

Desarrollo e Innovación de Sistemas de Inyección de Agua en un Motor de Combustión Interna Alternativo “Mayor eficiencia - Reducción de Emisiones Contaminantes”

Anrango, Alex¹

¹Instituto Superior Tecnológico de Tecnologías Apropriadas INSTA, Quito, Ecuador

Resumen: El objeto de este documento es investigar y dar a conocer los diferentes procesos de inyección de agua aplicados en un MCIA, sus ventajas y desventajas técnicas, para poder comprobar los resultados obtenidos con una simulación realizada por varios autores. Con base en una exhaustiva revisión bibliográfica se considera que el empleo de un sistema de inyección de agua resulta muy beneficioso, a fin de conseguir cumplir las normativas de anticontaminación, que cada vez son más restrictivas.

Después de realizar simulaciones pertinentes y un estudio paramétrico se observa como las tendencias y valores concuerdan con lo esperado. Para la validación de datos se toma la comparación de los resultados obtenidos con aquellos publicados en diferentes artículos. Una vez validados, se concluye que un sistema de inyección de agua puede ser considerado como un buen sustituto de sistemas actuales tales como sistemas EGR y/o catalizadores de reducción de NO_x, mejorando además el rendimiento y las prestaciones de un MCIA.

Palabras clave: Inyección de agua; sistemas anticontaminación; control de combustión; motores alternativos.

Development and Innovation of Water Injection Systems in an Alternative Internal Combustion Engine “Greater Efficiency - Reduction of Pollutant Emissions”

Abstract: The purpose of this document is to investigate and publicize the different water injection processes applied in a MCIA, its advantages and technical disadvantages, in order to verify the results obtained with a simulation carried out by several authors. Based on an exhaustive literature review, it is considered that the use of a water injection system is very beneficial, in order to comply with anti-pollution regulations, which are increasingly restrictive. After performing relevant simulations and a parametric study, it is observed how trends and values are consistent with expectations. For the validation of data, the comparison of the results obtained with those published in different articles is taken. Once validated, it is concluded that a water injection system can be considered as a good substitute for current systems such as EGR systems and NO_x reduction catalysts, further improving the performance and performance of a MCIA.

Key words: Water injection; anti-pollution systems; combustion control; alternative engines.

INTRODUCCIÓN

Las nuevas tendencias propuestas en normativas anticontaminación junto a la necesidad de conseguir motores más potentes y eficientes, sin alterar el consumo específico de combustible, hace importante la implantación de nuevos sistemas anticontaminantes en el motor para conseguir dicho fin (Rodríguez, 2018). El control de emisiones para motores diésel es mucho más estricto que para los motores gasolina, por tanto, resulta muy ventajoso emplear el sistema de inyección de agua con el objetivo de reducir emisiones contaminantes.

Debido a esta regulación todo vehículo auto motor se ha de homologar con un valor de emisiones para poder ser comercializado dentro del territorio. Sin embargo, para

motores con encendido por chispa eléctrica, existe el problema de auto detonación por lo que para aumentar la relación de compresión y con esto mejorar el rendimiento del ciclo, hay que reducir las presiones y temperaturas máximas; para ello, una manera muy eficiente de hacerlo es por medio de la inyección de agua.

La experimentación directa, bajo el modelado de motores ofrece una serie de ventajas que a nivel experimental son difíciles de conseguir. Los experimentos se acercan más a la realidad, con el inconveniente de la incertidumbre de la medida, y por otra, se ahorra tiempo de ensayo y por consecuencia un ahorro económico (Rodríguez, 2018)

“AVL BOOST” es una herramienta de simulación de motores (AVL, BOOST User Guide, 2016) que permite el modelado

alex.anrango@insta.edu.ec

del motor con todas sus características internas y externas como son los conductos que lo conectan con alguna instalación, así como, lo elementos de control necesarios para el control de ciertas variables del sistema. Esta herramienta genera resultados útiles para el estudio, resultados como potencia generada por el motor, presiones máximas y temperaturas que se alcanzan en el cilindro.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se elaboró con el propósito de generar un impacto social en la comunidad, direccionado a disminuir las emisiones contaminantes emitidas por los motores de combustión interna alternativos diésel y gasolina, que no obedecen a los lineamientos mínimos establecidos por las normativas anticontaminación que rigen en Ecuador.

