



**Universidad
Europea**

UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Grado en sistemas industriales:
especialización mecánica y automoción**

**TRABAJO FIN DE GRADO
Inyección de agua en motores de
combustión interna**

Alumno: Jaime González Villanueva

Director: Edgar Cantarin Extremera

JUNIO 20224

TÍTULO: Inyección de agua en motores de combustión interna

AUTOR: Jaime González Villanueva

DIRECTOR DEL PROYECTO: Edgar Cantarin Extremera

FECHA: 10 de Junio de 2024



PERMISO DE DIVULGACIÓN

D / D^a Jaime González Villanueva, con el expediente número 22029566, estudiante de 4 curso del Grado/Máster/CFGS de Sistemas Industriales

Permite la divulgación SI ☒ NO ☐

En caso de respuesta afirmativa **PERMITE**

Que el trabajo de su autoría titulado Inyección de agua en motores de combustión interna pueda ser exhibido en los soportes y canales (radio, televisión, Internet, prensa y demás) que la Universidad Europea de Madrid estime necesario para la promoción profesional de sus exalumnos siempre que se cite su autoría. También permite difundir el citado proyecto a través del Repositorio de Trabajos Fin de Estudios TITULA*.

Fecha y firma del autor: 10/06/2024



*Información para los autores

La finalidad principal del Repositorio TITULA de la Universidad Europea de Madrid, es recopilar y dar mayor visibilidad a los Trabajos Fin de Estudios.

En los trabajos realizados en grupo, es obligatorio que cada autor cumplimente de forma individual un permiso de divulgación.

Todas las citas de otras obras que contiene el trabajo están reseñadas adecuadamente tal y como se dispone en el artículo 32 de la Ley de Propiedad Intelectual.

El autor preserva los derechos de explotación y de uso, pudiendo publicar su trabajo en otros soportes, revistas, editoriales, etc. Los proyectos incluidos en el Repositorio dispondrán de licencias Creative Commons del tipo "Reconocimiento -no comercial -sin obra derivada" de modo que los usuarios tendrán que citar y reconocer los créditos de los trabajos, no se podrán utilizar para fines comerciales y no se podrán alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de los mismos.

Solo se mostrarán en acceso abierto aquellos trabajos que tengan el permiso de divulgación del autor y cumplan con los criterios de calidad marcados por la Universidad.

Acepto que mis datos sean tratados conforme a la Política de privacidad y protección de datos de la Universidad Europea (disponible en: <https://universidadeuropea.es/politica-de-privacidad>).

CONFIRMACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO FIN DE GRADO Y TRABAJO FIN DE MÁSTER

D/ D. ^a Jaime González Villanueva, con nº de expediente 22029566 estudiante de Grado/Máster en
Sistemas industriales

CONFIRMA que el Trabajo Fin de Grado/ Trabajo Fin de Máster titulado Inyección de agua en motores de combustión interna es fruto exclusivamente de su esfuerzo intelectual, y que no ha empleado para su realización medios ilícitos, ni ha incluido en él material publicado o escrito por otra persona, sin mencionar la correspondiente autoría. Tampoco material escrito por sí mismo publicado con anterioridad. En este sentido, confirma específicamente que las fuentes que haya podido emplear para la realización de dicho trabajo, si las hubiera, están correctamente referenciadas en el cuerpo del texto, en forma de cita, y en la bibliografía final.

Así mismo, declaro conocer y aceptar que de acuerdo a la Normativa de la Universidad Europea, el plagio del Trabajo Fin de Grado/Máster entendido como la presentación de un trabajo ajeno o la copia de textos sin citar su procedencia y considerándolos como de elaboración propia, conllevará automáticamente la calificación de "suspenso" (0) tanto en convocatoria ordinaria como extraordinaria, así como la pérdida de la condición de estudiante y la imposibilidad de volver a matricular esta o cualquier otra asignatura durante 6 meses.

Fecha y firma: 10/06/2024



Los datos consignados en esta confirmación serán tratados por el responsable del tratamiento, UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID, S.L.U., con la finalidad de gestión del Trabajo Fin de Grado/Máster del titular de los datos. La base para el tratamiento de los datos personales facilitados al amparo de la presente solicitud se encuentra en el desarrollo y ejecución de la relación formalizada con el titular de los mismos, así como en el cumplimiento de obligaciones legales de UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID, S.L.U. y el consentimiento inequívoco del titular de los datos. Los datos facilitados en virtud de la presente solicitud se incluirán en un fichero automatizado y mixto cuyo responsable es UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID, S.L.U., con domicilio en la C/ Tajo s/n, Villaviciosa de Odón. Asimismo, de no manifestar fehacientemente lo contrario, el titular consiente expresamente el tratamiento automatizado total o parcial de dichos datos por el tiempo que sea necesario para cumplir con los fines indicados. El titular de los datos tiene derecho a acceder, rectificar y suprimir los datos, limitar su tratamiento, oponerse al tratamiento y ejercer su derecho a la portabilidad de los datos de carácter personal, todo ello de forma gratuita, tal como se detalla en la información completa sobre protección de datos en el enlace <https://universidadeuropea.es/proteccion-de-datos>.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han ayudado de alguna manera a realizar este trabajo y conseguir ser ingeniero. Sin su apoyo, la realización este proyecto no habría sido posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera y en todos los momentos difíciles. Por haberme inculcado valores como el trabajo duro, la perseverancia y la curiosidad por aprender.

A mis profesores, especialmente a mi tutor, por su guía y orientación durante la elaboración de este trabajo fin de grado. También quiero agradecer al resto del profesorado por haberme transmitido todos sus conocimientos.

A mis amigos, por su apoyo durante los largos meses de trabajo y los años de carrera. Agradezco las horas compartidas estudiando, las risas y los momentos de diversión que he pasado con ellos. Su amistad ha sido fundamental para conseguir mi objetivo.

RESUMEN

En este trabajo fin de grado se va a estudiar la inyección de agua en motores de combustión interna.

Tras una exhaustiva revisión bibliográfica, se aprecia que la inyección de agua es un sistema que resulta ventajoso a la hora de poder cumplir con las normativas de emisiones que cada vez son más estrictas y restrictivas.

Los métodos expuestos en el trabajo han sido validados en los diferentes artículos empleados. Con esto se concluye que un sistema de inyección de agua puede resultar más ventajoso que algunos sistemas actuales como por ejemplo un sistema EGR, o catalizadores de reducción de emisiones de NOx en el escape del vehículo en motores diésel.

Este sistema se puede emplear también en vehículos gasolina buscando así mejorar el rendimiento del motor y mejorar las prestaciones de este.

Además, este sistema ayuda a buscar solución de diferentes problemas técnicos y de optimización que se puede dar, tales como: aceites que al mezclarse con el agua no pierden sus propiedades, funcionamiento en entornos donde la temperatura está por debajo de 0º y optimizar los puntos de inyección para una mayor efectividad.

Palabras clave: Inyección, agua, emisiones, cámara, combustión, NOx, potencia

ABSTRACT

In this final degree project, water injection in internal combustion engines will be studied.

After an exhaustive literature review, it can be seen that water injection is a system that is advantageous when it comes to complying with emissions regulations that are increasingly strict and restrictive.

The methods presented in the project have been validated in the different articles used. This concludes that a water injection system can be more advantageous than some current systems such as an EGR system, or catalysts for reducing NOx emissions in the vehicle exhaust in diesel engines.

This system can also be used in gasoline vehicles, seeking to improve engine performance and improve its features.

In addition, this system helps to find solutions to different technical and optimization problems that may occur, such as: oils that do not lose their properties when mixed with water, operation in environments where the temperature is below 0° and optimizing injection points for greater effectiveness.

Key words: Injection, water, emissions, camera, combustion, NOx, power

Índice

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Antecedentes.....	20
1.2 Objetivos	24
1.3 Justificación	25
Capítulo 2. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	26
2.1 Introducción a los motores MEC y MEP	26
2.1.1 Motores MEC Y MEP en la actualidad	28
2.2 Tipo de inyección de agua según el tipo de motor	29
2.2.1 Motor de Encendido Provocado	29
2.2.2 Motor de Encendido por Compresión	32
2.3 Métodos de inyección de agua	33
2.3.1 Inyección Directa en la Cámara de Combustión	35
2.3.2 Inyección Directa en la Cámara de Combustion Con Mezcla de Combustible	38
2.3.3 Inyección en el Colector de Admisión	39
2.3.4 Inyección de Agua en el Escape	48
2.4 Comparación de los métodos de inyección de agua	50
2.4.1 Inyección directa en la admisión de aire	50
2.4.2 Inyección directa en la cámara de combustión	52
2.4.3 Inyeccion directa en la cámara de combustion mezclado con combustible	53
2.4.4 Combinación con sistema EGR	61
2.4.5 Inyección en el colector de escape	67
2.5 Atomización de la gota	70
2.6 Campos de aplicación	73
2.7 Inconvenientes y posibles desafíos	74
2.8 Ventajas	75
Capítulo 3. APLICACIÓN DE INYECCIÓN DE AGUA EN AUTOMOVILES	76
3.1 Motor BMW M4 GTS	76
3.1.1 Conseguir un mayor rendimiento y reducir el consumo	77
3.1.2 Elevar el caballaje con la inyección de agua.....	78

3.1.3 Obtener una mayor compresión en el punto de mayor rendimiento con la inyección de agua	79
CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

Índice de Figuras

Ilustración 1: Motor Daimbler-Benz DB 601. Fuente [2]	21
Ilustración 2: Motor Rolls-Royce Merlin. Fuente [3]	21
Ilustración 3: Messerschmitt Me 109. Fuente [4]	22
Ilustración 4: Supermarine Spitfire. Fuente [5]	22
Ilustración 5: Motor MEP control de la inyección. Fuente [9]	30
Ilustración 6: Efectos de la inyección de agua en los motores MEP. Fuente [10]	31
Ilustración 7: Temperatura según el porcentaje de agua inyectado. Fuente [9]	34
Ilustración 8: Montaje del sistema de inyección de agua directa. Fuente [8]	35
Ilustración 9: Esquema sistema de inyección directa. Fuente [9]	36
Ilustración 10: Esquema de cogeneración. Fuente [21]	37
Ilustración 11: Montaje del sistema de inyección mezclada con combustible. Fuente [16]	38
Ilustración 12: Montaje del sistema de inyección en el conducto de aire. Fuente [9]	39
Ilustración 13: Esquema de instalación de los estudios de Tauzia. Fuente [24]	41
Ilustración 14: Temperatura en el cilindro según el porcentaje de agua en diferentes puntos. Fuente [24]	42
Ilustración 15: Presión en el cilindro según el porcentaje de agua en diferentes puntos. Fuente [24]	43
Ilustración 16: Emisiones de NOx en los diferentes puntos. Fuente [24]	44
Ilustración 17: Emisiones de partículas en los diferentes puntos. Fuente [25]	44
Ilustración 18: Emisiones de CO en los diferentes puntos. Fuente [24]	45
Ilustración 19: Tiempo de retraso en los diferentes puntos. Fuente [24]	45
Ilustración 20: Temperatura del cilindro en función del O2 reemplazado. Fuente [25]	46
Ilustración 21: Presión del cilindro en función del O2 reemplazado. Fuente [25]	47
Ilustración 22: Disminución del NOx en función de la composición de la mezcla. Fuente [25] ..	47
Ilustración 23: Montaje del sistema de inyección en el conducto de escape. Fuente [17]	48
Ilustración 24: Control del inyector de agua y la válvula de escape. Fuente [17]	49
Ilustración 25: Comparación de la distribución de la temperatura en un motor 2T en función del uso o no de inyección de agua. Fuente [15]	51
Ilustración 26: Comparación de la turbulencia en el interior del cilindro en función del uso o no de inyección de agua. Fuente [10]	52
Ilustración 27: Comparación de los métodos de inyección directa, mezclada con combustible y en el conducto de admisión. Fuente [8]	54
Ilustración 28: Comparación de los métodos de inyección directa, mezclada con combustible y en el conducto de admisión. Fuente [8]	55
Ilustración 29: Diagrama P-V para varios puntos de funcionamiento según el caudal de agua. Fuente [22]	57
Ilustración 30: Disminución del NOx en función del caudal de agua. Fuente [22]	58
Ilustración 31: Evolución del consumo para distintos puntos de carga y distintos caudales de agua. Fuente [22]	59
Ilustración 32: Evolución del rendimiento para distintos puntos de carga y distintos caudales de agua. Fuente [22]	60

Ilustración 33: Temperatura en el interior del cilindro a lo largo de la carrera del pistón en función del agua inyectada. Fuente [9]	61
Ilustración 34: Temperaturas máximas en el interior del cilindro en función del agua inyectada. Fuente [9]	62
Ilustración 35: Esquema de sistema de inyección en un motor sobrealimentado. Fuente [10] .	63
Ilustración 36: Comparación de temperaturas con y sin evaporación de agua. Fuente [12]	63
Ilustración 37: Comparación de los parámetros de emisiones y eficiencia. Fuente [12]	64
Ilustración 38: Comparación de los parámetros de emisiones y eficiencia. Fuente [12]	65
Ilustración 39: Consumo para distintos cocientes de aire-combustible. Fuente [10].....	66
Ilustración 40: Rendimiento para distintos tiempos de inyección. Fuente [26].....	66
Ilustración 41: Comparación de presión en el cilindro para diferentes configuraciones de EGR. Fuente [16]	68
Ilustración 42: Intervalo de valores de presión media del cilindro con diferentes configuraciones de EGR e inyección de agua. Fuente [17]	69
Ilustración 43: Intervalo de valores de emisiones de NOx y partículas con diferentes configuraciones de EGR e inyección de agua. Fuente [17]	69
Ilustración 44: Atomización de la gota según los números adimensionales y diferentes presiones. Fuente [14]	71
Ilustración 45: Tamaño más frecuente de la gota según el sistema de inyección. Fuente [8] ...	72
Ilustración 46: Silueta motor BMW M4 GTS. Fuente [18]	76
Ilustración 47: Chasis del BMW M4 GTS. Fuente [19]	77
Ilustración 48: Depósito de agua BMW M4 GTS. Fuente [20]	79
Ilustración 49: Motor del BMW M4 GTS. Fuente [19]	80

Índice de Tablas

Tabla 1: Normativa EURO. Fuente [1] adaptada	18
Tabla 2: Reducción con cada normativa EURO. Fuente [1] adaptada	19
Tabla 3: Datos de motor ensayado por Tauzia 1. Fuente [24]	40
Tabla 4: Datos de motor ensayado por Tauzia 2. Fuente [24]	40
Tabla 5: Datos de motor ensayado por Xiaokang. Fuente [25]	46
Tabla 6: Datos de motor ensayado por B.Tesfa. Fuente [22]	56
Tabla 7: Datos de motor ensayado por Nour 1. Fuente [17]	67
Tabla 8: Datos de motor ensayado por Nour 2. Fuente [17]	67
Tabla 9: Valores de referencia de atomización de la gota de agua. Fuente [13]	70

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La normativa actual de contaminación además de la necesidad de conseguir motores eficientes y potentes todo ello sin condicionar el consumo de estos. Por ello se hace necesario la instalación de elementos que nos consigan permitir dicho fin como puede ser hardware en el motor o en el escape del coche para poder conseguir lo que se quiere, reducir las emisiones sin afectar al funcionamiento.

En la siguiente tabla se resumen los distintos sistemas que se han ido empleando con el fin de reducir las emisiones.

Vehículos de pasajeros y vehículos industriales ligeros		
Regulación	Gasolina	Diésel
Pre ECE	Carburador sin postratamiento	Inyección directa sin postratamiento
ECE 15/04	Algunos modelos con inyecciones como punto y catalizador de oxidación	
EURO 1	Inyección indirecta multipunto (MPI) y catalizador de tres vías (TWC), realimentado mediante sonda lambda	Inyeccion de alta presión (HPI)
EURO 2	MPI +TWC	HPI + catalizador de oxidación
EURO 3	MPI + TWC + doble sonda lambda	HPI + catalizador de oxidación + EGR
EURO 4	MPI + TWC + doble sonda lambda	HPI + catalizador de oxidación múltiple + EGR
EURO 5	MPI + TWC + catalizador con materiales mejorados	HPI + catalizador de oxidación + EGR + filtro de partículas (DPF)

EURO 6		HPI + catalizador de oxidación + DPF + catalizador de NOx
--------	--	---

Tabla 1: Normativa EURO. Fuente [1] adaptada

Categoría	Norma	Año	NOx (%)			PM (%)		
			Emisión referencia	Reducción teórica	Reducción práctica	Emisión referencia	Reducción teórica	Reducción práctica
Vehículos de pasajeros de gasolina	EURO 4	2005	0,08	0	0		0	0
	EURO 5	2010	0,06	25	25		0	0
	EURO 6	2015	0,06	25	25		0	0
Vehículos de pasajeros de diésel	EURO 4	2005	0,25	0	0	0,025	0	0
	EURO 5	2010	0,18	28	28	0,003	88	95
	EURO 6	2015	0,08	68	68	0,003	88	95
Vehículos industriales de gasolina	EURO 4	2005	0,1	0	0		0	0
	EURO 5	2010	0,075	25	25		0	0
	EURO 6	2015	0,075	25	25		0	0
Vehículos industriales de diésel	EURO 4	2005	0,33	0	0	0,04	0	0
	EURO 5	2010	0,235	28	28	0,003	92,5	95
	EURO 6	2015	0,105	68	68	0,003	92,5	95

Vehículos pesados	EURO 4	2005	3,5	0	0	0,03	0	0
	EURO 5	2010	2	43	43	0,03	0	0
	EURO 6	2015	0,4	89	89	0,015	50	95

Tabla 2: Reducción con cada normativa EURO. Fuente [1] adaptada

Como se puede observar en la tabla, las restricciones cada vez son mayores, lo cual implica un mayor coste en la producción para lograrlo, por ello sistemas como la inyección de agua son muy beneficiosos. Como se puede observar la reducción de una normativa a otra supone grandes cambios en cuanto al porcentaje que debe reducirse. Cabe destacar también que la reducción del NOx en los vehículos pesados es de un 89%.

La escasez de los combustibles fósiles y el continuo crecimiento del precio obliga a las marcas a diseñar motores más eficientes en cuanto a emisiones sin afectar a la potencia del motor y al consumo.

Debido a estas normativas anticontaminantes cada vehículo debe de homologar unas emisiones específicas cumpliendo dicha normativa para poder comercializar dicho vehículo en la Unión Europea. Dichos vehículos deben de llevar una etiqueta informando de la normativa que cumple en función de sus emisiones.

Para los vehículos de encendido provocado existe un problema, la auto detonación, por ello si se quiere mejorar el rendimiento con una mayor relación de compresión se debe reducir la temperatura y la presión de dicho motor, para lo cual se emplea la inyección de agua.

1.1 Antecedentes

La historia sobre la inyección de agua en los motores de combustión interna lleva más de un siglo en desarrollo e innovación. Desde el comienzo fue una solución para los problemas de detonación, actualmente se utiliza para mejorar la eficiencia, reducir emisiones... La inyección de agua está en constante investigación y sigue avanzando en la industria de la automoción.

A continuación, se relatará una narrativa detallada sobre la historia de la inyección de agua en los motores de combustión interna:

Primera etapa: 1878-1930: Los primeros experimentos.

La inyección de agua en motores de combustión interna aparece en 1878 cuando el ingeniero alemán Wilhelm Maybach desarrolla el primer motor de gasolina que incorpora inyección de agua. Este sistema permitía enfriar la mezcla dentro de la cámara de combustión permitiendo una mayor compresión y una combustión más eficiente. Sin embargo, este sistema estaba limitado debido a la tecnología de la época.

El ingeniero británico Harry Ricardo en la década de 1930 llevo a cabo unos experimentos con el objetivo de estudiar los efectos de la inyección de agua en los motores de combustión interna. Con su equipo de investigadores comenzó a experimentar con agua pulverizada en motores de aviones con el objetivo de estudiar el efecto que tendría con la detonación del combustible y que temperaturas alcanzaría la cámara de combustión. Con estos experimentos se asentaron las bases para las futuras investigaciones sobre la inyección de agua.

