa un valor para un régimen de

giro dado, el grado de carga expresa la relación entre el par máximo del motor a ese régimen y está en %. Los valores de datos utilizados de las rpm y la carga se los puede observar en el valor del PID de la línea de datos indicado en el escáner respectivamente (Society of Automotive Engineers,

2002). Al realizar la experimentación se obtienen los valores de carga y rpm los cuales se ubicara en el diagrama y se encontrara el modo de trabajo que corresponde al tipo de estratificación y es ejecutado por la ECU.



Figura 1: Modos de trabajo Mazda cx-5  
Fuente: (MAZDA, 2013)

El ciclo de conducción es basado en las normas de prueba de la SAE (Society of Automotive Engineers, 2008) y en un estudio similar (Robles y Martínez, 2010), pero en un vehículo a gasolina con inyección indirecta de combustible debido a que se obtuvieron resultados confiables y que garantizan una repetitividad. Además, el ciclo de prueba se adaptó a las mismas condiciones de variación de altura con respecto al nivel del mar, ya que se quiso estudiar para establecer también una comparación con este estudio. Se establece una ruta que brinde

las condiciones necesarias de circulación y se pueda cautelar la seguridad de los conductores, que cumpla con las variaciones de altura necesarias y una pendiente máxima de 5°. Se ejecutaron diez pruebas en cada altura, cada ciclo de prueba tiene una duración de 110s, una longitud de 1,1 km, se realiza a temperatura de funcionamiento y se mantienen velocidades medias de “40 km/h” en aceleración y desaceleración y velocidad máxima “60 km/h”. El ciclo se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Ciclo de prueba dinámica

Tiempo (s)	Velocidad (km/h)	Condición Vehículo	Altura de prueba (msnm)
0 a 5	0 (ralentí)	ralentí	0
5 a 10	De 0 a 40	En marcha acelerar	500
10 a 30	40	En marcha aceleración constante	1 000
30 a 40	De 40 a 60	En marcha acelerar	1 500
40 a 60	60	En marcha aceleración constante	2 000
60 a 70	De 60 a 40	En marcha desacelerar	2 500
70 a 90	40	En marcha aceleración constante	3 000
90 a 100	De 40 a 0	En marcha desacelerar	3 500
100 a 105	0	ralentí	4 000

Fuente: Elaboración propia

Los datos a analizar son los valores de revoluciones y carga de motor obtenido a los “25s”, “55s” y “85s” debido a que son los datos más estables del ciclo, y se utilizara estos valores para ubicar en el diagrama revoluciones vs carga

y así obtener el tipo de mezcla o modo de trabajo ejecutado por la ECU. El desarrollo del ciclo y los puntos de tomas de datos se pueden observar en la figura 2.