El objetivo de este trabajo es investigar y estudiar los sistemas de inyección de agua en motores de combustión interna alternativos, mediante el análisis de trabajos anteriores realizados por otros autores. Realizar un modelo que simule el proceso de inyección de agua mediante el software comercial "AVL BOOST". (AVL, 2016) Realizar estudios paramétricos en el motor modelado y comprobar que los resultados obtenidos son coherentes con los obtenidos por otros autores. Los motores MEC en la actualidad, constan de inyección directa de combustible, cuatro válvulas por cilindro y se trabaja en una tecnología cada vez más avanzada en la sobrealimentación. (M. Kousoulidou, 2008) Las emisiones de CO₂ son comidas pero el mayor problema lo tienen con las emisiones de NO_x y partículas, las cuales con las normativas anticontaminación obliga a realizar post-tratamiento de los gases, que son muy costosos pero necesarios para poder homologar el producto.

Por su parte, los motores MEP en la actualidad, se está optando por la inyección directa y cuatro válvulas por cilindro al igual que los de encendido por compresión. (M. Kousoulidou, 2008) Se está optando por una fuerte de sobrealimentación y reducir la cilindrada del motor, compensando la baja potencia a bajas revoluciones con la sobrealimentación.

El problema de estos motores es el bajo rendimiento y el consumo específico comparado con un motor MEC, para ello es necesario aumentar el rendimiento del ciclo que es dependiente de la relación de compresión, sin que el auto inflame la mezcla.

Métodos de Inyección de agua

La inyección de agua consiste en inyectar agua mezclado con combustible en el interior del cilindro, en un determinado tiempo, medido por el ángulo recorrido por el cigüeñal, bajo unas condiciones de presión y temperatura, todo ello realizado mediante diferentes procedimientos según el tipo de motor y prestaciones solicitadas (Rodríguez, 2018)

En los trabajos de G. Greeves. *et.al.* se describen los métodos de inyección desde un punto de vista experimental, realizados en el año 1977. Los métodos los estudia de manera independiente, y establece un montaje experimental para hacer la experimentación.

Inyección en el conducto de admisión de aire

Se inyecta agua en el conducto de la admisión de aire mediante un inyector de diámetro elevado (+/-0.50mm), a una presión de 175 atm, aproximadamente. La inyección de agua se realiza en el punto muerto superior del cilindro. Este mecanismo de inyección posee un límite de la mezcla de agua/combustible, en el cual no se produce encendido, por la excesiva humedad de la mezcla.

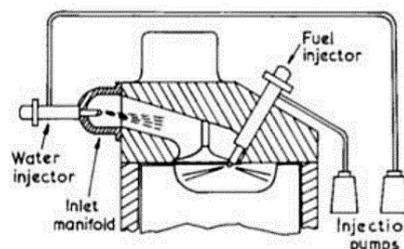


Figura 1. Montaje de sistema de inyección de agua en el conducto de admisión (G. Greeves, 1977)

En el trabajo de Mingrui. *et. al.*, el mecanismo usado es una bomba de agua externa accionada por el cigüeñal del motor, que se une por tuberías de cobre, a los inyectores.

Un estudio importante realizado por los investigadores Tazua, *et. al.*, en el ámbito de la inyección de agua en el conducto de admisión en un motor orientado a la automoción. En éste se define, una manera muy original y efectiva de conseguir y cumplir la nueva normativa EURO 6, de contaminación, especialmente dura para los vehículos, que monten un motor de encendido por compresión.