Segunda etapa: 1939-1945: Aplicaciones en la Segunda Guerra Mundial

Durante toda la segunda guerra mundial los motores de aviación incorporaban inyección de agua en los aviones de combate para mejorar su rendimiento. Para ello se basaban en la capacidad que tenía el agua de enfriar la mezcla y el combustible de tal forma que se conseguía aumentar el rendimiento del motor en los momentos donde la demanda era mayor, por ejemplo, el despegue o el combate. Algunos motores que incorporaban dicha tecnología son el Daimler-Benz DB 601 y el Rolls-Royce Merlin que montaban aviones como el Messerschmitt Me 109 y el Supermarine Spitfire respectivamente.

1. Daimler-Benz DB 601 (1937): este motor usado en aviones de la segunda guerra mundial fue uno de los primeros motores que incorporaban un sistema de inyección de agua para aumentar la potencia en momentos de alta demanda. Este motor demostró la efectividad de la inyección de agua para mejorar el rendimiento de los motores.

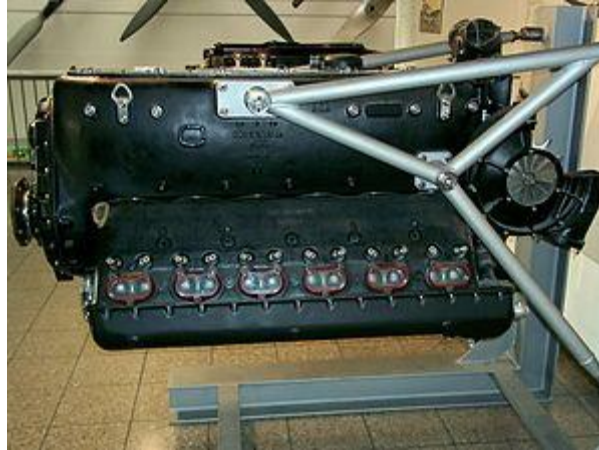


Ilustración 1: Motor Daimler-Benz DB 601. Fuente [2]

2. Rolls-Royce Merlin (1940): este motor fue utilizado en muchos aviones británicos durante la segunda guerra mundial, también incorporaba un sistema de inyección de agua para aumentar de forma temporal la potencia en las situaciones de emergencia. Esto permitió a los aviones conseguir ventaja en los combates.



Ilustración 2: Motor Rolls-Royce Merlin. Fuente [3]

3. Messerschmitt Me 109 (1942): este es un avión de caza alemán el cual es otro de los ejemplos exitosos de la inyección de agua en los motores de aviones. Este usaba un sistema de inyección de agua-metanol el cual conseguía aumentar la potencia del avión de forma considerable.



Ilustración 3: Messerschmitt Me 109. Fuente [4]

4. Supermarine Spitfire: este celebre avion británico de la segunda guerra mundial utilizó el motor Rolls-Royce Merlin que era conocido por su fiabilidad y potencia. De este destacaba el innovador sistema de inyección de agua permitiendo al Spitfire aumentar su potencia en situaciones de combate, esto ayudaba a que los pilotos tuviesen una gran ventaja. Con este sistema el avión conseguía llegar a mayor altura y mejorar su rendimiento en determinadas maniobras. Todo esto contribuyó para que se considere uno de los mejores aviones de la segunda guerra mundial.



Ilustración 4: Supermarine Spitfire. Fuente [5]

Tercera etapa 1945-presente: Nuevos desarrollos y aplicaciones actuales

Una vez finalizada la investigación sobre la inyección de agua en los motores de combustión interna continuaron desarrollándose sistemas más avanzados con los que mejorar la eficiencia de los motores y reducir sus emisiones.

En la actualidad la inyección de agua se utiliza en varias aplicaciones, desde motores en la industria automotriz hasta en motores de diésel y turbinas de gas empleados en la industria marítima y generación de energía.

Además de enfriar la cámara de combustión y prevenir una detonación temprana, la inyección de agua también es usada para reducir emisiones de óxidos de nitrógeno, conocidos comúnmente como NOx; y mejorar la eficiencia térmica a lo largo del ciclo de combustión.

En las décadas posteriores se realizaron estudios y experimentos con los que intentar comprender mejor los efectos de la inyección de agua en los motores. Los avances tecnológicos en la inyección y control del sistema permitieron que el sistema fuera más preciso y eficiente.

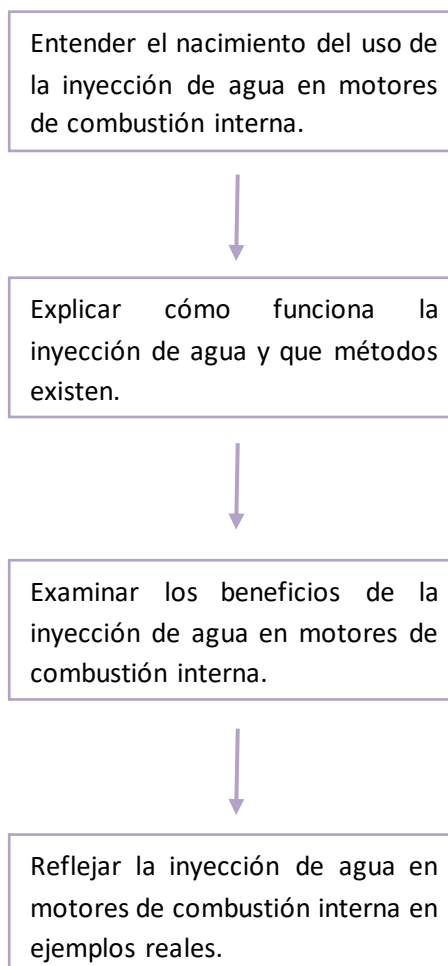
Posteriores investigadores demostraron que la inyección de agua no solo permitía prevenir la detonación de la mezcla y reducir la temperatura de la cámara de combustión, también permitía mejor la eficiencia térmica debido al aumento de la densidad del aire y la gran reducción de las emisiones de NOx, uno de los contaminantes que más producen los motores de combustión interna.

En la actualidad dicha tecnología se sigue investigando y desarrollando tanto en la industria automotriz como en el ámbito académico. Dependiendo del tipo de motor se propone distintos métodos y condiciones de operación para conseguir una mejor adaptación en cada motor. Además de emplearse en los motores de combustión interna convencionales, la inyección de agua se combina con otras tecnologías, como motores sobrealimentados para lograr mayor eficiencia y menores emisiones.

1.2 Objetivos

El objetivo general del trabajo es evaluar el potencial de la inyección de agua en motores de combustión interna para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes.

En cuanto a los objetivos específicos se analizarán las técnicas disponibles para la inyección de agua, los modelos existentes que incorporen dicha tecnología y si es posible realizar un estudio experimental así como estudiar su viabilidad técnica.



1.3 Justificación

La presente investigación se justifica por las siguientes razones:

Es un tema muy relevante hoy en día ya que es una tecnología con un gran potencial para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del transporte, lo cual hace que el interés por esta tecnología crezca y por ello se necesite de una mayor investigación para comprender mejor que beneficios aporta.

La realización de dicho trabajo fin de grado ofrece la oportunidad de realizar una investigación original y con un tema de gran interés. Con esto esperamos obtener una mejor comprensión de los beneficios además de los desafíos que van a surgir. También se podrán desarrollar nuevas estrategias para optimizar el proceso y promover esta tecnología en la industria automotriz.

En línea con los estudios cursados, este trabajo fin de grado cumple los objetivos del programa de ingeniería industrial con especialización en mecánica y automoción. Esta investigación permite desarrollar en profundidad habilidades ya trabajadas en la carrera como investigación científica, análisis de datos, simulación, etc.

Por último, se espera que los resultados de la investigación tengan un impacto positivo en el desarrollo de dicha tecnología.

Capítulo 2. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

2.1 Introducción a los motores MEC y MEP

Una de las clasificaciones más habituales para diferenciar un motor de otro es según el proceso de encendido de la mezcla de aire-combustible. Esto es muy importante ya que cada tipo de motor requiere de un diseño específico para poder funcionar.

Esta diferencia se basa en el proceso de encendido de la mezcla y en la evolución de este.

Los motores MEC (motores de encendido por compresión), también denominados los motores Diesel, funcionan con una temperatura elevada en la cámara de combustión. Se debe evitar que el combustible este mucho tiempo en contacto con el aire ya que, si no se puede provocar el conocido autoencendido, es por ello por lo que la mezcla siempre se produce lo más cerca posible del PMS (punto muerto superior). Esto es una exigencia para el sistema de inyección ya que se debe realizar la mezcla en un tiempo muy corto.

En los motores MEP (motores de encendido provocado), también denominados motores de encendido por chispa o conocidos comúnmente como motor de gasolina, para realizar el encendido en la cámara de combustión es necesario un aporte de energía que provocara la propagación de un frente de llama para impulsar el pistón. En este tipo de motor es necesario conseguir una mezcla homogénea en toda la cámara de combustion del motor para conseguir un frente de llama uniforme, esto también implica que debe estar dentro de los límites de inflamabilidad, para no provocar el autoencendido, de tal forma que el proceso de la mezcla se realiza pronto, durante la carrera de admisión.

Formación de la mezcla según el tipo de motor:

En los motores MEP lo más común es utilizar inyeccion, aunque hay algunos motores de bajo coste que siguen usando carburadores. En el método de inyección se puede usar inyeccion en el colector de admisión o inyeccion directa. Si la inyección se produce en el colector de admisión, la formación de la mezcla se realizará durante la fase de admisión y compresión.

En los motores MEC, el combustible se inyecta a alta presión justo en el final de la carrera de compresión, todo este proceso se realiza en la cámara de combustión. En este tipo de motor la inyección debe ser muy eficaz ya que se debe realizar en un tiempo muy corto y debe ser eficiente ya que se debe mezclar bien. Por ello se suele usar el movimiento del aire para realizar una buena mezcla. [6]

2.1.1 Motores MEC Y MEP en la actualidad

Los motores MEC y MEP han ido evolucionando a lo largo de los años durante los años para conseguir tres principales objetivos:

- Mejor rendimiento.
- Mayor prestación.
- Menor emisión.

En la actualidad los motores MEC se han actualizado y constan de inyección directa de combustible, 4 válvulas por cada cilindro del motor y la sobrealimentación del motor va mejorando. En este tipo de motor las emisiones de CO₂ no son muy altas, pero el problema lo tienen con las emisiones de NO_x y partículas, las cuales hoy en día se tienen que tratar según la normativa de anticontaminación para conseguir cumplirla y homologar el vehículo, sin embargo, este es un proceso costoso.

En los motores MEP al igual que en los motores MEC se opta por inyección directa y 4 válvulas por cada cilindro. En estos motores se opta también por una mayor sobrealimentación y reducir la cilindrada de motor, conocido como “Downsizing”, con esto se compensa la baja potencia a bajas revoluciones.

El problema de este tipo de motor es que el rendimiento es menor que en los MEC, al igual que el consumo específico. Por ello se ajusta la relación de compresión, sin que se produzca la auto detonación, obteniendo así un mayor rendimiento.

2.2 Tipo de inyección de agua según el tipo de motor

La inyección de agua no se usa de igual forma en todos los casos, por ello se diferencia entre los motores de encendido por compresión y los motores de encendido provocado.

2.2.1 Motor de Encendido Provocado

El objetivo de la inyección de agua en los motores de encendido provocado utilizados en el sector del transporte y de la automoción es reducir la temperatura de inflamación del combustible.

Dichos motores que funcionan con combustible de alto octanaje, sobre todo en motores de alto rendimiento, que se caracterizan por tener una velocidad lineal media elevada, se necesita encontrar un mecanismo con el que aumentar la potencia sin variar la cilindrada ya que sino el consumo del motor se elevaría penalizando también con un aumento de las emisiones.

Para este tipo de motor el método más idóneo es aquel que permita reducir la temperatura de la mezcla en mayor medida. Para conseguir este objetivo, se inyecta agua de forma directa en el cilindro. Esto resulta muy ventajoso si además se combina con otros sistemas los cuales potencien más el efecto.

Sin embargo, dicho sistema a bajos regímenes de carga no resulta igual de efectivo. Esto se debe a que en los motores MEP se trabaja con dosado estequiométrico o incluso por encima de este. Esto significa que la elevada densidad en comparación con la inyección de agua y la mayor probabilidad de que se produzcan inquemados hace que el sistema no sea rentable hasta que se haya alcanzado por lo menos un 35% del grado de carga del motor. Además, debido a que el grado de carga es importante se necesite una ECU para controlar la inyección de agua.

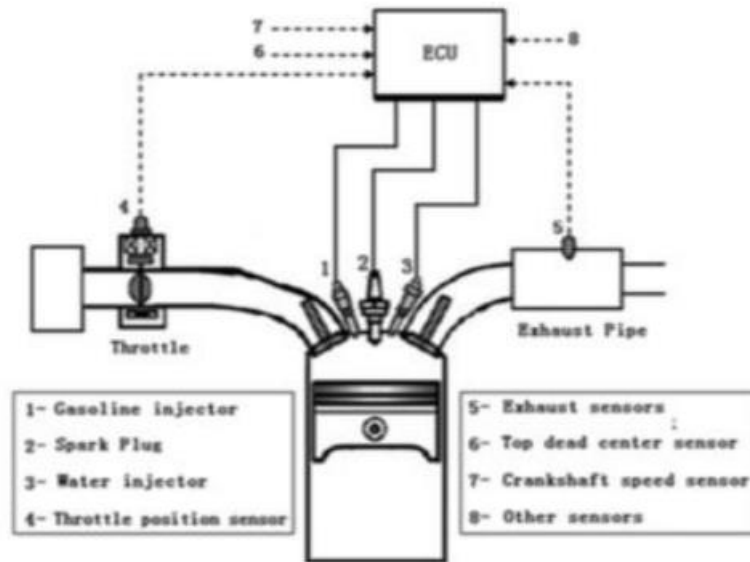
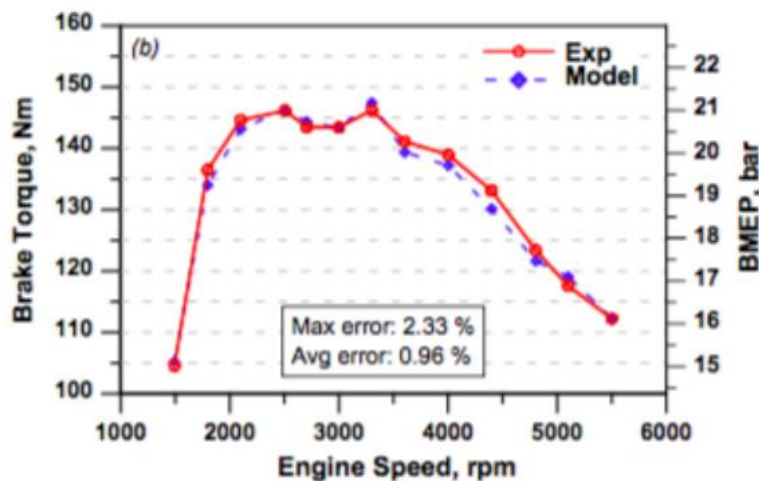


Ilustración 5: Motor MEP control de la inyección. Fuente [9]

En cuanto al par y la potencia del motor, se aprecia como en altos regímenes de giro se produce una gran mejora. Para bajos regímenes de giro sin embrago se observa como en el motor que se ha ensayado la cura es prácticamente igual. Es decir que para regímenes bajos las prestaciones no se ven afectadas, sin embargo, los consumos y temperaturas del motor si se ven afectado. Para altos regímenes de giro si se aprecia una lave mejora en las prestaciones del motor además de conservar las mismas mejoras de consumos y temperaturas que en bajos regímenes. Además, la temperatura de entrada a la turbina se reduce significativamente mejorando asi el rendimiento del ciclo además esto permite al diseñador del motor poder aumentar la relación de compresión del sistema de sobrealimentación del motor obteniendo asi una mejora significativa en las prestaciones del motor.



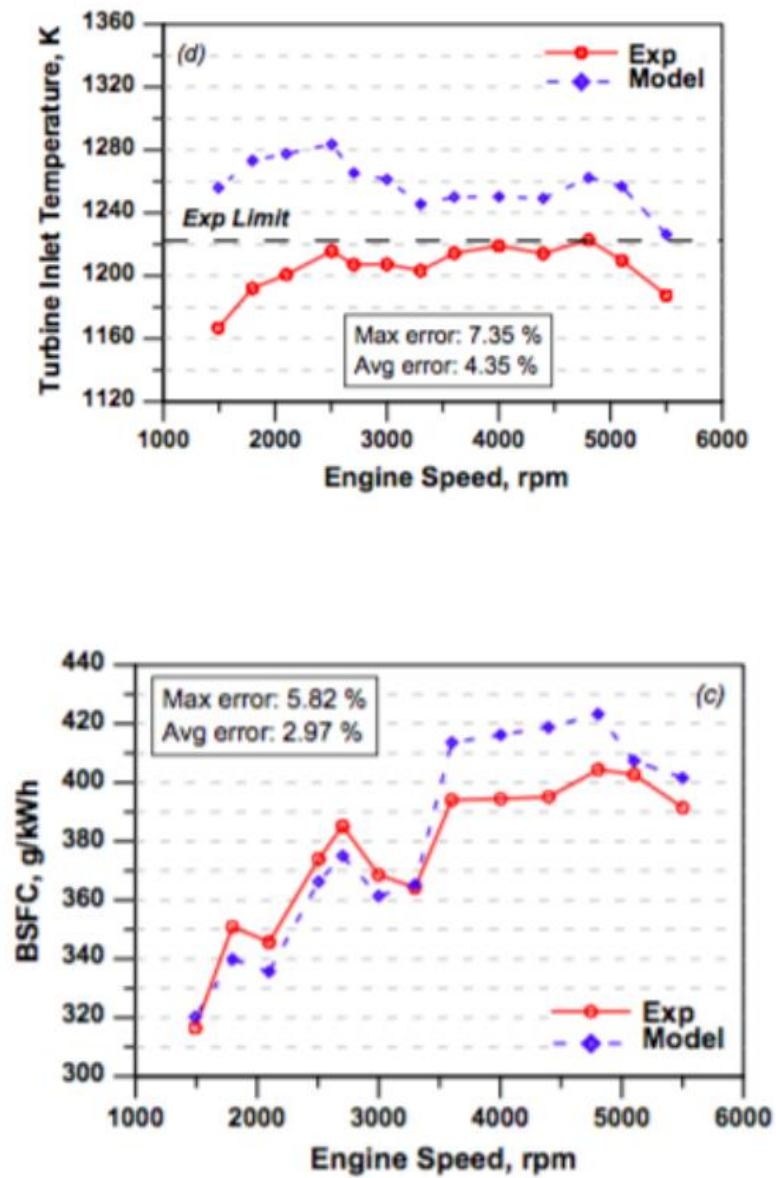


Ilustración 6: Efectos de la inyección de agua en los motores MEP. Fuente [10]

2.2.2 Motor de Encendido por Compresión

Para los motores MEC, motores que funcionan con diésel, normalmente la relación de compresión en comparación con el MEP es normalmente el doble, por esto la temperatura es más elevada a lo largo de todo el ciclo. Además, se suman las normas de anticontaminación, lo cual hace que en estos motores sea muy recomendable el uso de la inyección de agua en motores que tienen una cilindrada elevada, que son los que más emisiones de NOx producen.

En este tipo de motores con el uso de la inyección de agua se consigue reducir hasta un 70% de las emisiones de NOx y además evitar hacer el conocido como “trapping” en los catalizadores o los tratamientos posteriores de gases que perjudican las prestaciones de los motores además de encarecerlo.

El método que se usa para inyectar el agua depende sobre todo de la cantidad de emisiones de NOx que se quiera reducir, esto se debe a que cuanto más agua se inyecta en el motor menos cantidad de NOx que se emite, sin embargo, las emisiones de los inquemados aumentan significativamente.