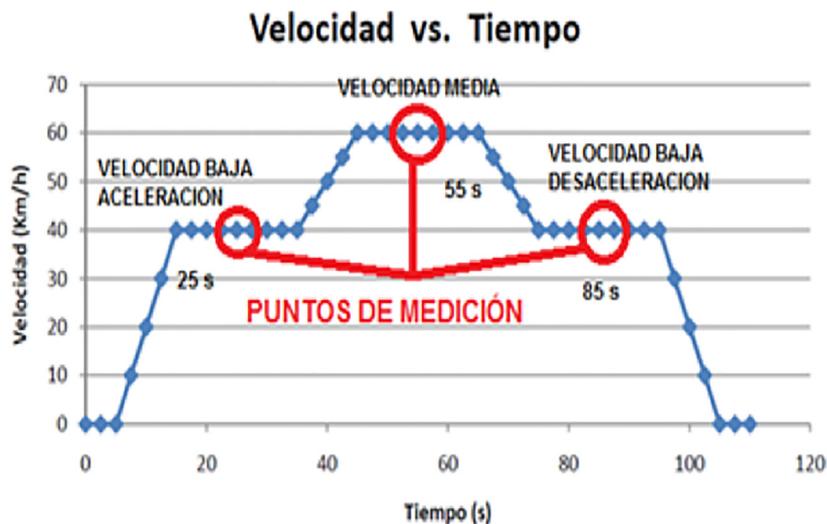


Figura 2: Tiempo del ciclo donde se realiza la toma de datos

Fuente: Elaboración propia

### III. RESULTADOS

En las pruebas dinámicas se determinan los modos de trabajo que se producen en los tiempos de ciclo seleccionados en el protocolo de prueba en las condiciones de velocidad establecidas que son 40 km/h en aceleración, 60 km/h y 40

km/h en desaceleración, a las diferentes alturas seleccionadas los cuales se detallan en la tabla 3 y 4, donde se indican los valores de carga, rpm, presión de combustible, tiempo de encendido, lambda e ingreso de aire, para determinar el tipo de mezcla que el sistema de control del vehículo ejecuta de acuerdo a la variación de la altura.

Tabla 3. Valores de carga, rpm y presión de combustible obtenidos prueba dinámica

Msnm (m)	40 km/h Aceleración			60 km/h			40 km/h Desaceleración		
	Carga (%)	Rpm	Presión en riel (KPa)	Carga (%)	Rpm	Presión en riel (KPa)	Carga (%)	Rpm	Presión En riel (KPa)
0	18.3	2786	4527	36.2	2706	4955	17.6	2748	3147
500	20.6	2775	4965	37.4	2821	5688	19.9	2541	4192
1000	21.0	2592	5083	38.2	3415	7099	20.3	3183	4945
1500	24.2	2748	5566	45.7	2787	7471	20.6	3070	3174
2000	29.4	2748	5807	49.3	2741	7773	24.2	2548	3000
2500	36.2	2633	6103	62.4	3211	8027	27.0	2731	3143
3000	50.1	2729	6244	67.8	2808	9210	33.4	2807	3282
3500	53.4	2613	6455	76.4	2749	11420	33.8	2809	3661
4000	76.4	2588	11846	89.1	3001	12554	56.5	2964	6759

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.** Valores de carga, rpm y presión de combustible obtenidos prueba dinámica

Msnm (m)	40 km/h Aceleración			60 km/h			40 km/h Desaceleración		
	Tiempo Encendido (°)	Lambda (λ)	MAF (g/s)	Tiempo Encendido (°)	Lambda (λ)	MAF (g/s)	Tiempo Encendido (°)	Lambda (λ)	MAF (g/s)
0	45.32	1.263	5,94	50.29	1.057	8,83	49.23	1.233	9,03
500	52.03	1.229	5,39	44.96	1.226	14,52	50.12	1.033	11,54
1000	41.06	1.198	5,27	31.95	1.159	16,57	51.46	1.084	19,19
1500	37.05	1.174	5,22	21.51	0.955	21,47	44.63	1.145	6,87
2000	34.64	1.154	10,55	20.10	0.952	19,51	22.37	1.035	10,57
2500	30.29	1.129	6,54	40.58	1.032	10,54	41.06	1.210	5,22
3000	41.63	1.116	11,73	41.79	1.102	5,48	41.17	1.176	5,27
3500	37.92	1.113	17,56	19.45	0.864	28,48	39.93	1.150	5,38
4000	11.71	0.989	19,5	15.56	0.991	21,51	24.50	1.104	5,99