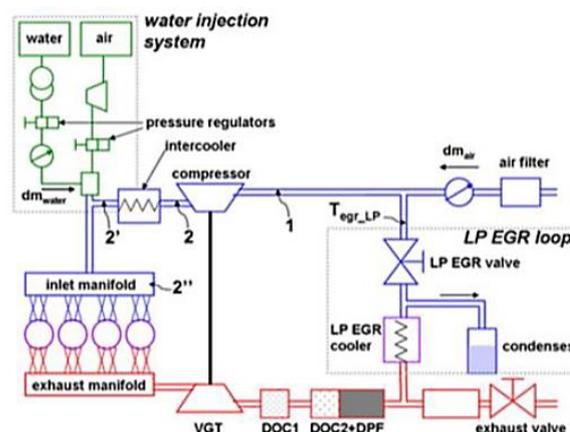


Figura 2. Esquema de instalación de los estudios de Tazua *et. al.* (X. Tazua, 2010)

La cantidad de agua se ha definido de una manera en el que se contabiliza la pérdida de O₂ en pro de introducir agua.

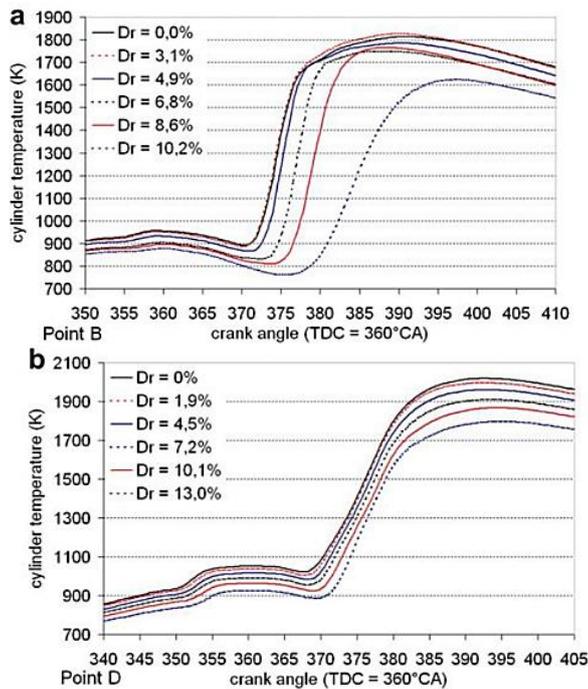


Figura 3. Temperatura a lo largo de ciclo para diferentes cantidades de agua, en los puntos B (a) y D (b), para diferentes puntos de funcionamiento (X. Tazua, 2010)

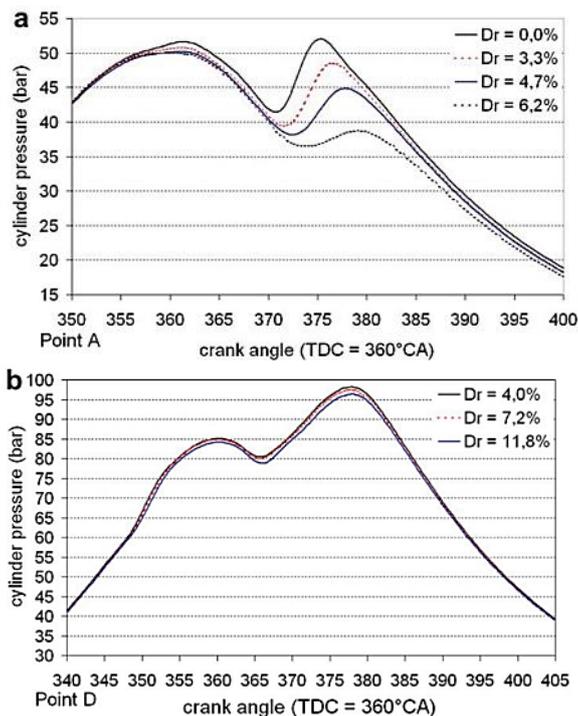


Figura 4. Presión en el cilindro para diferente agua, en los puntos A (a) y D (b) (X. Tazua, 2010)

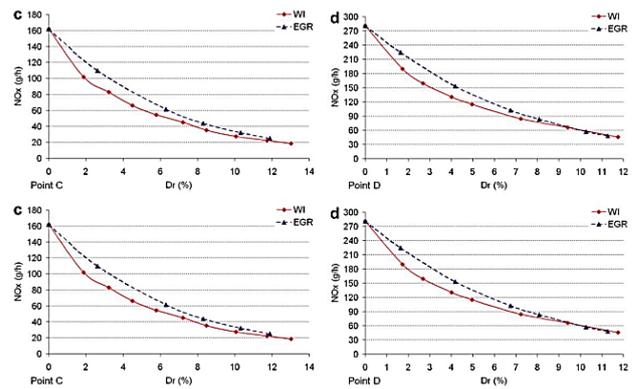


Figura 5. Emisiones de NOx función de Dr. En los diferentes puntos de funcionamiento: Punto A (a), Punto B (b), Punto C (c), Punto D (d) (X. Tazua, 2010)