En cuanto al par y la potencia del motor, la presión media que tiene el cilindro es muy similar en diferentes grados de carga y velocidades angulares. Sin embargo, la combinación de agua con combustible produce menos potencia momentánea que la que se obtendría solo con el diésel.

Por otra parte, la reducción de las temperaturas de los gases de escape es significativa, favoreciendo así el trabajo y la duración de los sistemas que se utilizan para tratar las emisiones en las últimas etapas. [13]

2.3 Métodos de inyección de agua

La inyección de agua en un motor consiste en inyectar agua destilada mezclada con combustible en un tiempo específico del proceso, que esta medido por el ángulo que recorre el cigüeñal respecto a la horizontal (base del cilindro) en unas condiciones específicas de temperatura y presión. Estos procesos son distintos dependiendo del tipo de motor.

Este proceso de inyección supone que se produzcan cambios en el proceso de combustión del motor, entre ellos se encuentran los siguientes:

- Disminuir la temperatura máxima que alcanzara el proceso, con lo que podremos aumentar la relación de compresión, una mejor potencia y mayor rendimiento del motor. [9]
- Al reducir la temperatura máxima se consigue reducir las emisiones de NOx de forma notable. [8]
- Permite tener un mayor control de las temperaturas y de las presiones del motor a lo largo de todo el ciclo termodinámico. [8]
- Se consigue reducir la temperatura de los gases de escape provocando principalmente dos mejoras:
 - Cuanto mayor es la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío, según Carnot, se obtiene mayor cantidad de trabajo del proceso.
 - La reducción de la temperatura de los gases de escape supone que se pueda aumentar la relación de compresión. [8]
- La recirculación de los gases de escape con una menor temperatura supone una mayor densidad, con esto obtenemos un mejor llenado y una mejor relación de aire-combustible. [9]
- En altos grados de carga y dosados ricos de combustible la disociación de los átomos de agua permite una mayor cantidad de oxígeno para oxidar el combustible. [9]
- Gracias a las bajas temperaturas que se obtienen durante el proceso con inyección de agua las pérdidas térmicas son menores y el desgaste que se produce es menor. [9]

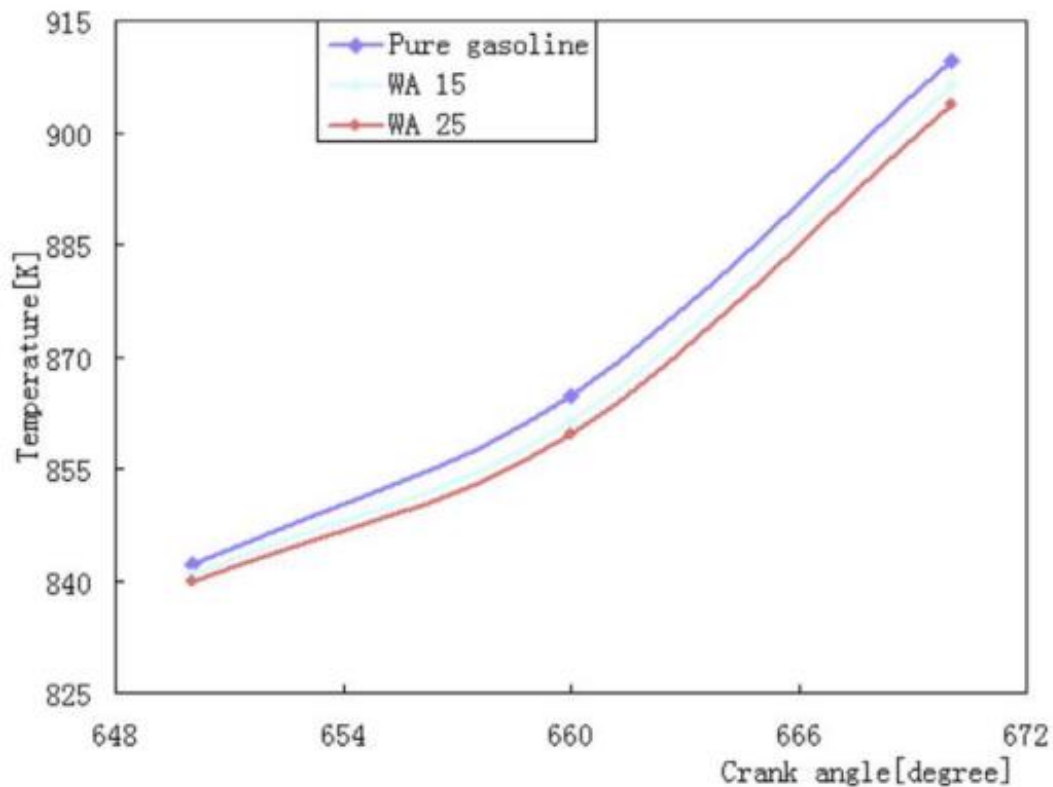


Ilustración 7: Temperatura según el porcentaje de agua inyectado. Fuente [9]

Según el método en el que se inyecte el agua en el proceso y según el momento en el que se inyecte existen diferentes tipos de inyección. Estos métodos no son excluyentes entre sí, es decir se pueden combinar y con ello aprovechar las ventajas de todos ellos. Sin embargo, cada método de inyección es apto para conseguir un objetivo u otro y dependiendo del objetivo se elegirá uno u otro.

Estos métodos se describen entre otros en los trabajos de G.Greeves. et al. [9] desde un punto de vista experimental ya que se realizaron en 1977. Estos métodos se estudian de forma independiente y en cada experimento se usa un montaje distinto para llevarlo a cabo.

2.3.1 Inyección Directa en la Cámara de Combustión

En este método se inyecta el agua directamente en la Cámara de combustión por medio de una bomba impulsora e inyectores independientes. El diametro de los inyectores de agua suele ser menor al de los inyectores de combustible los cuales trabajan a una presión de 165 Atm. Para ello se utiliza una bomba auxiliar que es accionada por el cigüeñal del motor mediante una correa y va unida al inyector por una tubería de cobre.

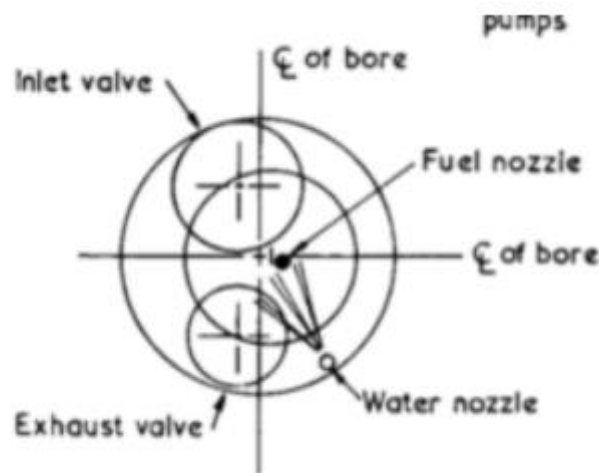


Ilustración 8: Montaje del sistema de inyección de agua directa. Fuente [8]

En los estudios de Fabio Bozza et. al. [10] el agua es inyectado directamente en la cámara de combustión en un motor de 2 cilindro con 8 válvulas. Se utiliza un controlador modula VVA para controlar las válvulas mediante un sistema electrohidráulico que tiene dos puertos de inyección, uno para cada cilindro. El agua es inyectada justo en el PMS. Además, el motor cuenta con un sistema de sobrealimentación que hace más eficiente el sistema.

En los trabajos de Mingrui et. al. [9], el sistema de inyeccion de agua cuenta con inyectores diferentes a los de combustible que se controlan con la ECU del motor. En los estudios se observa como en un motor mono cilíndrico el sistema es más eficiente si se combina con un cilindro asimétrico el cual ayuda a mejorar la turbulencia de la mezcla homogeneizando mejor la mezcla.

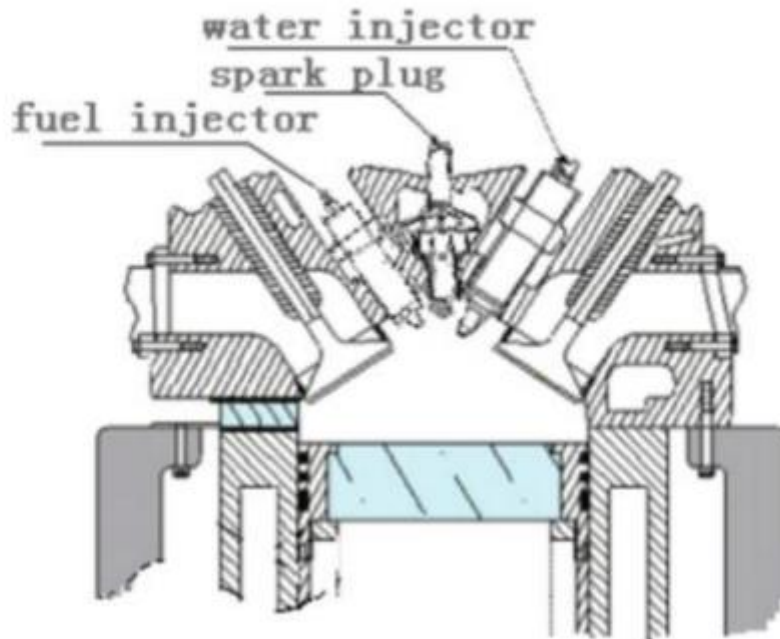


Ilustración 9: Esquema sistema de inyección directa. Fuente [9]

En los trabajos de Fabian Hoppe et. al. [12], utilizan un sistema de inyección distinto, con el cual obtienen un rendimiento mayor, para ello usan un ciclo Miller. Dicha inyección se lleva a cabo en un motor mono cilíndrico de encendido provocado que dispone de una admisión y un escape simétrico. Utilizan una relación de compresión más elevada, 13.5, mejorando así el ciclo.

Los investigadores Zhi-Jun Wu. et al. [21], emplearon combustible Oxyfuel en su sistema para lograr una mayor eficiencia. Usaron un motor MEP. Establecieron un sistema en el cual el agua que se va a inyectar previamente pasa por dos etapas de radiadores. La primera etapa se usa también para refrigerar el bloque de motor al pasar el agua por las paredes de este. En la segunda etapa se refrigeran los gases de escape. Finalmente, ese agua se inyecta en el motor a una temperatura más elevada que en los casos anteriores de tal forma que se consigue un menor efecto.

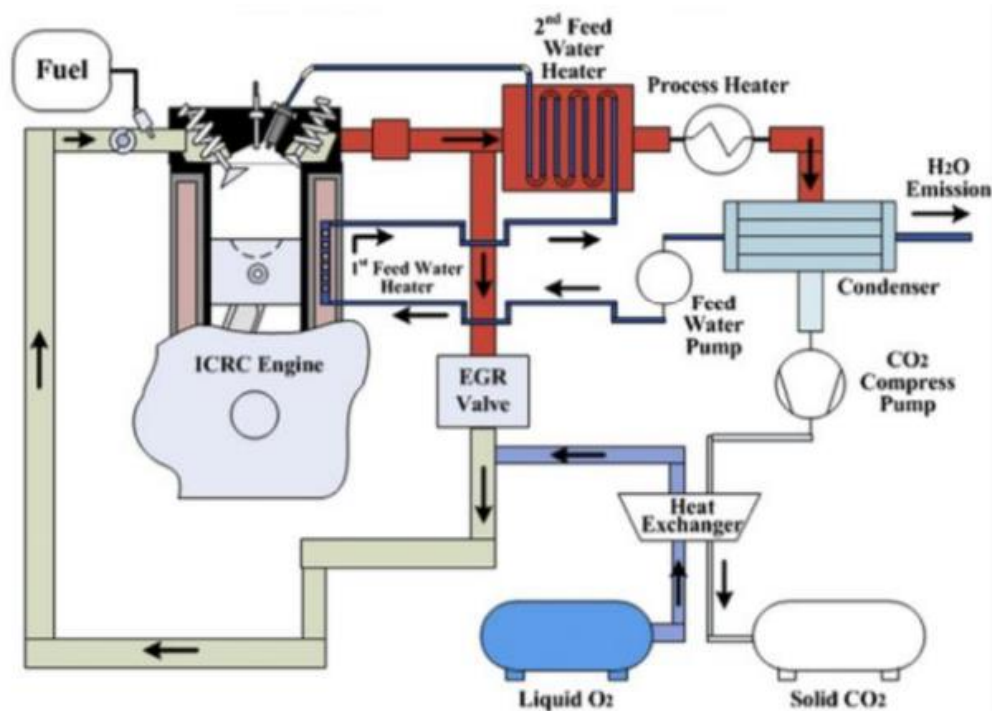


Ilustración 10: Esquema de cogeneración. Fuente [21]

En los trabajos de B. Tesfa et. al. [22] se propone usar un motor de encendido por compresión que funciona con biodiesel y emplear la inyección de agua para reducir las emisiones de NO_x. El biodiesel es uno de los combustibles que mejores prestaciones ofrece además de poder usarse en motores que no estén específicamente diseñados para ese combustible sin necesitar ningún tipo de modificación. El problema de este combustible es que alcanza unas temperaturas muy elevadas provocando una gran cantidad de óxidos de nitrógeno. Para reducir estos óxidos se usa la inyección de agua posibilitando así el uso de este combustible.

2.3.2 Inyección Directa en la Cámara de Combustion Con Mezcla de Combustible

En este método se inyecta una mezcla homogénea del combustible con el agua a través del inyector de combustible que se usa normalmente en el proceso.

Se puede inyectar por dos métodos distintos:

1. Un depósito que se encuentra antes de la cámara de combustión, donde se realiza la mezcla en la proporción que se necesita, posteriormente se bombea la mezcla a través de una tuberías de cobre hasta los inyectores que lo llevaran a la cámara de combustión.
2. Dos bombas diferentes las cuales impulsan agua y combustible de forma independiente al inyector. [8]

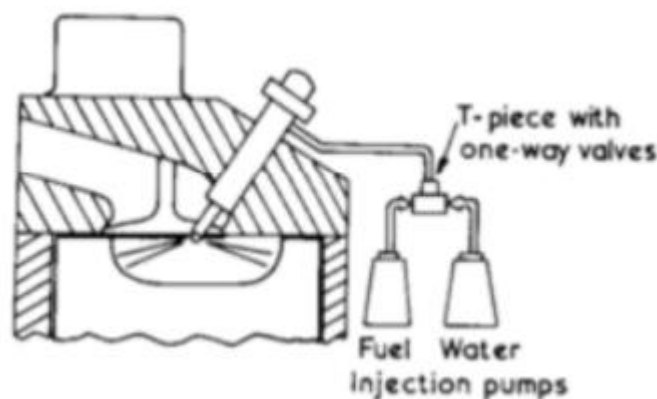


Ilustración 11: Montaje del sistema de inyección mezclada con combustible. Fuente [16]

Como solución alternativa, en los trabajos de Tesfa et. al. [22], además de la inyección de agua directa en la cámara de combustión se propone inyectar el combustible mezclado con el agua. Para conseguir una buena homogeneización de la mezcla se concluye que es necesario que el agua se mezcle con algún agente emulsificante.

Como contra, este método es un sistema que requiere de un complejo control ya que se deben controlar los caudales de ambos componentes para poder garantizar que la relación de agua y combustible es la correcta.

2.3.3 Inyección en el Colector de Admisión

En este método se inyecta el agua en el conducto de admisión de aire mediante un inyector de un diámetro elevado, alrededor de $\pm 0,5$ mm; el inyector trabaja aproximadamente a una presión de 175 atm. La inyección de agua tiene lugar en el PMI (punto muerto superior del cilindro). Con este mecanismo hay un límite en el que la mezcla no enciende si la relación de agua-combustible es elevada debido a una excesiva humedad. En los trabajos de Mingrui et. al. [9], el sistema utilizado es una bomba de agua externa que va unida a los inyectores mediante tuberías de cobre, dicha bomba va accionada por el cigüeñal del motor.

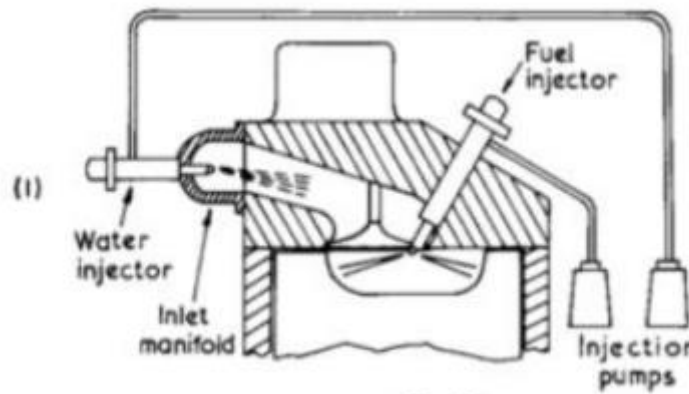


Ilustración 12: Montaje del sistema de inyección en el conducto de aire. Fuente [9]

El estudio realizado en los trabajos de E. Arabaci et. al. [23] también se estudia el proceso de inyección donde se establece que el motor de 4T pasa a ser un motor de 6T siendo el orden el siguiente:

1. Admisión
2. Inyección de Agua
3. Compresión
4. Inyección de Agua
5. Explosión
6. Escape

En los estudios que realizó Mohamed I Hassan et. al. [15] el estudio se hace sobre un motor de 2T. En este sistema se utiliza agua premezclada con el combustible. En estos motores donde la potencia específica del motor es el doble que en un motor de 4T se propone que el postratamiento de los gases se realiza mediante una EGR.

Un estudio que realizaron los investigadores Tauzia et. al. [24] sobre un motor que se utiliza en la automoción acerca de la inyección de agua.

En este estudio se define de una forma efectiva y original como conseguir la normativa EURO 6 en cuanto a contaminación se refiere ya que la normativa es especialmente dura para motores de encendidos por compresión.

Esta solución se plantea en lugar de emplear la recirculación de gases ya que este sistema presenta algún inconveniente que se puede solucionar.

El motor en el que se va a inyectar el agua es un motor diésel y se evalúa cual será el efecto que tiene la inyección de agua en la admisión del vehículo sobre:

- La capacidad que tiene el agua para refrigerar la combustión y cómo afecta en la admisión.
- Emisiones de NOx.
- Emisiones de las partículas.
- Aumenta el tiempo de retraso, los resultados que se muestran se comparan con un sistema que utiliza recirculación de gases de escape.