Fuente: Elaboración propia

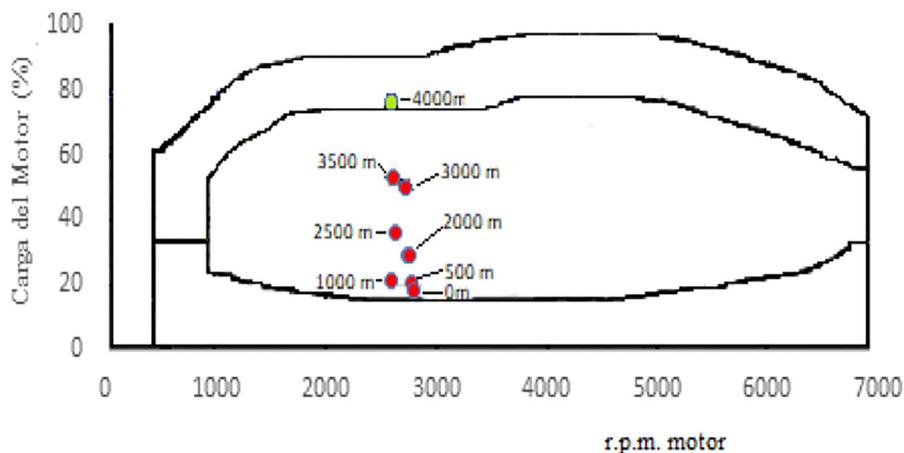
#### IV. DISCUSIÓN

En la figura 3 se representan los modos de trabajo ejecutados a 40 km/h en aceleración a los 25s del ciclo de manejo, se puede observar que en todas las condiciones de altura excepto la mayor, 4000 msnm, se produce un modo homogéneo pobre debido a que de los valores de las alturas de 0 msnm hasta los 3500 msnm se mantienen en el rango de este tipo de mezcla que en esta condición esta entre 17,5% a 73% de carga y de 2500 a 3000 rpm las revoluciones. En la condición de mayor altura se produce el modo homogéneo debido a que esta mezcla se ejecuta a una condición de 73,1% a 95% de carga y con el rango de rpm de 2500 a 3000 rpm y a la mayor altura del experimento que fue 4000 msnm tenemos una carga de 76,4% y a 2588 rpm.

Con respecto a la variación de la altura podemos observar que el incremento de la misma no puede establecer una tendencia proporcional, pero si comparamos la altura más baja con la más alta hay un incremento del 58,1% de carga. Hay una tendencia de reducción de lambda debido a la reducción del volumen de oxígeno que produce un mayor enriquecimiento de la mezcla que se produce en las mayores alturas y va acompañado del modo de trabajo homogéneo determinado por la ECU, es así que el mayor valor es a los 0 metros corresponde a 1.263 y a la mayor altura se tiene un valor de 0.989.

Se puede indicar que el tamaño de las partículas

del material particulado (Seong, 2014) varía de acuerdo a la carga de un modo inversamente proporcional, manteniendo regímenes de 1500 a 3000 rpm es así que a una carga de 33% el tamaño de las partículas varía entre 10 y 20 nm y a una carga al 50% varía entre 7 y 9nm. Debido la variación del tiempo de encendido que en modo homogéneo pobre trabaja en ángulos comprendidos entre 30.29° y 52.03°, mientras en modo homogéneo el ángulo es de 11.71° que influye directamente en la combustión. La presión de inyección indica que a las mismas condiciones por la variación de altura las partículas más pequeñas se producirán a la mayor altura debido a la elevación de presión que en modo homogéneo corresponde a 11846 KPa que en promedio es 47.22% mayor que la presión en cualquiera de las alturas en modo homogéneo pobre.



**Figura 3:** Modo de trabajo a diferentes alturas a 40km/h en aceleración  
**Fuente:** Elaboración propia

La figura 4 indica que a 60 km/h en el segundo 55 del ciclo de prueba se producen a los 4000 y 3500 msnm el modo homogéneo debido a que en el rango de revoluciones que comprende de 2700 rpm a 3500 rpm y la carga esta 73,1% y 95%; para la altura de 3500 msnm es de 76,4% de carga y 2749 rpm y para los 4000msnm es de 89,1% y 3001 rpm. Mientras que para las demás alturas se ejecuta el modo homogéneo pobre que se encuentran en el rango de trabajo de esta mezcla que esta entre 15% y 70% de la carga y en el rango de 2000 a 3000 rpm.