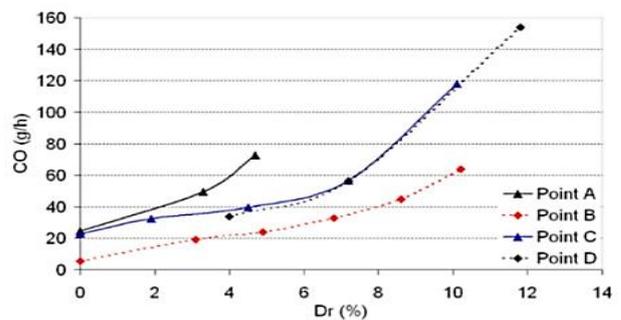


Figura 6. Emisiones de CO, en los diferentes puntos

Inyección de agua directa al cilindro

Se inyecta agua directamente al cilindro por medio de una bomba e inyectores independientes. En este caso se usan inyectores de diámetro menos (+0.32mm), y convenientemente de tres orificios, a una presión de 165 atm. Para llevarlo a cabo, se usa una bomba auxiliar, accionada por el cigüeñal del motor, y unida al inyector por medio de tubería de cobre.

Presenta la ventaja de poder variar además de la relación de agua/combustible, seleccionar el tiempo exacto en el que se realiza la inyección pudiéndose retrasar o adelantar en función de las especificaciones que se quieran conseguir (G. Greeves, 1977)

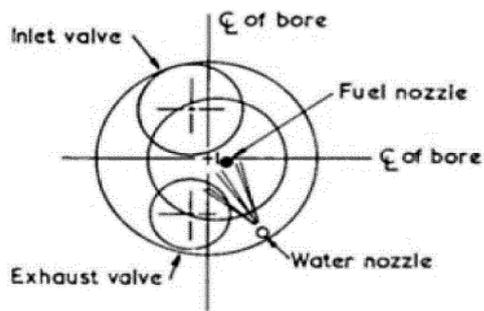


Figura 7. Montaje de sistema de inyección de agua directa en el cilindro (G. Greeves, 1977)

En los estudios de Fabio Bozza et. al, se inyecta el agua directamente en el cilindro en un motor gasolina de 2 cilindros y 8 válvulas.

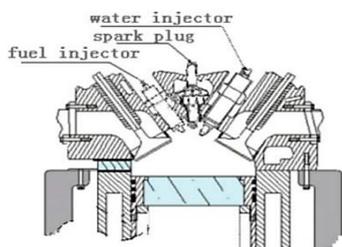


Figura 8. Esquema de sistema de inyección de agua directa al cilindro (W. Mingrui, 2017)

Siguiendo con el ámbito de los motores industriales, los estudios de B. Tesfa et. al, proponen usar un motor de encendido por compresión que funciona con biodiésel, y usar el sistema de inyección de agua para reducir las emisiones de NO_x. El biodiésel es uno de los combustibles renovables que mejores prestaciones se obtienen y además pueden funcionar en un motor que funciona con diésel sin ningún tipo de modificación adicional. El mayor problema que presentan este tipo de combustible, son las elevadas temperaturas que se alcanzan, lo que provoca la abundante formación de óxidos de nitrógeno. Mediante la inyección de agua estas emisiones se reducirán, haciendo de este combustible mucho más apto.

Inyección de agua directa al cilindro, mezcla con el combustible

Se inyecta agua junto al combustible en una mezcla lo más homogénea posible, a través del mismo inyector de combustible usado en el proceso convencional (Rodríguez, 2018)

Se podrá realizar por medio de:

- Un depósito intermedio en el que se realiza la mezcla de agua combustible en la proporción deseada, y éste es bombeado a través de tubería de cobre, a los inyectores del cilindro.