Datos del motor a ensayar:

Relación de compresión	18:1
Número de cilindros.	4
Numero de válvulas por cilindro	4
Cámara de combustión.	Esférica
Sistema de inyección de comb	Common Rail piezoeléctrica de 2º gen.
Máxima presión de inyección	1600bar
Agujeros de inyector.	7
Diámetro de los inyectores.	0,150 mm

Tabla 3: Datos de motor ensayado por Tauzia 1. Fuente [24]

Puntos de Funcionamiento	A	B	C	D
Velocidad de giro (rpm)	1500	1665	2050	2000
Par (N·m)	45	114	140	200
Pme (bar)	2,8	7,1	9,5	12,7

Tabla 4: Datos de motor ensayado por Tauzia 2. Fuente [24]

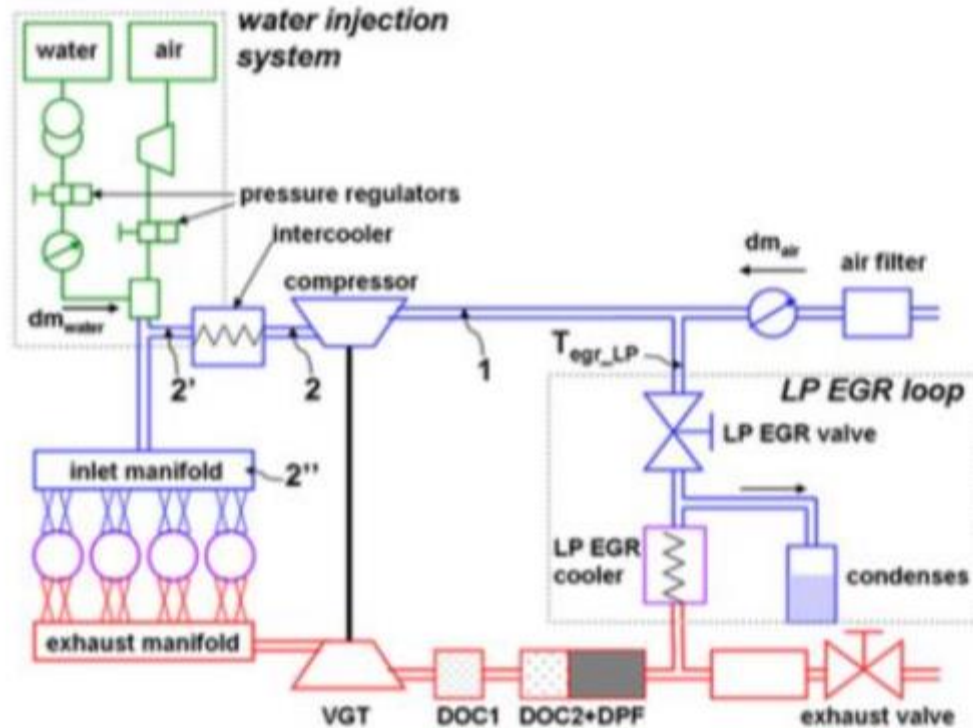


Ilustración 13: Esquema de instalación de los estudios de Tauzia. Fuente [24]

Los resultados representados en los estudios son:

- Gran mejoría en las emisiones de NOx, las cuales mejoran de forma lineal, es decir, a mayor cantidad de agua, menores son las emisiones de NOx. Con esto se consigue mejorar los resultados del sistema de EGR.
- Cuando los grados de carga son bajos, el sistema EGR presenta un mejor comportamiento con las emisiones de partículas, sin embargo, cuando los grados de carga son mayores los resultados de la EGR son muy inferiores.
- Disminuye la temperatura del conducto de admisión lo que significa una mayor densidad.
- Las pérdidas de calor a través de las paredes del motor son mayores, esto puede provocar una pérdida del rendimiento.
- El tiempo de retraso aumenta cuando la cantidad de agua inyectada es elevada, esto puede provocar que la mezcla no encienda.

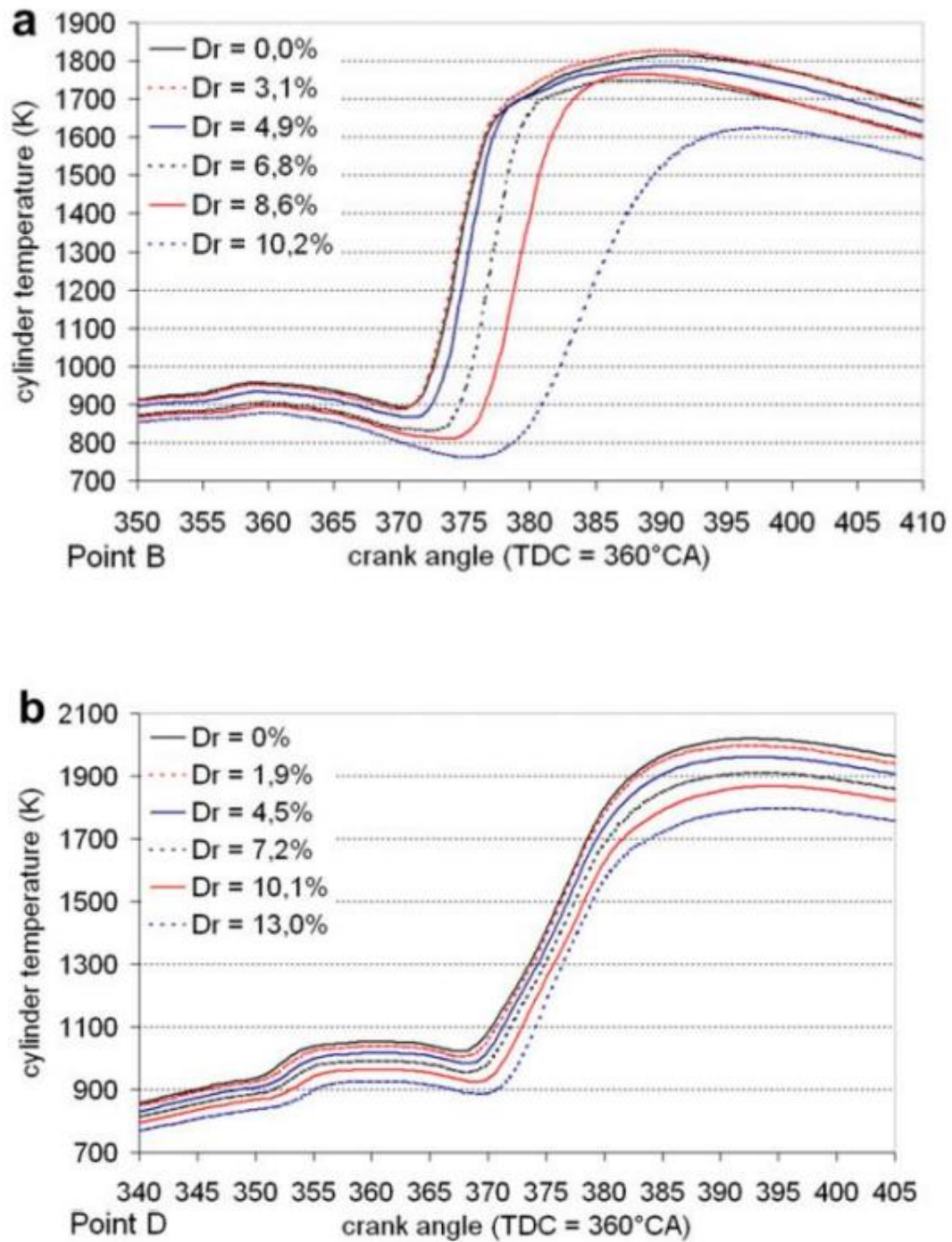


Ilustración 14: Temperatura en el cilindro según el porcentaje de agua en diferentes puntos. Fuente [24]

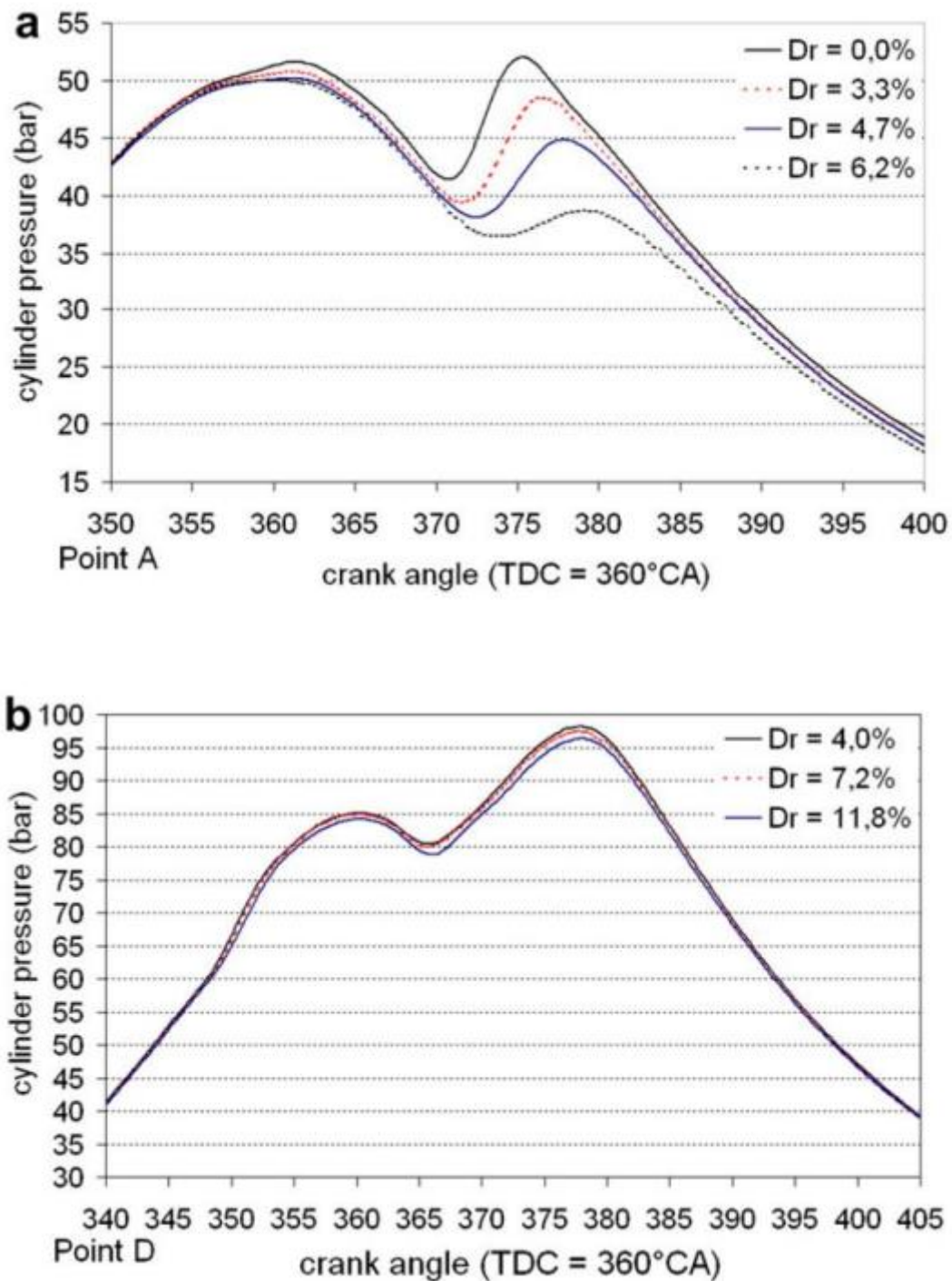


Ilustración 15: Presión en el cilindro según el porcentaje de agua en diferentes puntos. Fuente [24]

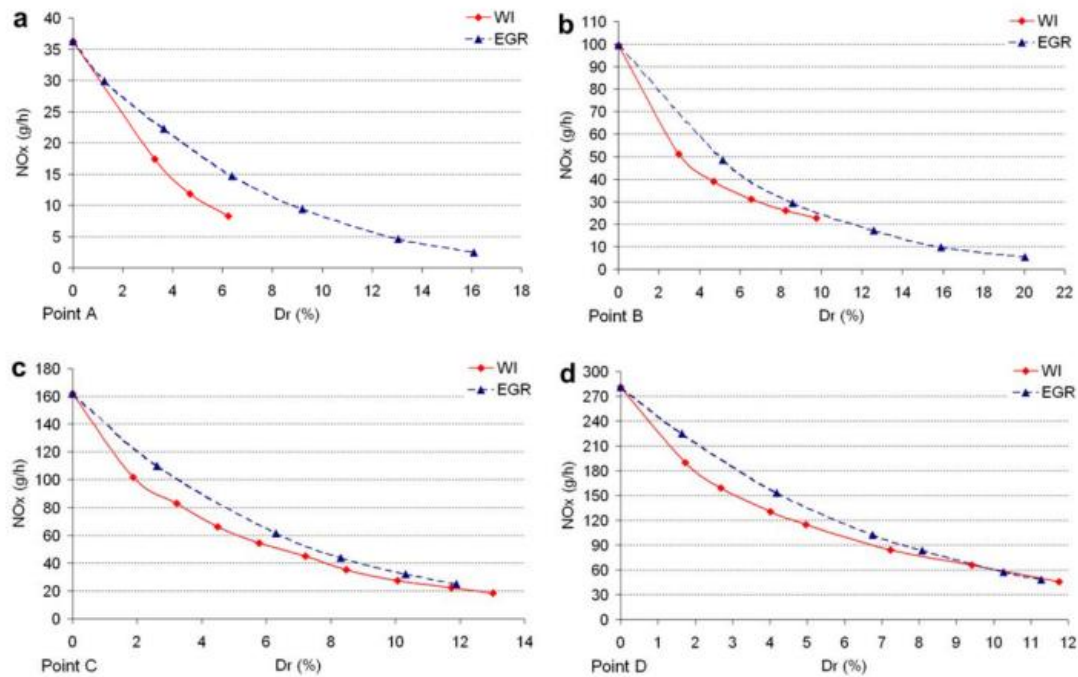


Ilustración 16: Emisiones de NOx en los diferentes puntos. Fuente [24]

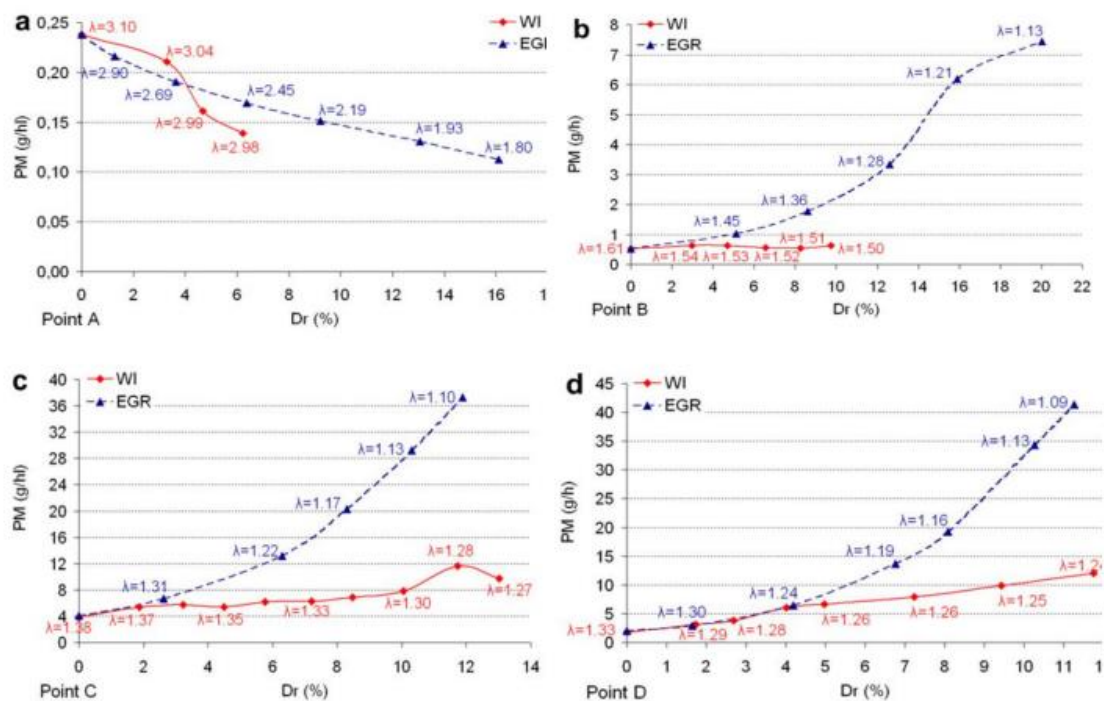


Ilustración 17: Emisiones de partículas en los diferentes puntos. Fuente [25]

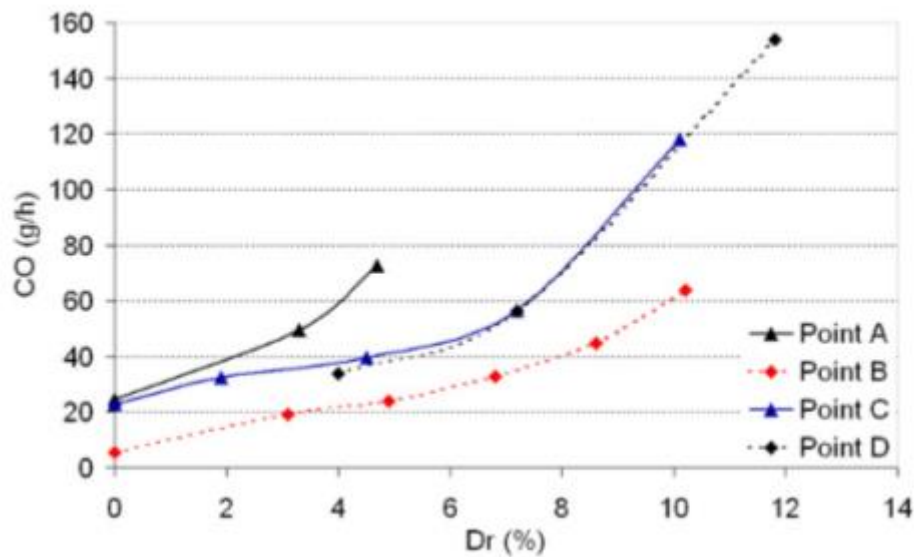


Ilustración 18: Emisiones de CO en los diferentes puntos. Fuente [24]

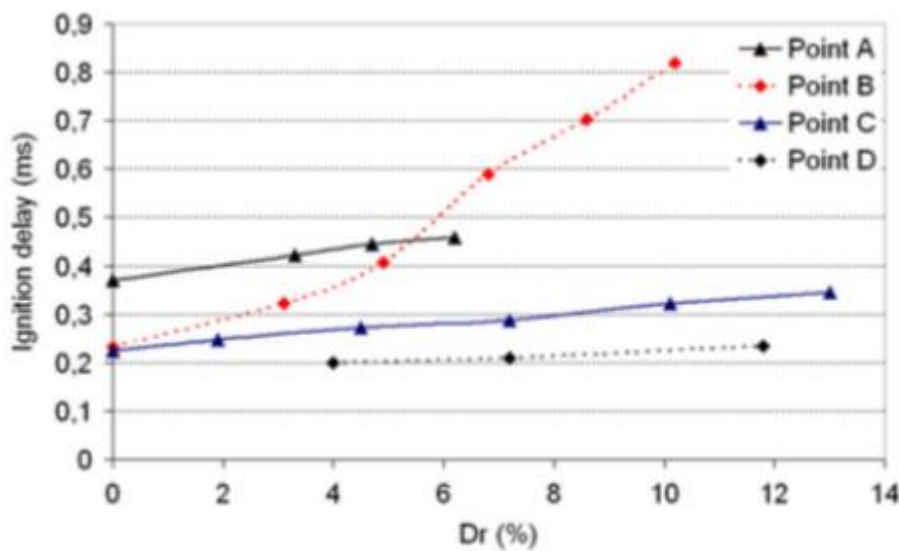


Ilustración 19: Tiempo de retraso en los diferentes puntos. Fuente [24]

En los estudios de Xiaokang Ma et. al. [25] se define como una de las formas más efectivas en el control de la temperatura de combustión y las emisiones de NOx el uso de inyección de agua en el conducto de admisión.

De la misma forma los resultados muestran cómo se produce una reducción en la presión media del cilindro, además el tiempo de retraso se incrementa.

Las emisiones de NOx se reducen de forma lineal respecto a la cantidad de agua que se inyecta, las emisiones de las partículas también se pueden reducir debido al incremento de la temperatura, pero a partir de una cantidad específica estas crecen de forma exponencial.