Además, se puede determinar que en modo homogéneo pobre se tiene un valor de lambda mayor a 1 que indica una mezcla pobre y en el modo homogéneo se registran valores menores a 1 como a los 3000 y 4000 con valores de lambda de 0.864 y 0.991 respectivamente, también se puede observar que a las alturas de 1500 y 2000 también se obtienen valores menores a 1 pero es porque se produce una regeneración del catalizador.

El incremento de la altura influye directamente en el aumento de la carga debido a que este incremento de la altura reduce la presión atmosférica que tiene incidencia directa en la relación aire combustible lo que influye en el tamaño de la emisión de partículas (Seong, 2014). La selección del modo de trabajo influye directamente en la presión de inyección de combustible en el cilindro (Jiao, Q., y Reitz, R. 2015), lo que determina una altura de penetración y ángulo de pulverización radial que influye en el proceso de combustión. Razón por la cual con la variación de la altura con respecto a nivel del mar en una misma condición aumenta la presión de inyección, el tiempo de inyección y el caudal inyectado teniendo los mayores valores a los 3500 con un valor de 11420 KPa y a los 4000 msnm un valor de 12554 KPa los cuales se producen en modo homogéneo.

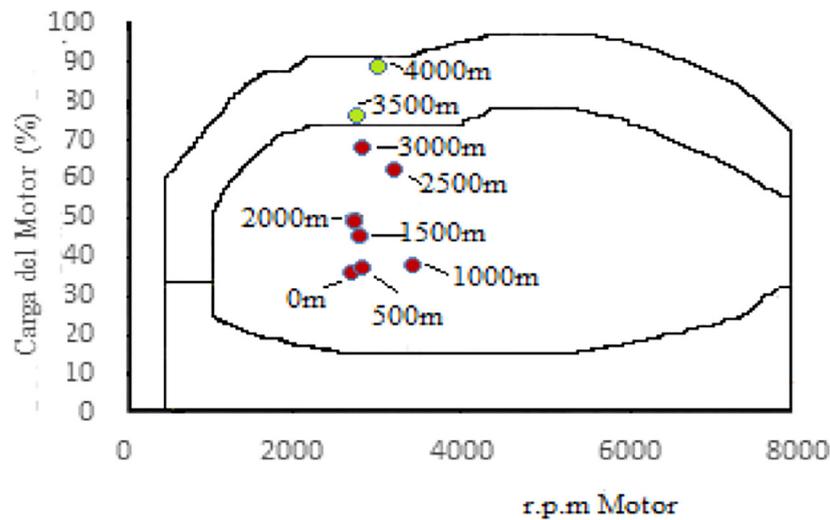


Figura 4: Modo de trabajo a diferentes alturas a 60km/h  
Fuente: Elaboración propia

La figura 5 muestra que la velocidad en desaceleración que corresponde a 40 km/h al segundo 85 del ciclo se produce el modo homogéneo pobre en todas las condiciones de altura debido a que en esta condición las rpm están entre 2700 y 3200 rpm y la carga esta de 17.6 y 56.5% y el rango de trabajo de esta condición es de 15 a 70%. La variación de la altura igual que en las otras condiciones influye en el aumento de la carga que influye en el tamaño de las partículas (Seong, 2014) debido al incremento de la presión de inyección en el cilindro (Montanaro, 2017) con valores de 3147 KPa a la menor altura y 6759 KPa a la mayor, pero se debe considerar que valor del incremento de presión depende del modo de trabajo. En esta condición dinámica es cuando se producen los menores valores de carga, debido

a que por la inercia del vehículo se reducen las pérdidas por estrangulamiento, esta es la razón por la cual en esta condición se produce menor cantidad de emisiones contaminantes de HC, NOx y CO con respecto a las otras condiciones de velocidad del estudio (Niculae et al., 2017). Lo que indica que el modo de trabajo homogéneo pobre se mantiene a pesar de la variación de carga por la altura; para reducir las emisiones de gases contaminantes. Se puede observar en las diferentes condiciones que la lambda es mayor a uno; el mayor valor se registra a la menor altura y es de 1.233 y a la mayor altura es de 1.104. También se confirma que en el modo homogéneo pobre el tiempo de encendido trabaja de 22.37° a 51.46° lo que indica que el rango de trabajo del tiempo de encendido es mayor a 20°.