- Dos bombas, independientes una para el combustible y otra para el agua, las cuales se unen inmediatamente antes del inyector por una válvula en T (G. Greeves, 1977)

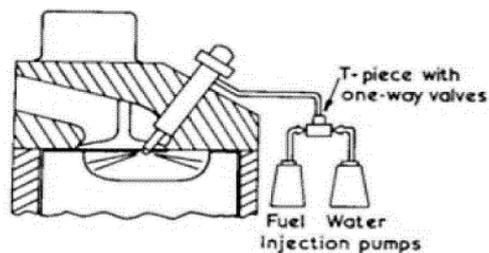


Figura 9. Montaje de sistema de inyección directo al cilindro, mezclado con el combustible (M. E. A. Fahd, 2013)
En el trabajo de Tesfa et. al, se propone además de la inyección de agua directa en el cilindro. Como solución alternativa, Inyectar de manera directa el agua mezclado con el combustible. Tesfa et. al. concluyen que resulta esencial la mezcla del agua con algún agente emulsificante, para garantizar una buena homogeneización de la mezcla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado del proceso de inyección de agua en BOOST AVL

Se ha procedido a realizar dos modelos de un motor mono cilíndrico, de inyección directa diésel. Uno de los modelos se inyecta diferentes cantidades de agua y otro sin el sistema de inyección de agua (Rodríguez, 2018)

El motor se ha modelado de la siguiente forma:

- **Admisión:**

Una entrada desde el exterior unida mediante una tubería directa al cilindro.

En el modelo de inyección de agua tenemos una segunda tubería en la que se introduce la cantidad deseada de agua.

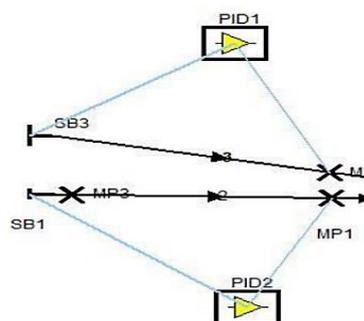


Figura 10. Modelado de la Línea de Admisión

- **Línea de cilindros:**

Un cilindro al que llegan las dos tuberías de la admisión, en el caso del modelo sin agua, solo llegará una tubería.

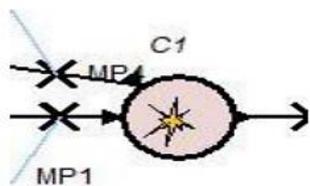


Figura 11. Modelado de la línea de cilindros

• **Escape:**

Un conducto de escape compuesto por una tubería y una salida al exterior.

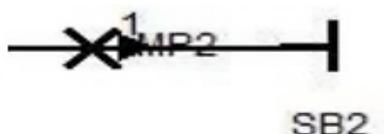


Figura 12. Modelado de la línea de escape

Juntando las tres partes anteriormente comentadas tenemos el modelo completo del motor.

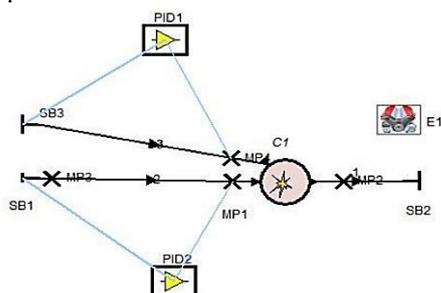


Figura 13. Modelo completo del motor en BOOST

El modelo sin inyección de agua es el análogo, pero sin el sistema de inyección. El resultado se aprecia en la siguiente figura.

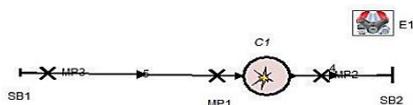


Figura 14. Modelo de motor de 1cil, sin inyección de agua

• **Resultados**

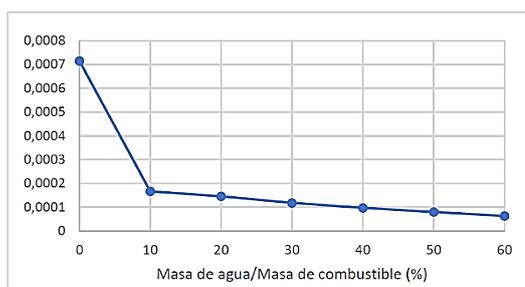
Los resultados obtenidos mediante el programa BOOST. (AVL, BOOST User Guide, 2016) se presentan a continuación. Se distinguen dos tipos de categorías una categoría referida a parámetros prestacionales y una segunda categoría referida a emisiones.