Características del motor que se va a estudiar:

Diámetro X Carrera	132x145	Relación de compresión	0:00
Revoluciones	2100	Potencia (kW)	300

Tabla 5: Datos de motor ensayado por Xiaokang. Fuente [25]

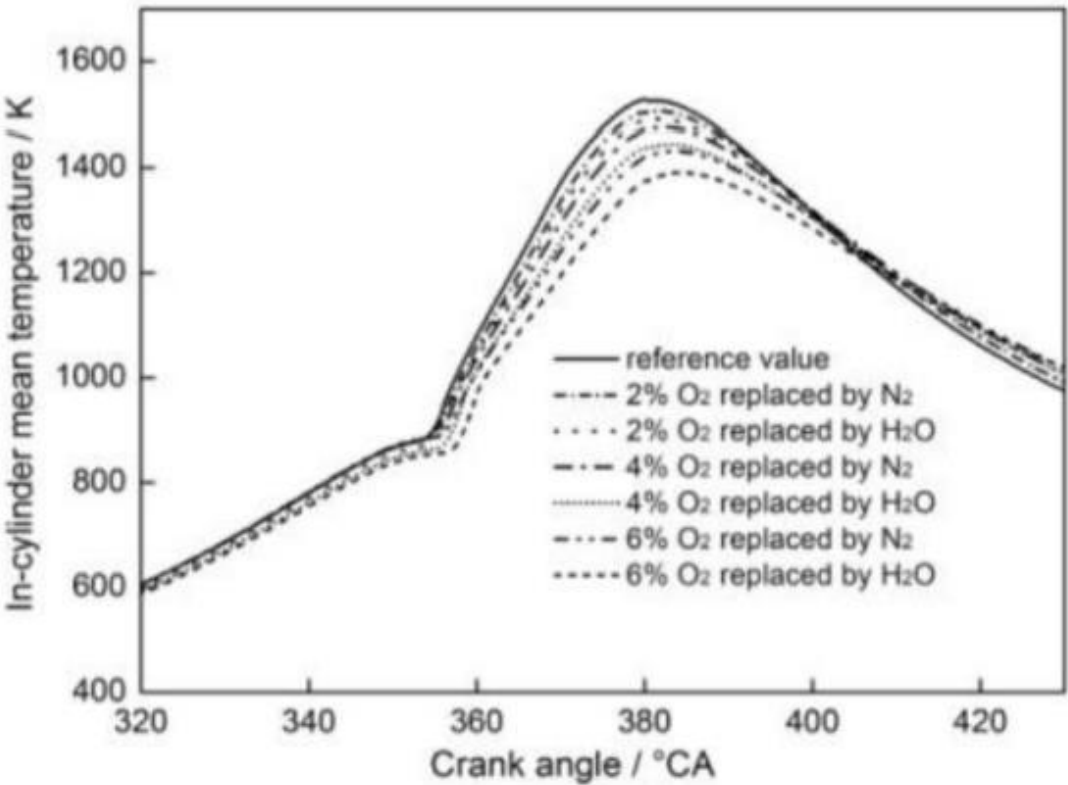


Ilustración 20: Temperatura del cilindro en función del O2 reemplazado. Fuente [25]

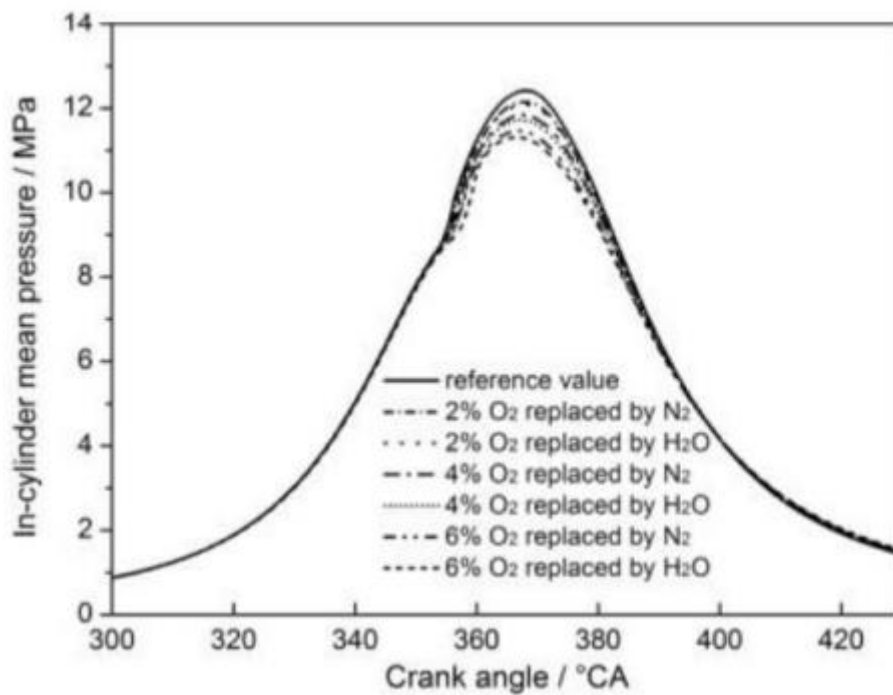


Ilustración 21: Presión del cilindro en función del O₂ reemplazado. Fuente [25]

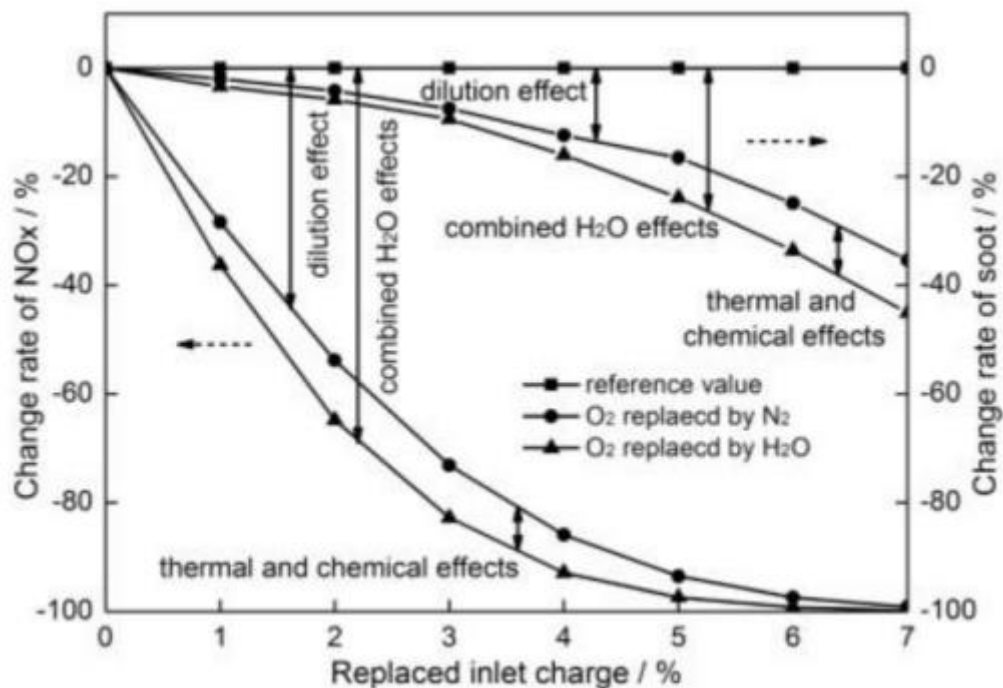


Ilustración 22: Disminución del NO_x en función de la composición de la mezcla. Fuente [25]

Debido a la disminución del estado térmico del ciclo de combustión se produce una disminución de las emisiones de NO_x de forma muy efectiva llegando incluso a valores del 100%.

2.3.4 Inyección de Agua en el Escape

Con la inyección de agua en el colector de escape se busca solucionar las desventajas de los sistemas anteriores.

Con este método se busca utilizar los gases de escape y la entalpía de la vaporización del agua de tal forma que se puedan reducir las emisiones de NO_x, además de la temperatura de combustión (T_{max}), esto es muy útil en motores de combustión por compresión.

En este sistema el agua se inyecta en la cámara de combustión a través del colector de escape utilizando un inyector de alta presión. Cuando se abre la válvula de escape, recirculan los gases de escape y se mezclan con el aire frío del colector de admisión.

El objetivo de esto es intentar reducir la vaporización del agua en la cámara de combustión y reducir la temperatura de este vapor durante el proceso de combustión.

Para ello en los trabajos de Bozza et. Al. [10] utilizan un inyector de agua en el colector de escape direccionado hacia la cámara de combustión además de una bomba de alta presión que es accionada por el cigüeñal.

Además, para esto las válvulas deben de abrirse y cerrarse de forma independiente

La ventaja de este proceso, según los estudios de Bozza et. al. [10], es la posibilidad de poder regular de forma más sencilla la temperatura en la cámara de combustión maximizando así el efecto que tiene en el proceso.

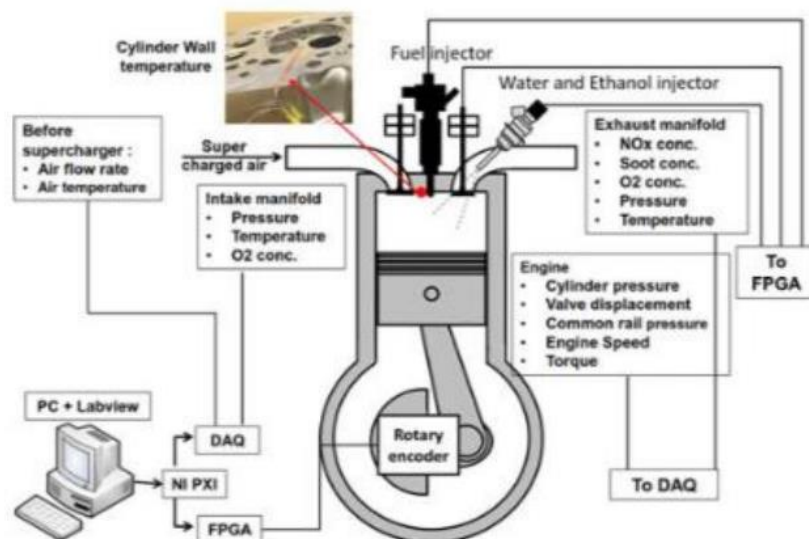


Ilustración 23: Montaje del sistema de inyección en el conducto de escape. Fuente [17]

Para obtener el mayor rendimiento hay que combinar dos variables de forma correcta, estas son: El tiempo de inyección (para regular la cantidad de agua que entra en la cámara de combustión) y el instante en el que se inicia la inyección.

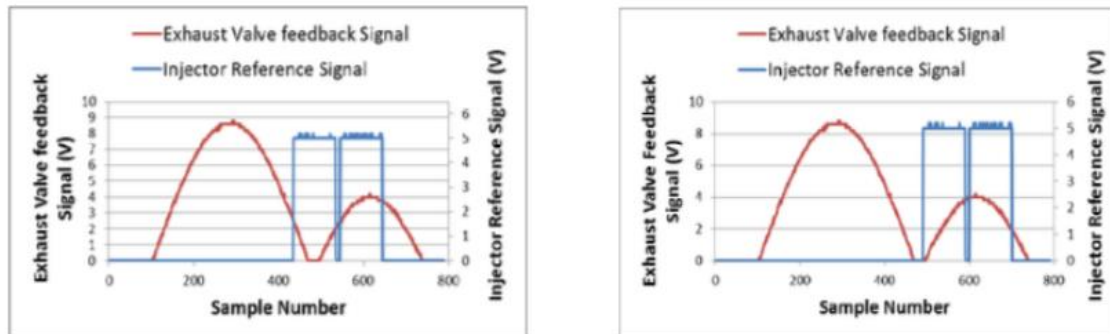


Ilustración 24: Control del inyector de agua y la válvula de escape. Fuente [17]

Además, como aplicación adicional, la inyección de agua se utiliza para potenciar el ciclo Rankine que ocurre debido a los gases de escape del motor.

En los estudios de Zhi-Jun Wu et. al. [21] se propone introducir el sistema de inyección de agua en un motor de un solo cilindro de encendido provocado que usa propano como combustible.

Para que no se produzca condensación en la turbina se proponen distintos valores de inyección de agua en estos estudios. Esto se hace sin afectar a la temperatura de estos gases, es decir conseguir que los gases mantengan una temperatura baja para una mayor densidad y con ello conseguir que la sobrealimentación sea mejor.

2.4 Comparación de los métodos de inyección de agua

En los trabajos de G.Greves et. al. [8] se describen dichos métodos y se comparan de forma menos práctica y más teórica.

El motor estudiado en las tres primeras pruebas tiene las siguientes especificaciones:

Motor diésel

- Masa de 0,83 g de combustible por cilindro y ciclo.
- Motor trabajando a 2000 revoluciones por minuto y grado de carga 1.
- Angulo de inyección adelantado 20 grados después del PMS (punto muerto superior), este valor es muy común para conseguir un buen ahorro de batería.

2.4.1 Inyección directa en la admisión de aire

En el estudio se aprecia una reducción de las emisiones NOx. Para una relación de 0,5 según se va aumentando el cociente de agua/combustible, el motor reduce las emisiones de NOx en un 30%.

También podemos observar que las emisiones de CO, de cenizas e incluso de las emisiones de HC aumentan un poco. Esto es debido a que el agua hace que se retrase el punto de encendido del combustible, esto es más acusado en los motores tipo MEC. Es decir, parte del combustible queda sin reaccionar. La obtención de estos inquemados aumenta el consumo específico del motor [8].

Este problema es fácil de solucionar, se aumenta la relación de compresión del motor o del sistema de sobre alimentación. En los estudios de Mohamed I. Hassan et. al. [15], en un motor de 2T, se observa una reducción importante de la temperatura de combustión como se puede observar en la siguiente imagen.

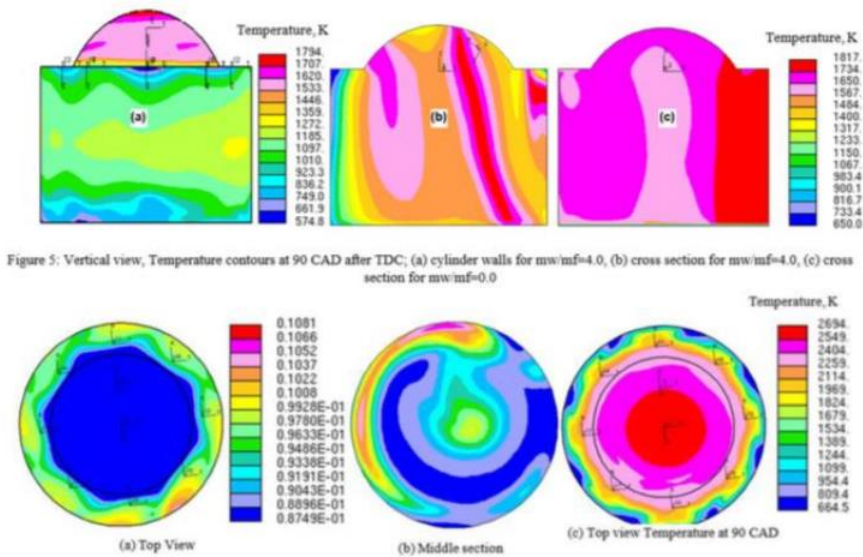


Ilustración 25: Comparación de la distribución de la temperatura en un motor 2T en función del uso o no de inyección de agua. Fuente [15]

2.4.2 Inyección directa en la cámara de combustión

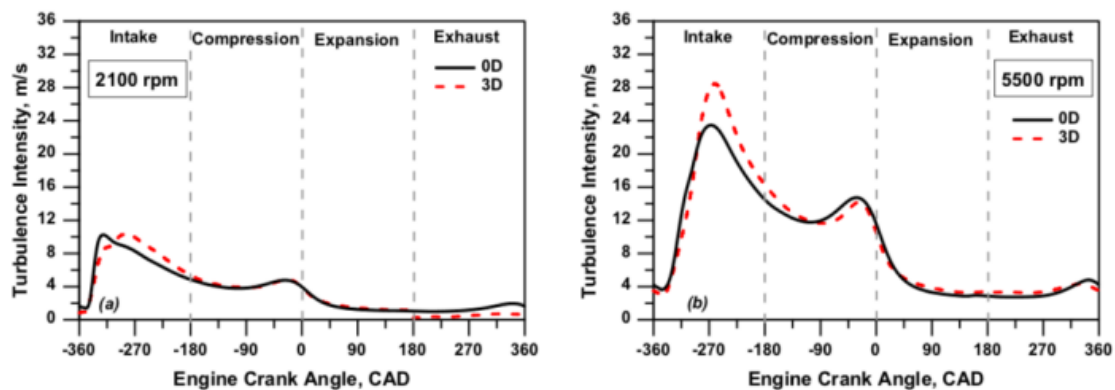
Con este método de inyección de agua se ha conseguido reducir notoriamente las emisiones de NO_x, sin embargo, las emisiones de cenizas y CO ha aumentado, a cuanto mayor índice de agua, mayor es la emisión de estos. [8]

La ventaja de emplear este sistema es que permite controlar el tiempo de inyección de agua además de poder variar el instante del comienzo de la inyección.

En los estudios de Fabio Bozza [10] se establece la mejoría del uso de la inyección de agua directamente en la cámara de combustión para prevenir la autoinflamación gracias a la gran reducción de la temperatura.

En el estudio se han llegado a las siguientes conclusiones:

- La autoinflamación es un fenómeno que ocurre cuando el combustible combustiona de manera espontánea debido a la temperaturas y presiones que se alcanzan en la cámara de combustión
- Una buena inyección de agua combinado con un buen diseño del pistón favorece a aumentar la turbulencia de la mezcla en la cámara de combustión y conseguir una mejor homogeneización.



2.4.3 Inyeccion directa en la cámara de combustion mezclado con combustible

El ensayo en el que se inyecta agua combinada con el combustible se obtiene a raíz del método en el que se inyecta agua por dos inyectores distintos impulsado por dos bombas diferenciadas que se unen con una válvula en T, la cual une la línea de combustible con la de agua.

En este método no se puede diferenciar el tiempo de inyección de agua con el de combustible, es decir ambos son inyectados en el mismo instante.

Con este método es con el que mayor reducción de emisiones de NOx se consigue con respecto al resto de métodos que se han estudiado. Además de reducir notablemente dichas emisiones reduce también las emisiones de CO y de las cenizas. Según se aumenta el cociente de agua-combustible, la auto detonación se retrasa de forma más rápida. Existe un punto en el que si se inyecta una cantidad de agua dependiendo del cubicaje de cada motor este no permite el encendido llegando a pararse.

Para solucionar este problema se aumenta la relación de compresión del motor o del sistema de sobrealimentación si existiese.

Como se ha comprobado a mayor cociente de agua-combustible menores son las emisiones de NOx, pero al contrario mayores son las emisiones de CO y cenizas. Sin embargo en este modelo se aprecia que todas las emisiones mejoran con el uso de la inyección de agua, pese a que este fenómeno no está completamente estudiado se supone que se producen unas micro explosiones en la cámara de combustión que provoca una turbulencia mayor la cual permite que la mezcla sea más homogénea mejorando así la combustión. [8]

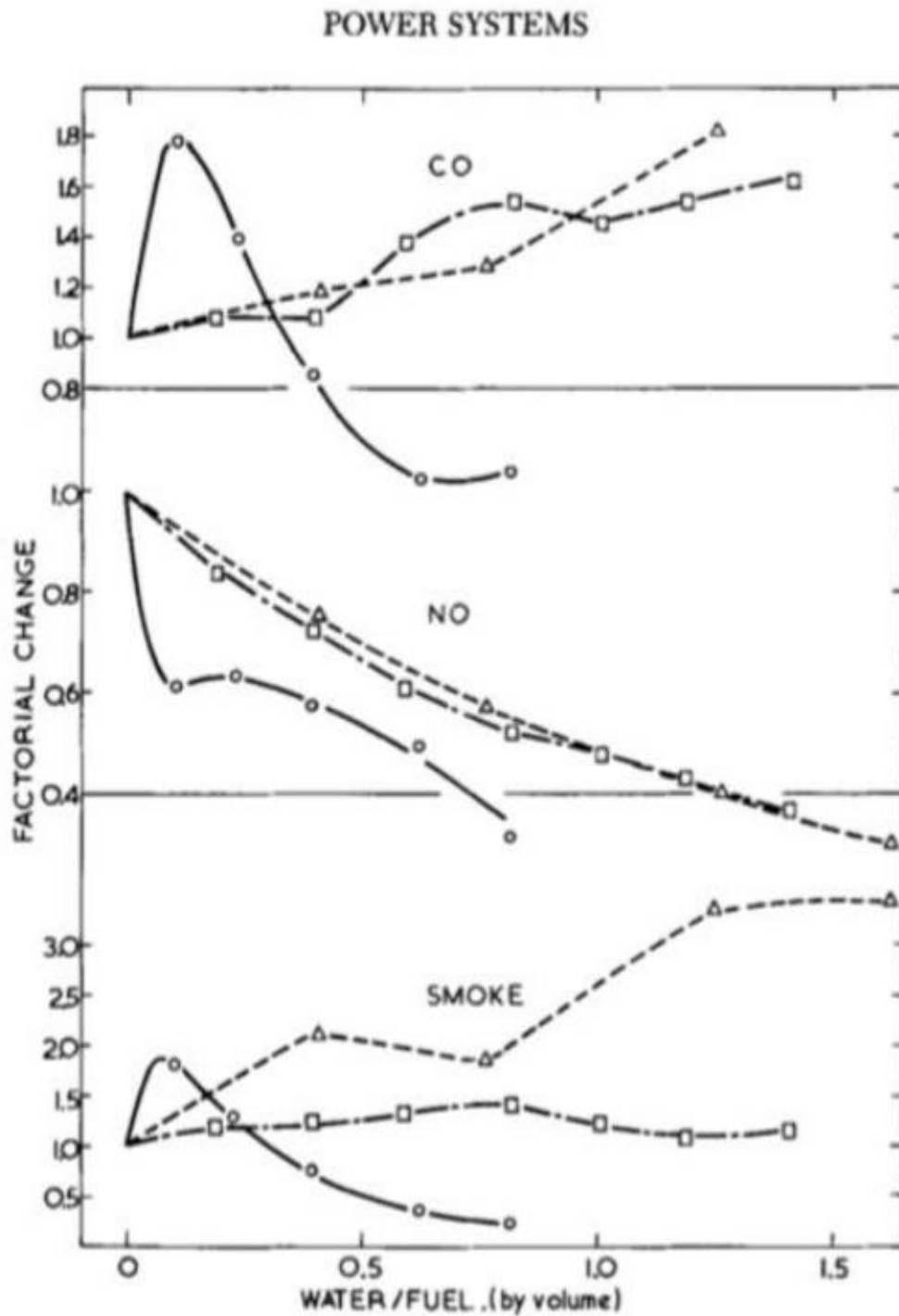


Ilustración 27: Comparación de los métodos de inyección directa, mezclada con combustible y en el conducto de admisión. Fuente [8]

Los trazos con círculos corresponden a inyección directa mezclada con agua.