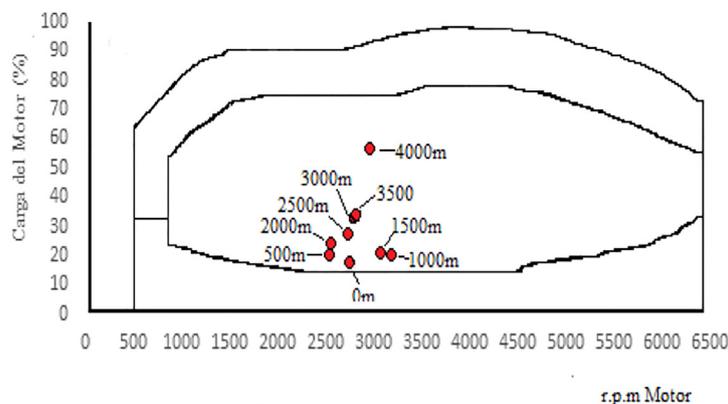


Figura 5: Modo de trabajo a diferentes alturas a 40km/h en desaceleración  
Fuente: Elaboración propia

## V. CONCLUSIONES

Las pruebas mostraron que en la prueba dinámica la variación de altura con respecto al nivel del mar influye directamente en la carga del motor lo que determina la selección del modo de trabajo. También se determina que en la prueba dinámica solo se producen los modos de trabajo homogéneo-pobre y homogéneo.

Se demostró la importancia de conocer el modo de trabajo debido a que la selección del modo de trabajo y los rangos de trabajo de los diferentes sensores y actuadores cambian variando como la presión de inyección, tiempo de inyección, caudal de inyección, tiempo de encendido, cantidad y flujo de ingreso de aire, relación aire combustible, apertura y cierre de válvulas lo que influye directamente en las emisiones contaminantes, consumo de combustible y prestaciones de torque y potencia.

Mediante la experimentación se determinó que la mezcla estratificada no se produce en las condiciones de prueba dinámica, la mezcla homogénea pobre se produce en las diferentes alturas a excepción de los 4000 y 3500 msnm donde se produce el modo homogéneo que se produce básicamente por la carga la cual varía por el aumento de la altitud con respecto al nivel del mar.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alagumalai, R. (2014). Internal combustion engines: Progress and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 561-571. doi: 10.1016/2014-06-014
- An, Y., Teng, S., Li, X., Qin, J., Zhao, H., Gang, T., y Liu, B. (2016). Study of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Evolution Processing in GDI Engines Using TRF-PAH Chemical Kinetic Mechanism. *SAE Technical Paper*. doi: 10.4271/2016-01-0690
- Chen, H., Gong, X., Liu, Q., y Hu, Y. (2013). Triple-step method to design non-linear controller for rail pressure of gasoline direct injection engines. *Control Theory and Applications*, 8(11), 948-959. doi: 10.1049/iet-cta.2013.0476
- Costa, M., Catapano, F., Marseglia, G., y Sorge, U. (2015). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Split Injections on the Performance of a GDI Engine Under Lean Operation. *SAE Technical Paper*. doi: 10.4271/201524-2413
- Costa, M., Marchitto, L., Merola, S., y Sorge, U. (2014). Study of mixture formation and early flame development in a research GDI engine through numerical simulation and UV-digital imaging. *Energy*, 77(1), 88-96. doi:10.1016/2014-04-114
- Costagliola, M. (2013). Combustion efficiency and engine out emissions of SI engine fueled with alcohol/gasoline blends. *Applied Energy*, 1(1), 1162-1171. doi:10.1016/2012-09-042
- Dahl, D., Denbratt, I., y Koopmans, L. (2009). An Evaluation of Different Combustion Strategies for SI Engines in a Multi-Mode Combustion Engine. *SAE Int. J. Engines*, 1(1), 324-335. doi:10.4271/2008-01-0426
- Doornbos, G., Hembal, G., y Dahl, D. (2015). Reduction of Fuel consumption and Engine-Out NOx Emissions in a Lean Homogeneous GDI Combustion System, Utilizing Valve Timing and an Advanced Ignition System. *SAE Technical Paper*, 8(3). doi: 10.4271/2015-01-0776
- Gaeta, A., Fiengo, G., Palladino, A., y Giglio, V. (December 2009). A control oriented model of a Common-Rail System for Gasoline Direct Injection Engine. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Shanghai, China.
- Gu, X., Huang, Z., Cai, J., Gong, J., Wu, J., y Lee, F. (2012). Emission Characteristics of a Spark-Ignition Engine Fuelled With Gasoline-n-Butanol Blends in Combination With EGR. *Fuel*, 93, 611-617. doi: 10.1016/2011-11-040
- Hanabusa, H., Kondo, T., Hashimoto, K., y Sono, H. (2013). Study on Homogeneous Lean Charge Spark Ignition Combustion. *SAE Technical Paper*. doi:10.4271/2013-01-2562
- Huang, C., Yasari, E., Johansen, L., Hemdal, S.,