Se mostrarán los valores de las variables termodinámicas durante el ciclo, y por último las emisiones de óxidos de nitrógeno NO_x y partículas.

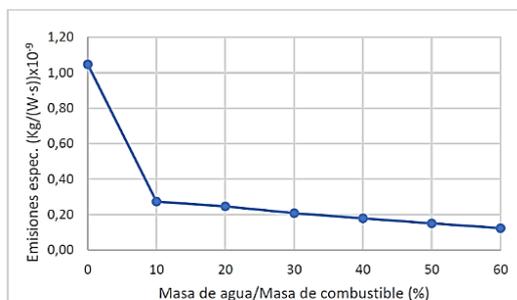
Emisiones contaminantes - Emisiones de NO_x

Las emisiones contaminantes que se han estudiado son aquellas que más dificultades presentan en la homologación de motores diésel, los óxidos de nitrógeno NO_x y las emisiones de partículas. (Rodríguez, 2018)

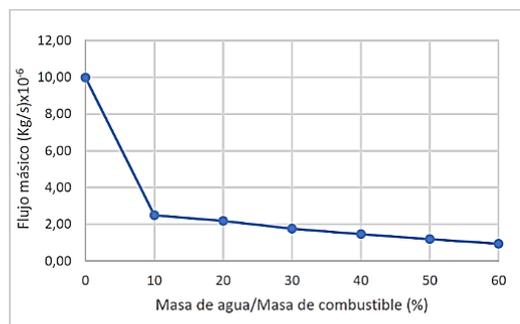
Las emisiones contaminantes se pueden cuantificar en diferentes sistemas de medida. Se pueden expresar en magnitudes específicas (kg/ (W·s)), en unidades de flujo másico (kg/s), o en unidades de fracción másica. (Rodríguez, 2018)



(a)



(b)



(c)

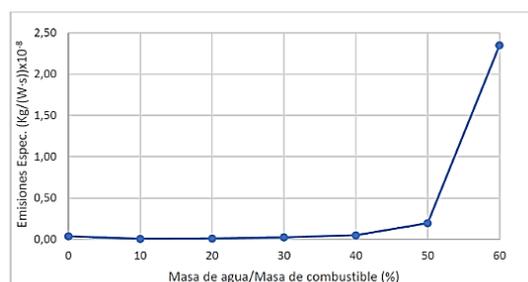
Figura 15. Representación de las emisiones de NO_x en función de la cantidad de agua, expresado en diferentes formas: (a) En forma de fracción másica (b) Unidades específicas Kg/ (W·s) (c) En forma de flujo másico (Kg/s).

Las emisiones de NO_x, dependen de la temperatura alcanzada en el ciclo. Como se ha comentado con anterioridad, a partir de 1200 - 1400 K, se empiezan a formar los óxidos de

nitrógeno, y estos aceleran su formación a medida que aumenta la temperatura.

Al introducir un sistema de inyección de agua las temperaturas a lo largo del ciclo disminuyen de manera drástica, como se vio, de ahí el primer escalón con el primer porcentaje de agua estudiado. En los casos posteriores los NO_x , disminuyen de manera lineal, con la cantidad de agua.

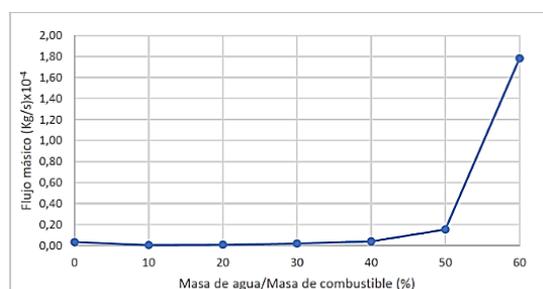
Numerosos autores coinciden en que el propósito fundamental de inyectar agua en un motor de combustión interna tipo MEC es disminuir sus emisiones de NO_x , mediante la disminución de la temperatura en el interior de la cámara de combustión.