Los trazos con rectángulos corresponden a inyección en el conducto de admisión.

Los trazos con triángulos corresponden a inyección directa el cilindro.

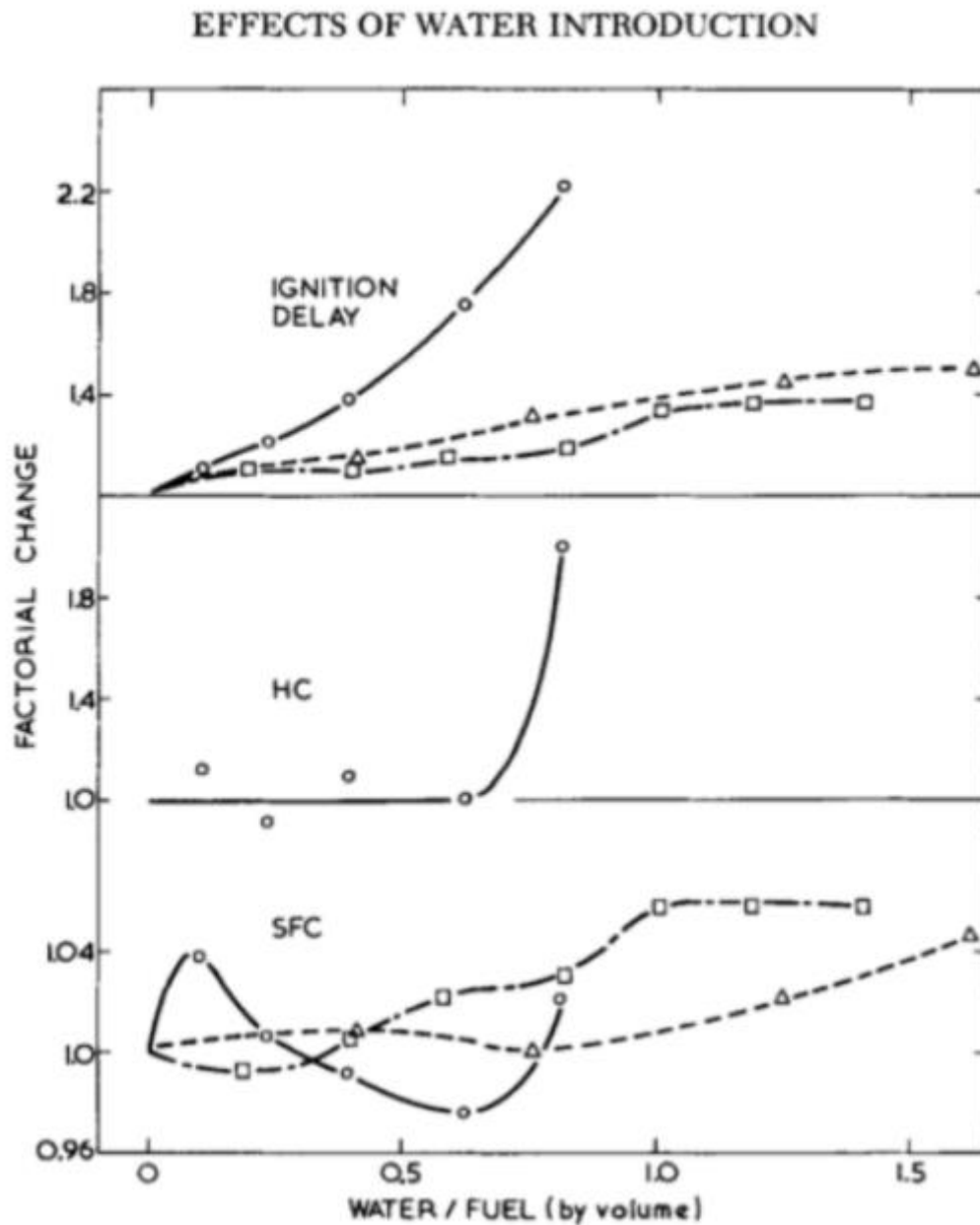


Ilustración 28: Comparación de los métodos de inyección directa, mezclada con combustible y en el conducto de admisión. Fuente [8]

Los trazos con círculos corresponden a inyección directa mezclada con agua.

Los trazos con rectángulos corresponden a inyección en el conducto de admisión.

Los trazos con triángulos corresponden a inyección directa el cilindro.

Para el motor que se ensaya en los trabajos de B.Tesfa [22] se pueden obtener las siguientes gráficas.

Este motor, es un motor de encendido por compresión con las siguientes características:

Motor

<i>Numero de Cilindros</i>	4
<i>Tipo de motor</i>	4T
<i>Aspiración</i>	Sobrealimentado.
<i>Numero de Válvulas 6</i>	16
<i>Potencia</i>	72KW

Tabla 6: Datos de motor ensayado por B.Tesfa. Fuente [22]

En las siguientes imágenes se observa el ensayo realizado, se puede apreciar como la presión máxima y la presión del PMI se mantienen constantes independientemente de cuánta agua sea inyectada, aunque siempre se mantenga por debajo del valor original.

Se aprecia como la pérdida de calor es menor, consiguiendo un motor más adiabático y manteniendo una temperatura máxima más inferior.

Esto tiene una consecuencia directa en las emisiones de NOx, las cuales disminuyen al instante. Esto ocurre a cualquier régimen de giro y a cualquier carga del motor, además a mayor caudal menor emisión de NOx se produce.

Sin embargo, esto implica que el consumo sea mayor si la cantidad de agua inyectada aumenta en gran proporción, sobre todo a regímenes bajos, produciendo inquemados, lo que eleva el consumo específico.

Por último, el rendimiento mejor si los inquemados son prácticamente nulos, algo que sucede cuando se trata de bajas revoluciones o bajas grados de carga.

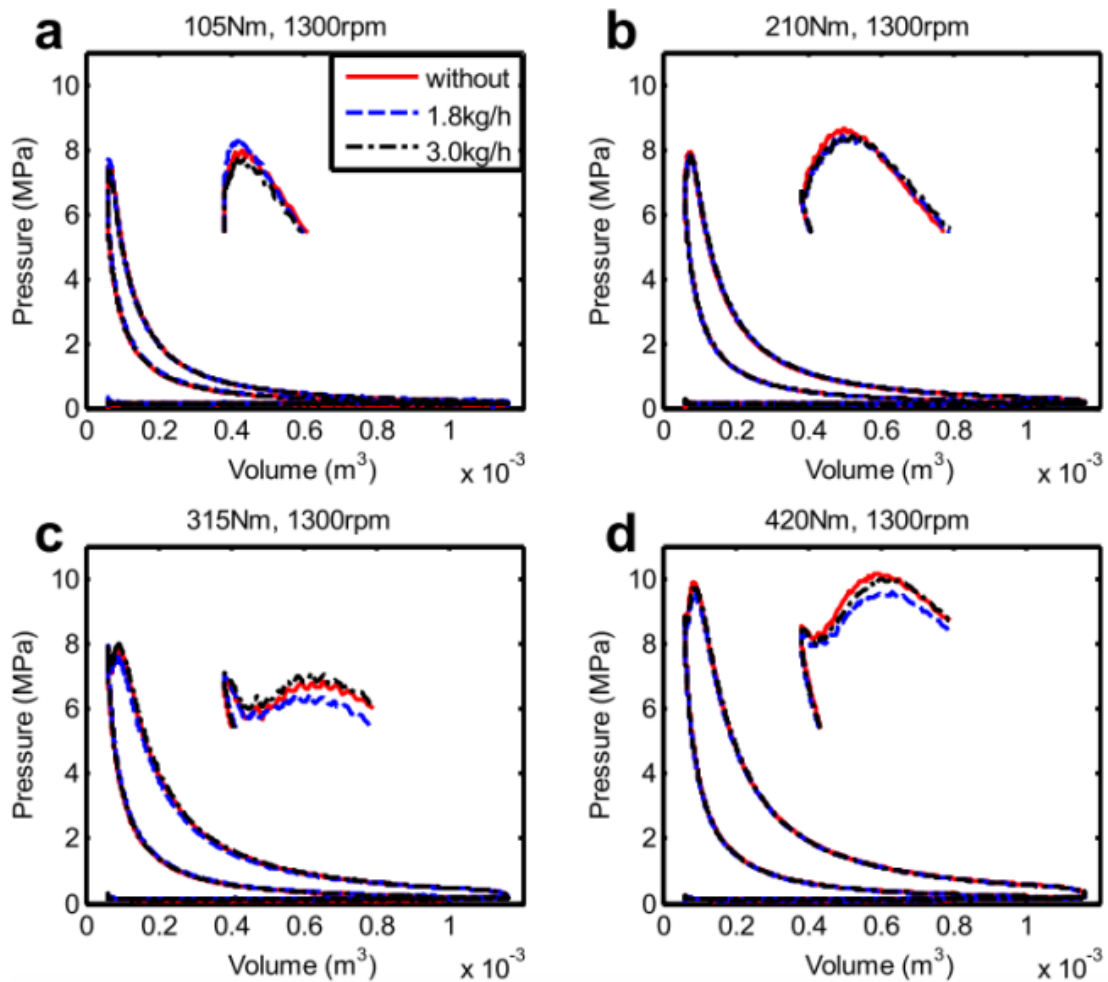


Ilustración 29: Diagrama P-V para varios puntos de funcionamiento según el caudal de agua. Fuente [22]

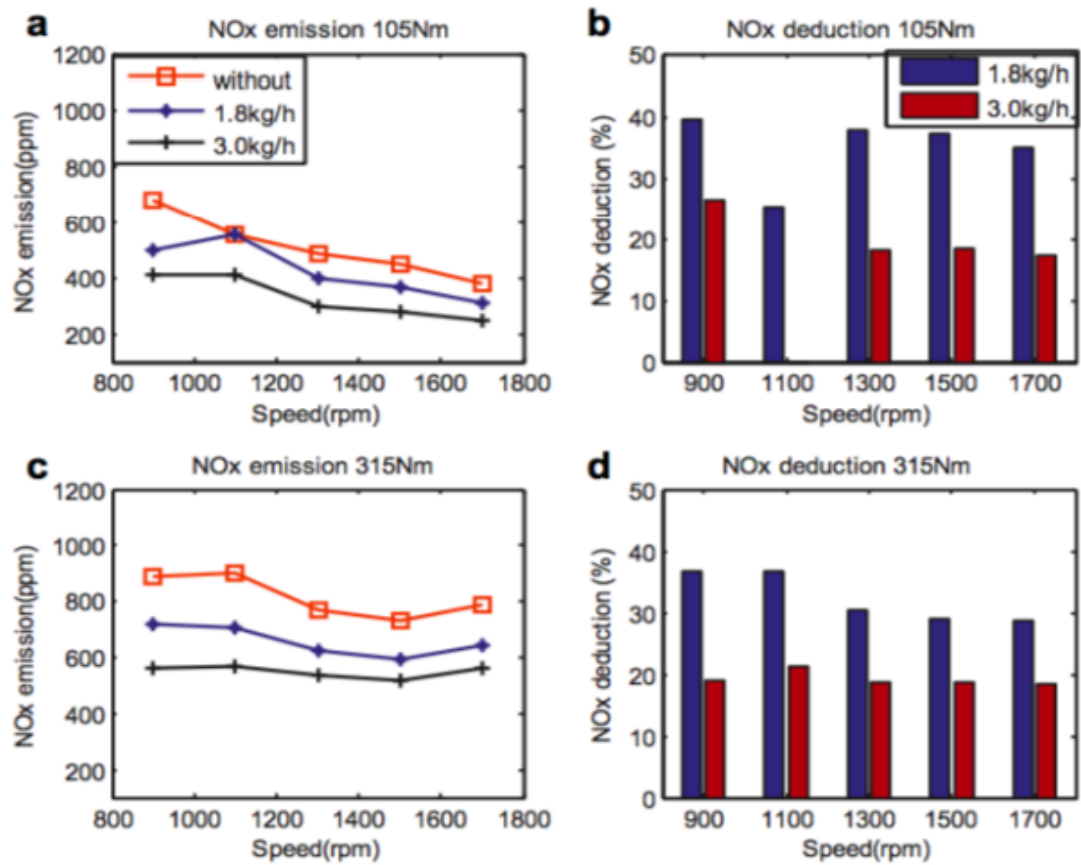


Ilustración 30: Disminución del NOx en función del caudal de agua. Fuente [22]

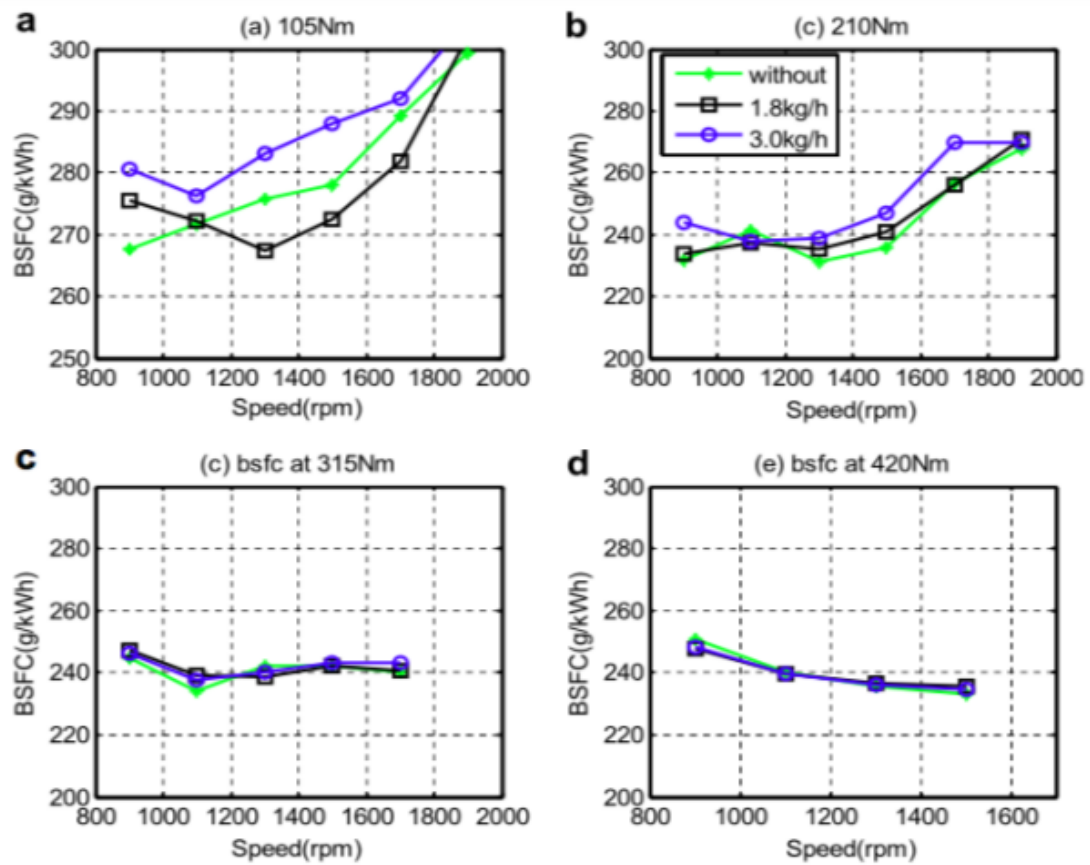


Ilustración 31: Evolución del consumo para distintos puntos de carga y distintos caudales de agua. Fuente [22]

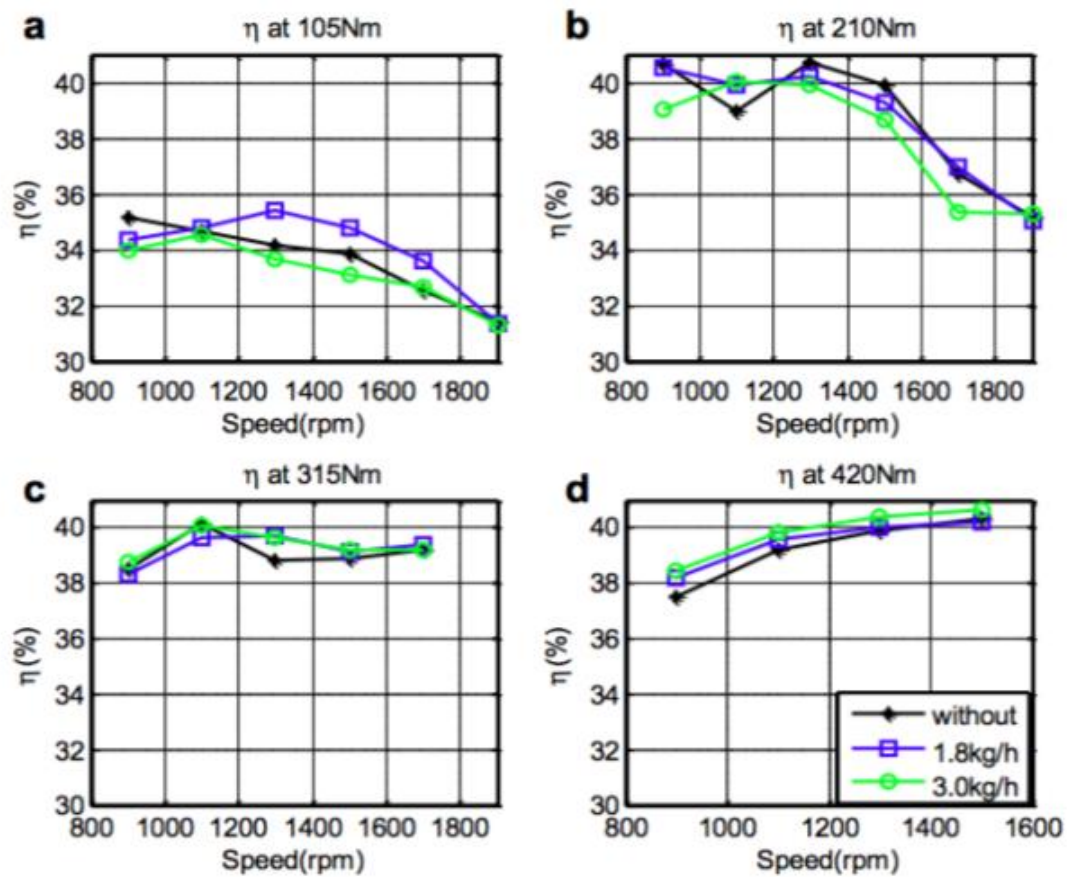


Ilustración 32: Evolución del rendimiento para distintos puntos de carga y distintos caudales de agua. Fuente [22]

2.4.4 Combinación con sistema EGR

Este método se va a detallar empleando los estudios de Mingrui et. al. [9] donde se ensayará un motor de gasolina, es decir de encendido provocado, ya que este método es ideal para este tipo de motor, especialmente en aquellos de alto rendimiento.