- y Lipatnikov, U. (2016). Application of Flame Speed Closure Model to RANS Simulations of Stratified Turbulent Combustion in a Gasoline Direct-Injection Spark-Ignition. *Combustion Science and Technology*, 188(1), 98-131. doi: 10.1080/00102202.2015.1083988
- Jiao, Q., y Reitz, R. (2015). The Effect of Operating Parameters on Soot Emissions in GDI Engines. *SAE Int. J. Engines* 8(3), 1322-1333. doi:10.4271/2015-01-1071
- Kar, T., y Agarwal, AK. (2015). Development of a single cylinder CNG direct injection engine and its performance, emission and combustion characteristics. *Int. J. Oil, Gas and Coal Technology*, 10(2), 204-220. Recuperado de <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJOGCT.2015.070839>
- Karwa, N., Stephan, P., Wiese, D., y Lejsek, D. (December 2014). Gasoline direct injection engine tip drying. 19<sup>th</sup> Australian Fluid Mechanics Conference. Melbourne, Australia.
- Kawasumi, Y., Yasui, Y., y Higashitani, H. ( June 2006). Cooperated Control of Multi Stage Injection System for Direct Injection Gasoline Engine. American Control Conference. Minneapolis, MN, USA
- Lapuerta, M., Armas, O., Agudelo, J y Sánchez, C. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento. *Información Tecnológica*, 17(5), 21-30. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2196209>
- Li, Y., y Dexin, L.( March 2011). Study on the HC Emissions During Cold-Start Conditions of Gasoline Direct Injection Engine. 4<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Computation Thecnology and Automation. Shenzhen, Guangdong, China.
- Liu, Q. ( June 2013). Active Disturbance Rejection Control of Common Rail Pressure for Gasoline Direct Injection Engine. American Control Conference. Washington, DC, USA.
- Lopez, J. (2012). Análisis y Estudio de Sistemas de Aumento de Rendimiento y Reducción de Emisiones en Motores Alternativos de Combustión Interna (tesis pregrado). Universidad Zaragoza, Zaragoza, España.
- Mazda Motor Corporation. (2013). Workshop Manual Engine CX-5. USA.
- Mazda Motor Corporation. (2012). MAZDA CX-5 Manual Service. USA.
- Merola, S., Tornatore, C., y Irimescu, A. (2016). Cycle-resolved visualization of pre-ignition and abnormal combustion phenomena in a GDI engine. *Energy Conversion and Management* 127(1), 380-391. doi: 10.1016/2016.-09-035
- Montanaro, A., Allocca, L., Lazzaro, M., y Meccariello, G. (2016). Impinging Jets of Fuel on a Heated Surface: Effect of Wall Temperature and Injection Conditions. *SAE Technical Paper* 8(63). doi:10.4271/2016-01-0863
- Montanaro, A., Malaguti, S., y Alfuso, S. (2012). Wall Impingement Process of a Multi-Hole GDI Spray: Experimental and Numerical Investigation. *SAE Technical Paper*. doi:10.4271/2012-01-1266
- Niculae, M., Ivan, F., y Neacsu, D. (February 2017). About the constructive and functional particularities of spark ignition engines with gasoline direct injection: experimental results. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Arges, Romania
- Piazzullo, D., Costa, M., Allocca, L., y Montanaro, A. (2017). A 3D CFD Simulation of GDI Sprays Accounting for Heat Transfer Effects on Wallfilm Formation. *SAE Int. J. Engines* 10(4), doi: 10.4271/2017-24-0041
- Polat, S., Uyumaz, A., Solmaz, H., Yilmaz, E., Togo, T., Y Yücesu, S. (2014). Numerical Study on the Effects of EGR and Spark timing to Combustion Characteristics and NOx Emission of a GDI Engine. *International Journal of Green Energy*, 13 (1), 63-70. doi: 10.1080/15435075.2014.909361