(a)

Emisiones de Partículas

A continuación, se representa la evolución de las emisiones de partículas en función de la cantidad de agua inyectada:



(b)

Figura 16. Representación de las emisiones de Partículas función de la cantidad de agua, expresado en diferentes formas: (a) Unidades específicas $\text{Kg}/(\text{W}\cdot\text{s})$ (b) En forma de flujo másico (Kg/s)

Las emisiones de partículas dependen de dos factores importantes: 1) la temperatura, ya que favorece la pirolisis de los hidrocarburos, y 2) la facilidad que tiene el combustible de mezclarse con el oxígeno y oxidarse.

Las emisiones se mantienen de manera constante, incluso llegando a disminuir de manera ligera, en algunos intervalos. (Rodríguez, 2018). Sin embargo, para elevadas tasas de inyección de agua las emisiones de partículas se disparan, debido a que la combustión ya se encuentra muy parasitada por el agua. Además, se mantiene la cantidad de combustible constante en el interior del cilindro. Por tanto, al meter el menos aire y dejar constante la cantidad de combustible, es como si hubiera un dosado efectivo mayor que 0.7; lo que provoca una emisión muy abundante de partículas.

CONCLUSIONES

La implantación de un sistema de inyección de agua en MEC logra reducir las emisiones de NO_x , en orden de cumplir las nuevas normativas de contaminación.

Este sistema se puede emplear en motores grandes o pequeños, en motores de pequeña cilindrada aumentamos el porcentaje de combustión en fase premezclada, y en motores de gran cilindrada el porcentaje de reducción ayuda en gran medida a la homologación del motor. La eficiencia de estos nuevos sistemas de inyección se presenta como una solución alternativa o complementaria a la introducción de EGR y sistemas SCR.

La implantación de un sistema de inyección de agua en MEP es intentar aumentar las prestaciones, como relación de compresión, torque y potencia.

El uso de estos sistemas reporta problemas técnicos que es necesario subsanar, como incluir un depósito de agua destilada, consumible. El consumo de agua es aproximadamente del 30 - 40 %, del consumo de combustible. Se ha diseñado en el programa Boost, un motor de combustión interna, para estudiar el proceso de inyección de agua, usando el modelo general y se ha creado una especie nueva con las propiedades de agua, para poder simular la inyección de agua líquida en el interior del cilindro del motor.

Al aumentar la tasa de agua inyectada, el estado térmico (presión, temperatura y las emisiones de NO_x se reducen, las partículas se mantienen de manera constante aumentándose en gran medida para altas tasas de inyección.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Instituto Superior Tecnológico de Tecnologías Apropriadas INSTA, del cual formo parte del grupo de docentes técnicos, que ha fomentado de manera directa la inserción de sus integrantes en procesos investigativos que permiten obtener mejores resultados de aprendizaje, tanto en los alumnos como en los docentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVL. (2016). *AVL Theory*.

AVL, BOOST User Guide. (2016).

B. Tesfa, R. M. (2012). *Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel* (Vol. 37). Renew. Energy.

G. Greeves, I. M. (1977). *Effects of water introduction on diesel engine combustion and emissions* (Vol. 16). Symp. Combust.

M. E. A. Fahd, Y. W. (2013). *Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition* (Vol. 102). Appl. Energy.

M. Kousoulidou, I. N. (2008). *Road-transport emission projections to 2030 in European urban environments* (Vol. 42). Atmos. Environ.

Rodríguez, P. (2018). *Inyección de agua en un motor de combustión interna alternativo*. Recuperado el 2019, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31468/TFG-I-959.pdf;jsessionid=C86E9DF740172E20A6EECEE427C30F23?sequence=1>

W. Mingrui, N. T. (2017). *Water injection for higher engine performance and lower emissions* (Vol. 90). J. Energy Inst.

X. Tauzia, A. M. (2010). *Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine* (Vol. 35). Energy.