Características del motor sobre el que se ensaya el método:

- Motor de encendido provocado de 4 cilindros con inyección directa del fabricante Ford.
- Relación de compresión: 13:1.
- Revoluciones del motor entre 2000 y 3000.
- Tiempo de inyección: desde 640° hasta 650°.

El fundamento en el que se basa combinar ambos efectos reside en que el alto calor de vaporización que necesita el agua se aprovecha para disminuir la temperatura de la mezcla y por tanto la cámara de combustión.

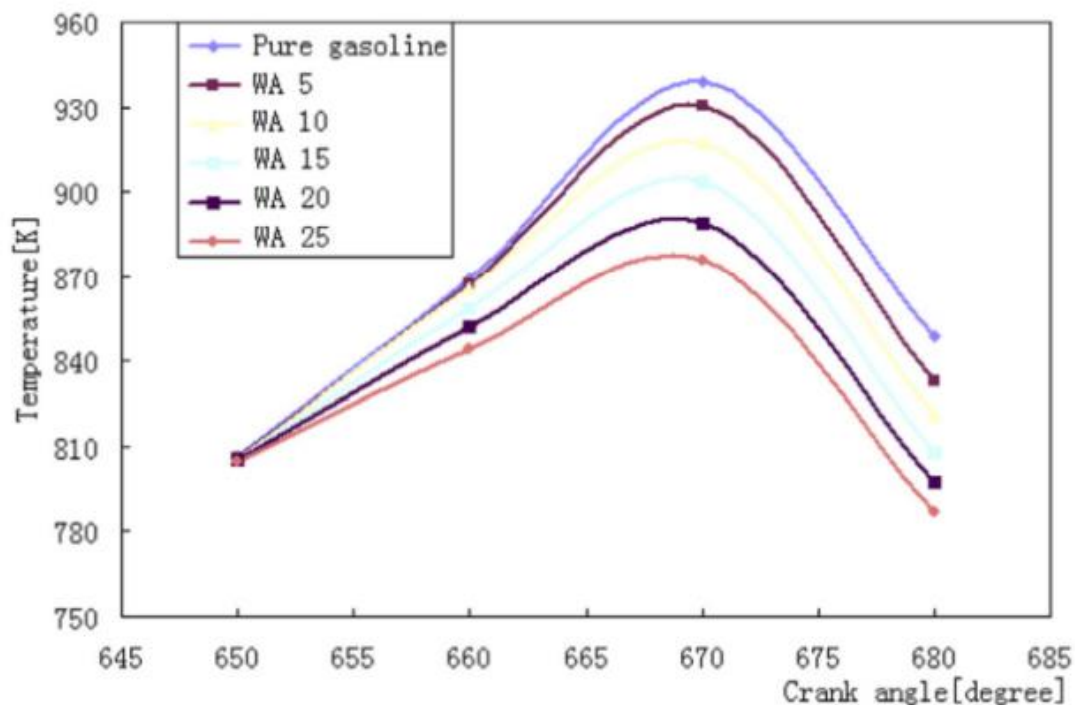


Ilustración 33: Temperatura en el interior del cilindro a lo largo de la carrera del pistón en función del agua inyectada. Fuente [9]

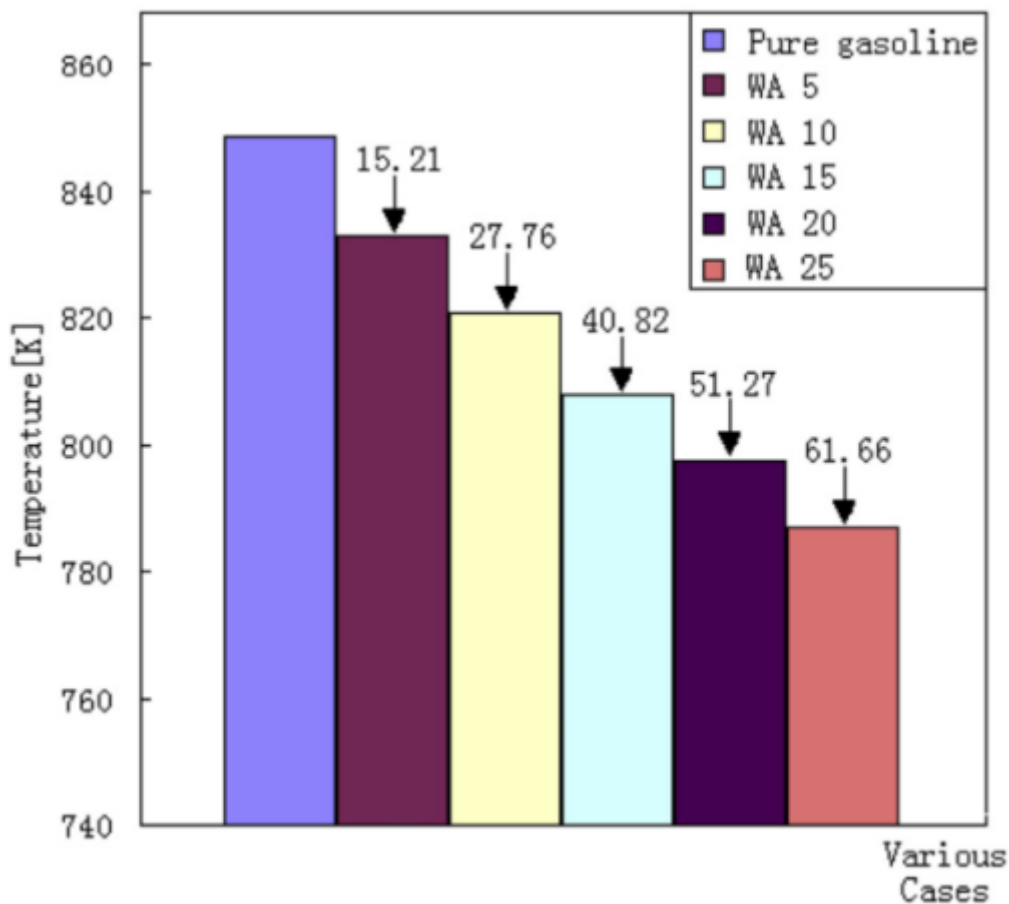


Ilustración 34: Temperaturas máximas en el interior del cilindro en función del agua inyectada. Fuente [9]

El agua se inyecta en el conducto de admisión después de haber pasado por el sistema de sobre alimentación del coche, siempre y cuando cuente con ese sistema, y se combina con los gases de escape, los cuales tienen una elevada temperatura. Con esto se consigue reducir la temperatura de los gases ya que al combinarse el agua roba calor de la mezcla consiguiendo un aire más fresco y de mayor densidad.

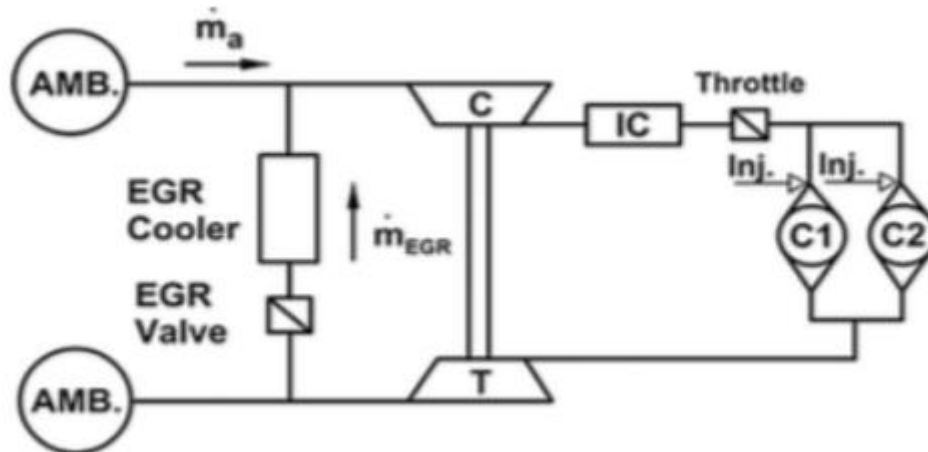


Ilustración 35: Esquema de sistema de inyección en un motor sobrealimentado. Fuente [10]

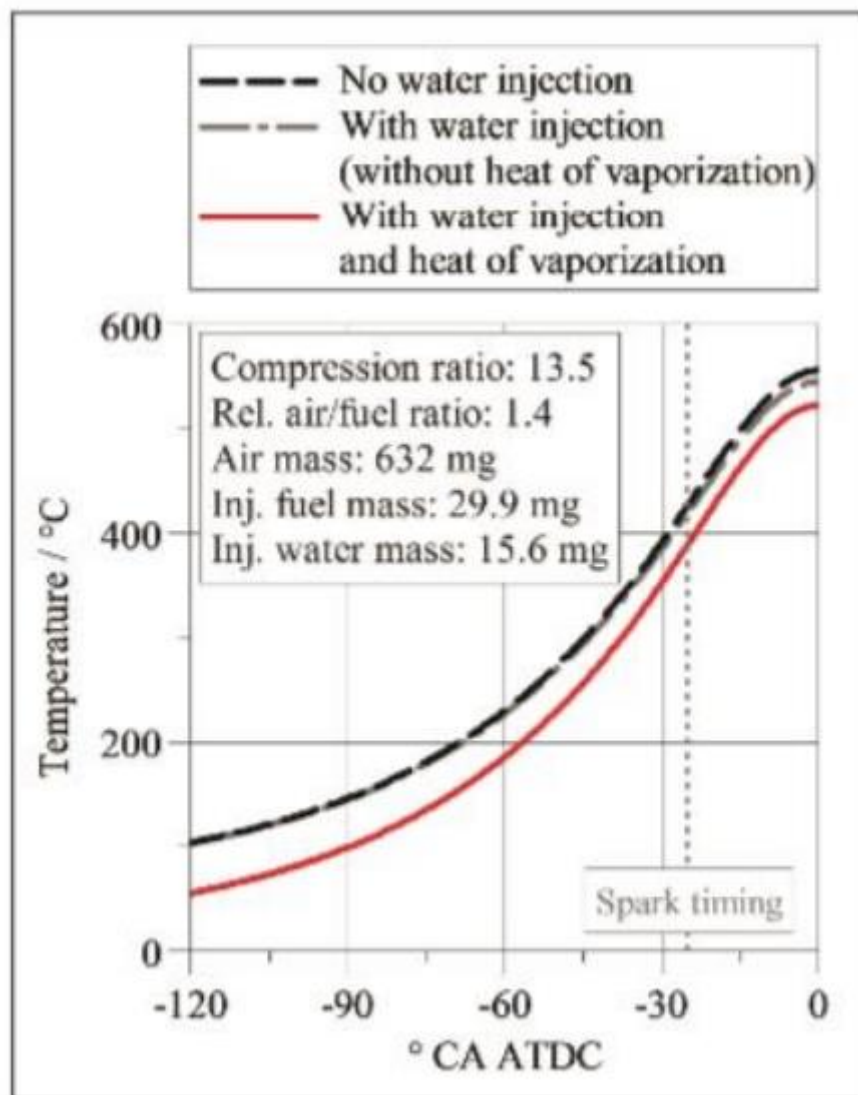


Ilustración 36: Comparación de temperaturas con y sin evaporación de agua. Fuente [12]

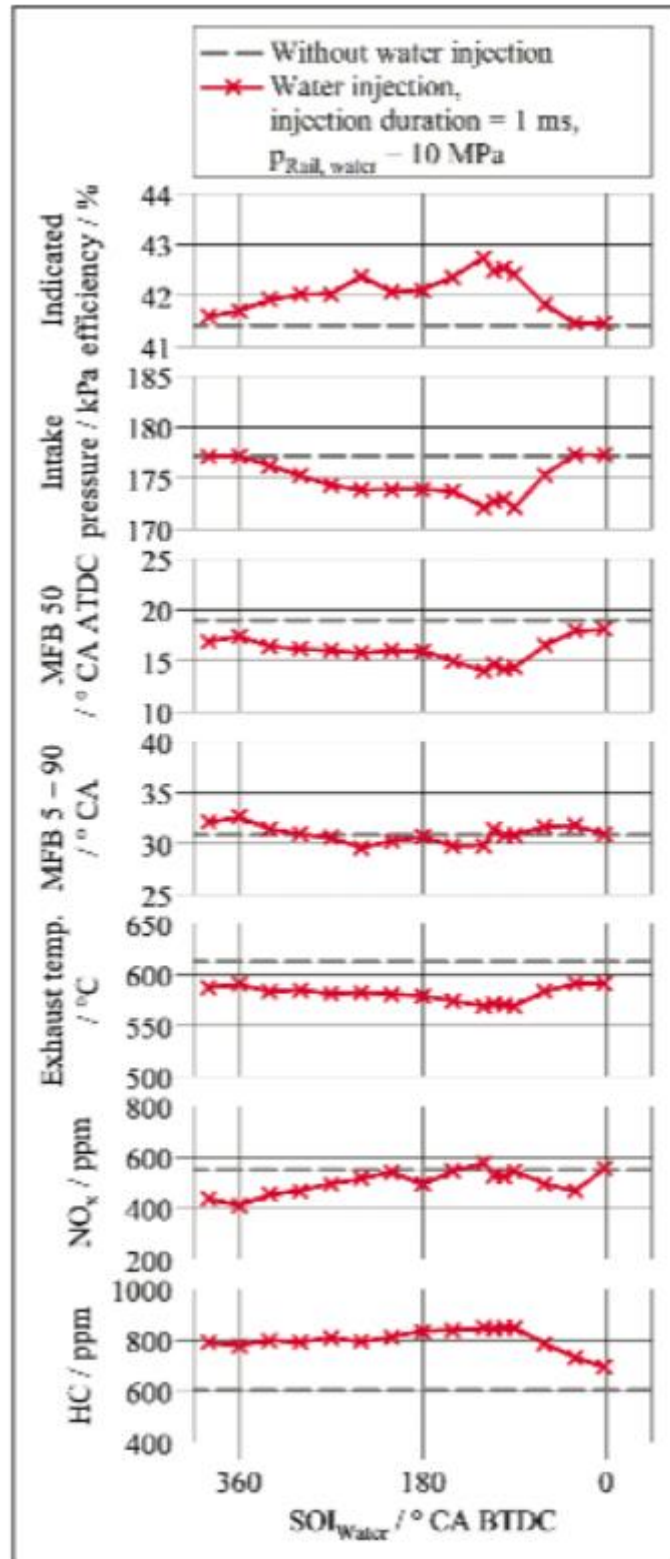


Ilustración 37: Comparación de los parámetros de emisiones y eficiencia. Fuente [12]

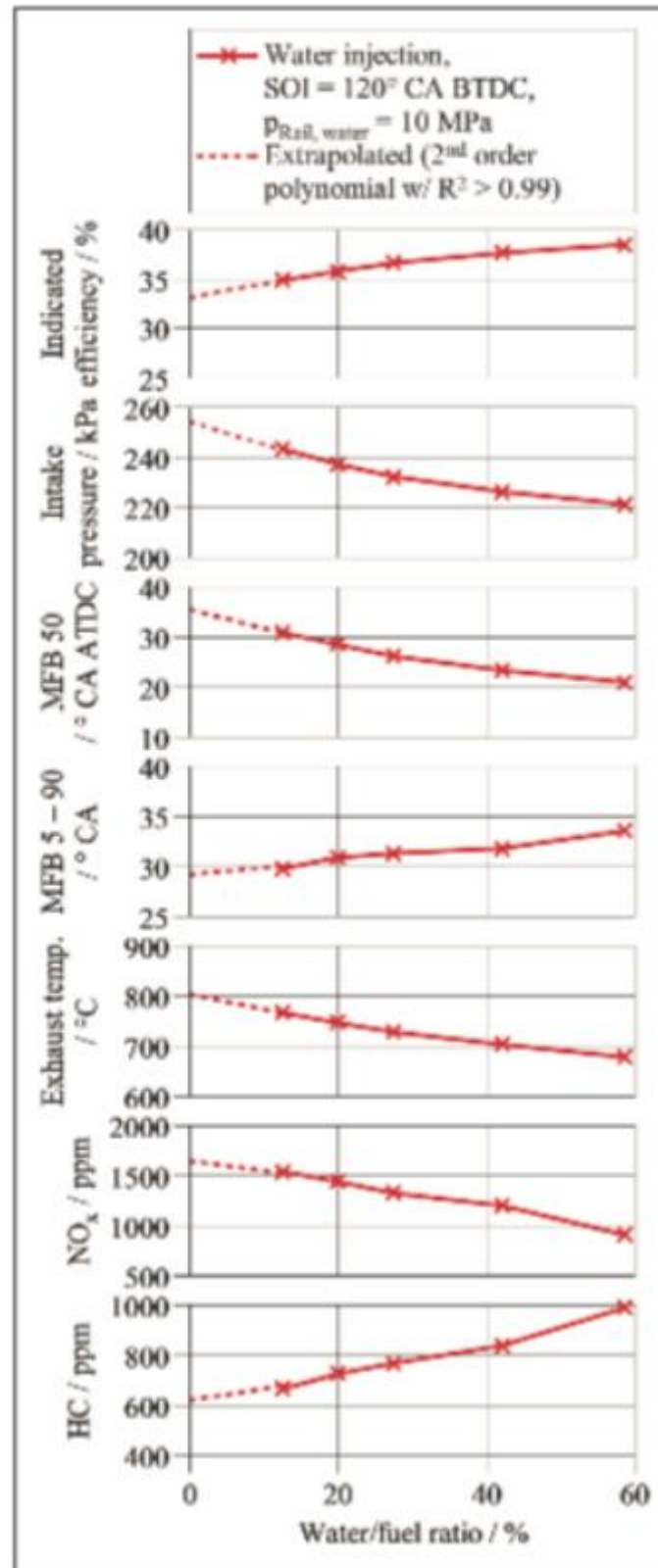


Ilustración 38: Comparación de los parámetros de emisiones y eficiencia. Fuente [12]