- Portilla, A, & Caiza, P. (2010). Determinación de la influencia de la altura en emisiones contaminantes de un vehículo con motor ciclo Otto de inyección electrónica de gasolina (tesis maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Robles, L, & Martínez, J. (2010). Estudio del comportamiento de las variables de un motor de inyección electrónica respecto a la altura sobre el nivel del mar (tesis maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Rodríguez, J., y Cheng, K. (2016). Cycle-by-Cycle Analysis of Cold Crank-Start in a GDI Engine.” *SAE Int. J. Engines*, 9(2). Recuperado de <http://hdl.handle.net/1721.1/102389>
- Saw, O., y Mallikarjuna, J. (2017). Effect of spark plug and fuel injector location on mixture stratification in a GDI engine - A CFD analysis. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 243(1). doi:10.1088/1757-899X/243/1/012025
- Schulz, F.m Schmidt, J., Kufferath,A., y Samenfink, W. (2014). Gasoline Wall Films and Spray/Wall Interaction Analyzed by Infrared Thermography. *SAE Int. J. Engines* 7(3) 1165-1177 doi:10.4271/2014-01-1446
- Seong, H., Choi, S., y Lee, K. (2014). Examination of Nanoparticles from Gasoline Direct-Injection (GDI) Engines Using Transmission Electron Microscopy (TEM). *International Journal of Automotive Technology*. 15(2), 175-181. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s12239-014-0019-5>
- Society of Automotive Engineers. (2002). SAE J 1979: /E Diagnostics Test Modes. Recuperado de [https://www.sae.org/standards/content/j1979\\_201202/](https://www.sae.org/standards/content/j1979_201202/)
- Society of Automotive Engineers. (2008). Fuel Economy Measurement Road Test Procedure. SAE J 1082:2008. Recuperado de [https://www.sae.org/standards/content/j1082\\_200802/](https://www.sae.org/standards/content/j1082_200802/)
- Suarez, M. (2012). Interaprendizaje de Probabilidades y Estadística Inferencial con Excel Winstat y Graph. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/940/1/Interaprendizaje%20de%20Probabilidades%20y%20Estad%3ADstica%20Inferencial%20con%20Excel,%20Winstats%20y%20Graph.pdf>
- Wang, B., Yizhou, J., Badawy, T., y Xu, H. (2017). Numerical analysis of deposit effect on nozzle flow and spray characteristics of GDI injectors. *Applied Energy*. 204, 1215-1224 doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.094