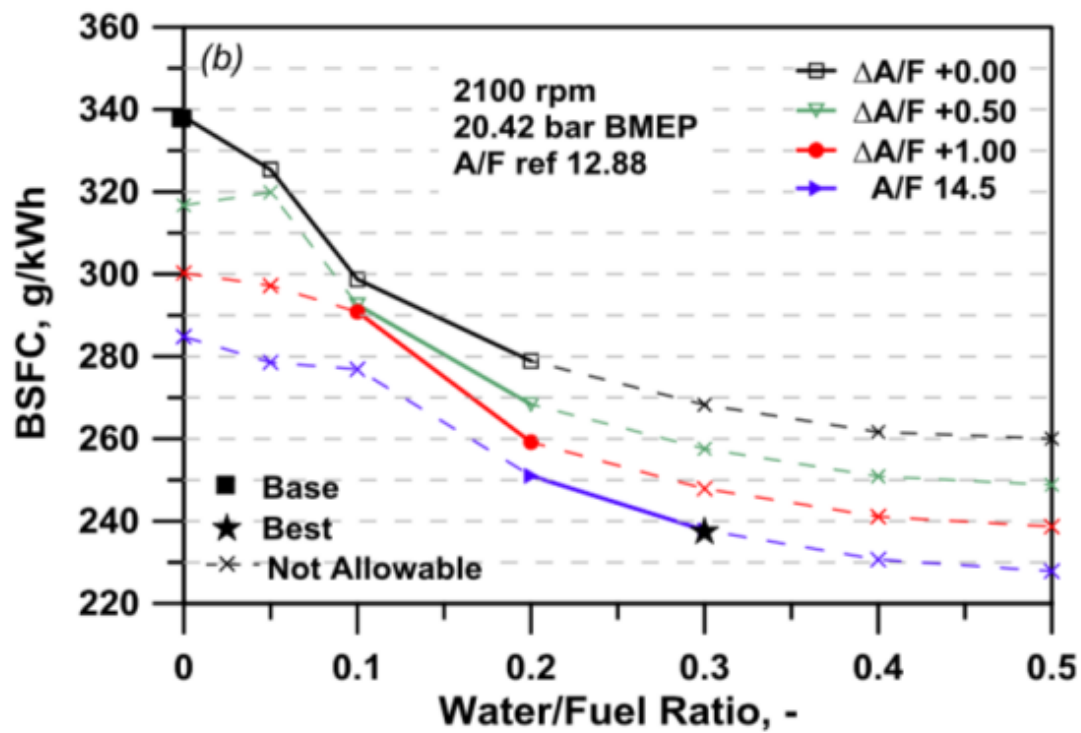


Ilustración 39: Consumo para distintos cocientes de aire-combustible. Fuente [10]

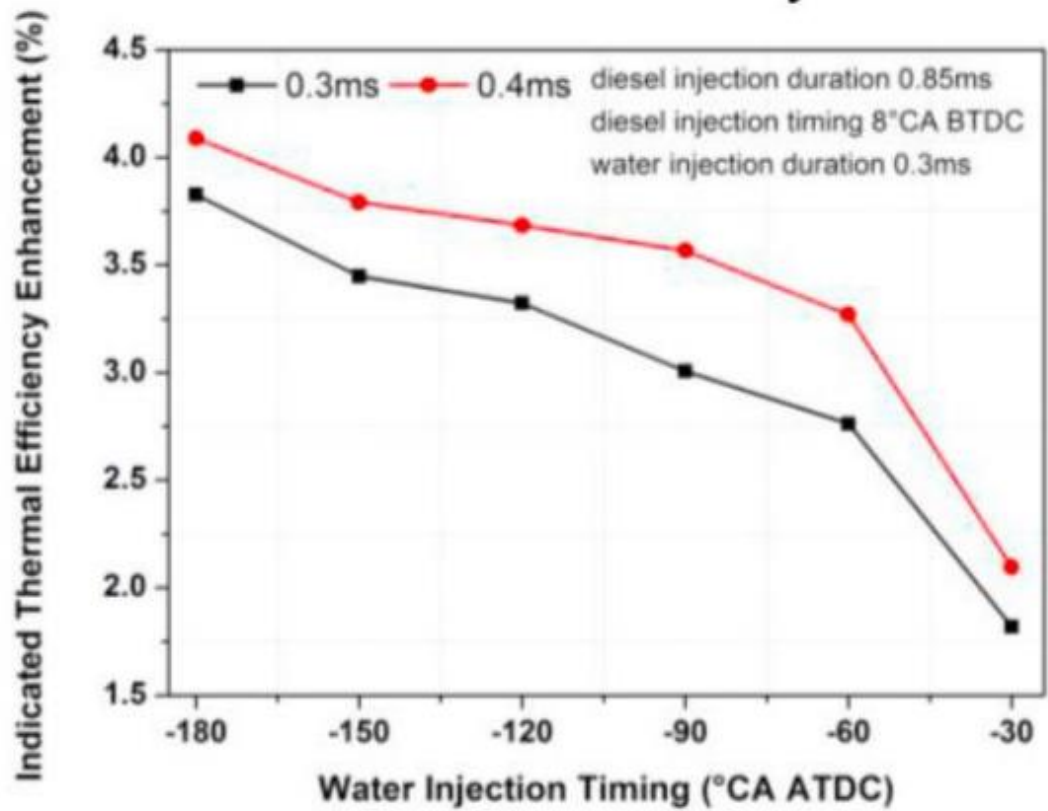


Ilustración 40: Rendimiento para distintos tiempos de inyección. Fuente [26]

2.4.5 Inyección en el colector de escape

El método de inyección de agua en el colector de escape se estudia en los trabajos de Nour et. al. [17] en un motor de encendido por compresión.

El motor que se ha estudiado tiene las siguientes características:

Engine Type	4-Stroke Single Cylinder DI Diesel Engine
Bore	89mm
Stroke	100mm
Displacement	622 cm ³
Compression Ratio	15.0
Combustion Chamber	Reentrant type
Injection System	Common Rail Injection System
Injection Nozzle	ϕ 0.158mm $\times$ 8
Intake System	Supercharged
Valve Train	2 Intake Valves and One Exhaust Valve

Tabla 7: Datos de motor ensayado por Nour 1. Fuente [17]

Engine speed [rpm]	1000
Fuel Injection quantity [mg/cycle]	32
Fuel Injection timing [ATDC]	-6
Water Injection timing [0 -720 deg] SOI	350°, 400°
Water Injection amount [mg/cycle]	6, 12, 24 and 40
Intake air temp	65°C
Coolant temp	85°C
Oil temp	70°C
Intake valve lift, IVO, IVC	8 mm, 14° BTDC, 30° ABDC
Exhaust valve lift, EVO, EVC	8 mm, 39° BBDC, 5° ATDC
Exhaust valve reopen lift [mm] and EGR ratio [%]	3mm (10% EGR) and 4mm (25% EGR)
Equivalence ratio for the conventional diesel combustion	0.72

Tabla 8: Datos de motor ensayado por Nour 2. Fuente [17]

Las variables a tener en cuenta en este sistema son tres: el instante en el que se comienza a inyectar agua, el tiempo durante el cual se inyecta el agua y por último el tanto por ciento de EGR. Este es un sistema que funciona como recuperador de energía ya que reintroduce la energía térmica de los gases que no ha se ha podido convertir en energía mecánica, permitiendo así que de nuevo produzca trabajo.

Tener una inyección más tardía o temprana provoca que las presiones máximas sean semejantes entre ellas, sin embargo, cuanto mayor sea al porcentaje de EGR, menor será la presión máxima y menores serán los valores en el entorno cercano al punto muerto superior.

Esto se explica porque los gases de alta entalpía se introducen en el cilindro, provocando así un salto entálpico menor.

En cuanto a las emisiones de NOx se reducen en gran parte a mayor porcentaje de EGR y de agua inyectada. Sin embargo, la cantidad de cenizas y de emisiones de CO aumentan en la misma proporción que se reducen las emisiones de NOx. [17]

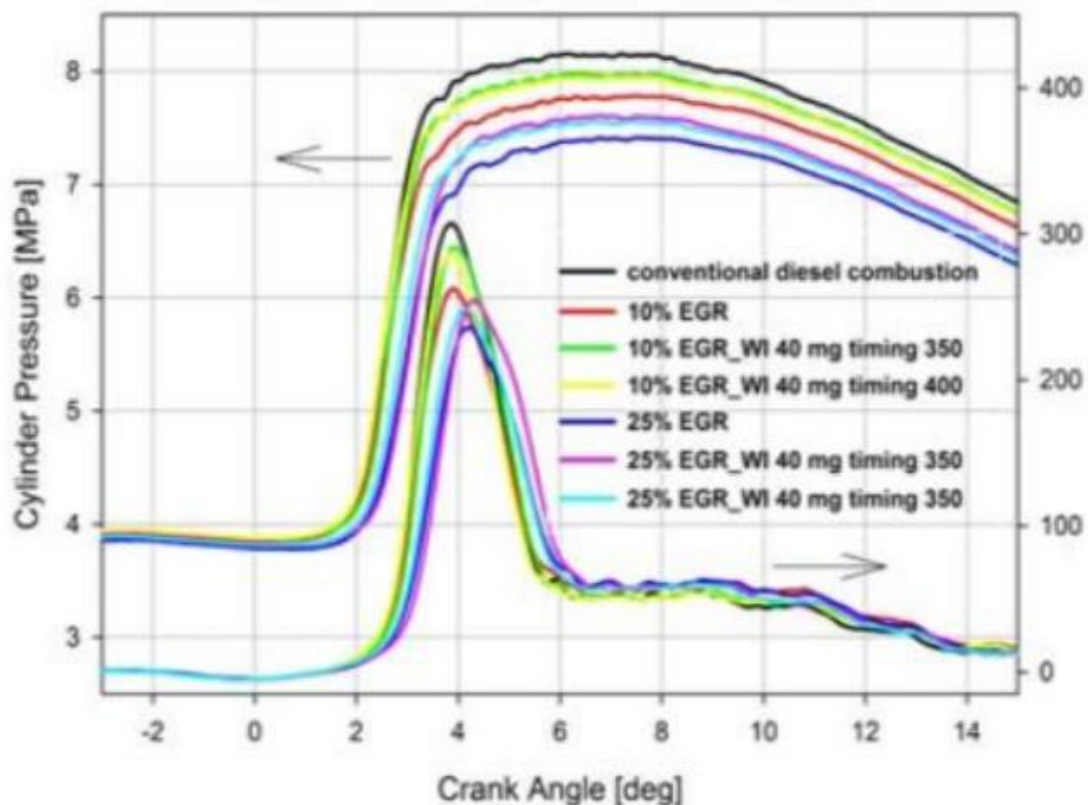


Ilustración 41: Comparación de presión en el cilindro para diferentes configuraciones de EGR. Fuente [16]

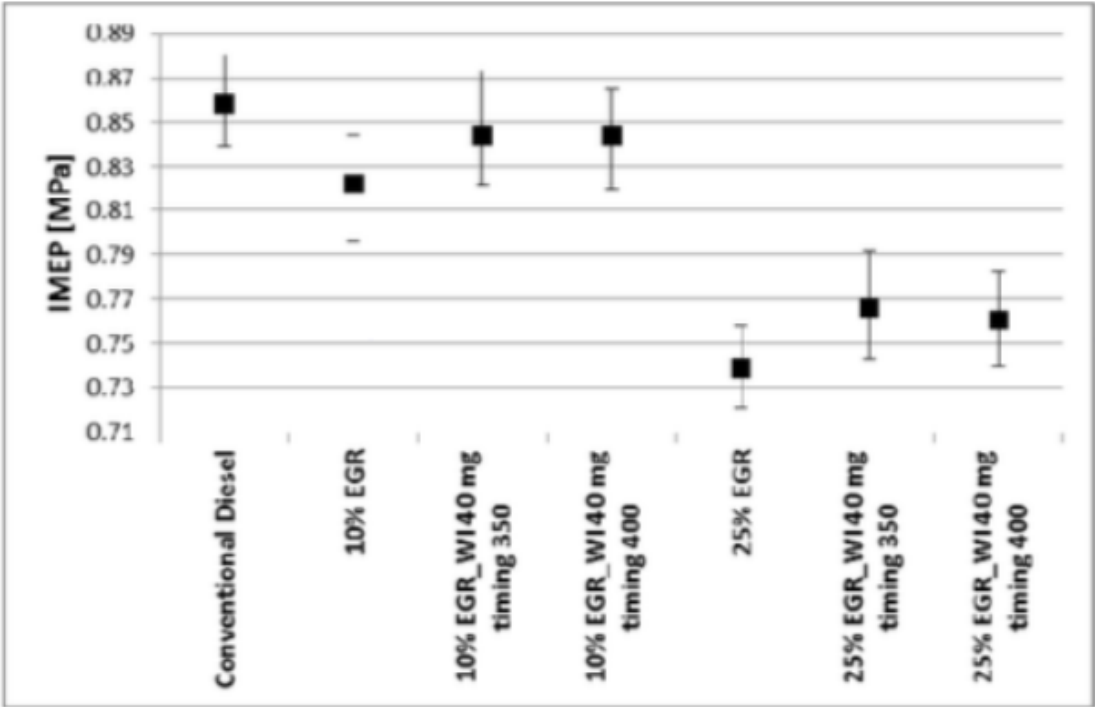


Ilustración 42: Intervalo de valores de presión media del cilindro con diferentes configuraciones de EGR e inyección de agua. Fuente [17]

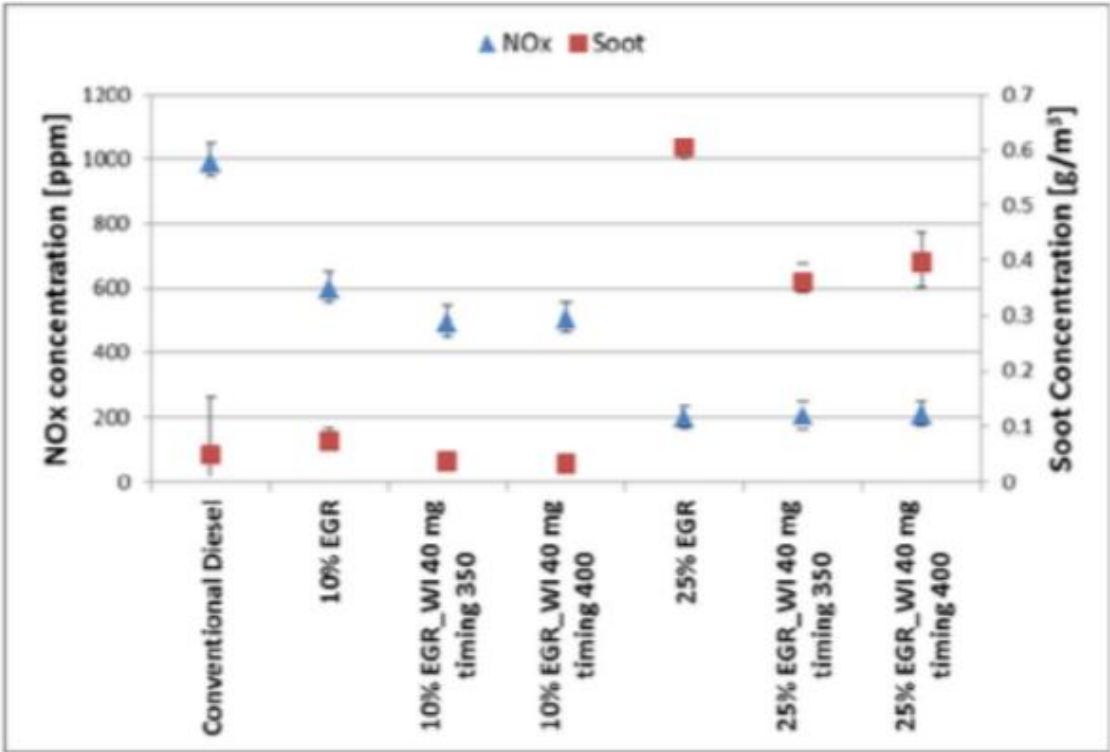


Ilustración 43: Intervalo de valores de emisiones de NOx y partículas con diferentes configuraciones de EGR e inyección de agua. Fuente [17]

2.5 Atomización de la gota

Un parámetro que es muy importante tener en cuenta cuando se inyecta agua en el motor para mezclarlo con el combustible es el tamaño de la gota de agua. Dependiendo de donde se inyecte el agua el tamaño de la gota de agua puede variar ya que cada mezcla tiene unas condiciones determinadas. Para predecir el tamaño de gota se recurren a números adimensionales:

Re : Numero Adimensional Reynolds

We : Numero Adimensional Webber

Oh : El número de Ohnesorge

Como los valores de referencia no se pueden establecer de manera inequívoca se fijan unos datos aproximados: [12]

Propiedad	Comb Iso-octano	Agua
Densidad (25°C) (kg/m ³)	690	999
Viscosidad (25°C) (mPa s)	0.467	0.882
Tensión superficial (25°C) (mN/m)	18.32	72.71
Presión de vapor (20°C) (kPa)	5.3	2.339

Tabla 9: Valores de referencia de atomización de la gota de agua. Fuente [13]

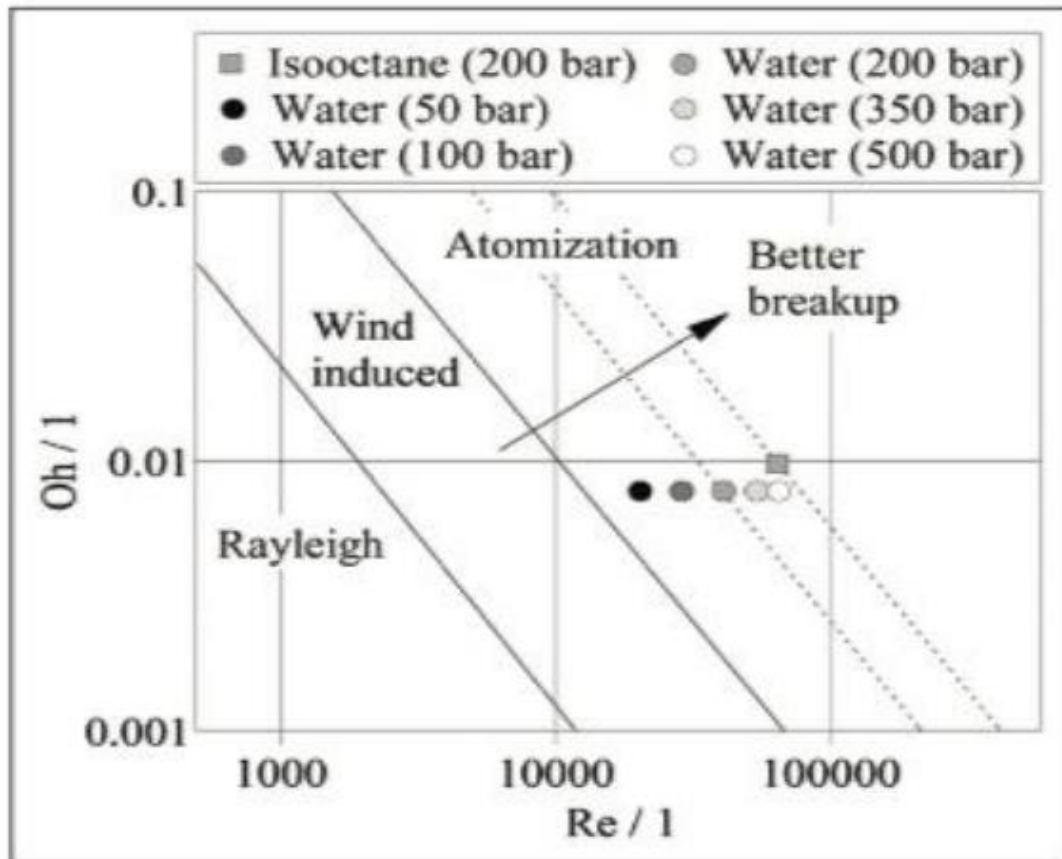


Ilustración 44: Atomización de la gota según los números adimensionales y diferentes presiones. Fuente [14]

Se puede observar que el tamaño de las gotas es similar tanto del combustible como del agua al pasar por el inyector. Esto es debido a que los números adimensionales de cada uno son semejantes. La viscosidad elevada del agua es compensada con su alta densidad. La tensión del agua se compensa con la del combustible Iso-octano. Como la combinación de ambos números adimensionales de Oh , significa que la energía para atomizar las gotas de agua es semejante en dichos casos.

Según algunos estudios, para mejorar la atomización de las gotas se consigue con algunos procesos. Una primera rotura de la gota y seguidamente una atomización más fina. Si el tamaño de la gota es excesivamente grande puede provocar que la mezcla no sea homogénea provocando así una mala combustión.

De la misma forma si la gota es excesivamente pequeña los inquemados pueden aumentar ya que el agua ocupa mayor superficie eliminando así demasiado calor. Obtener un tamaño de gota óptimo es complejo de calcular y es por eso por lo que la manera de estimar dicho tamaño es comparándolo con la gota de combustible. Es decir, se debe comprobar que tamaño de gota obtendremos del inyector de combustible e intentar que la atomización del agua sea lo más parecido posible.

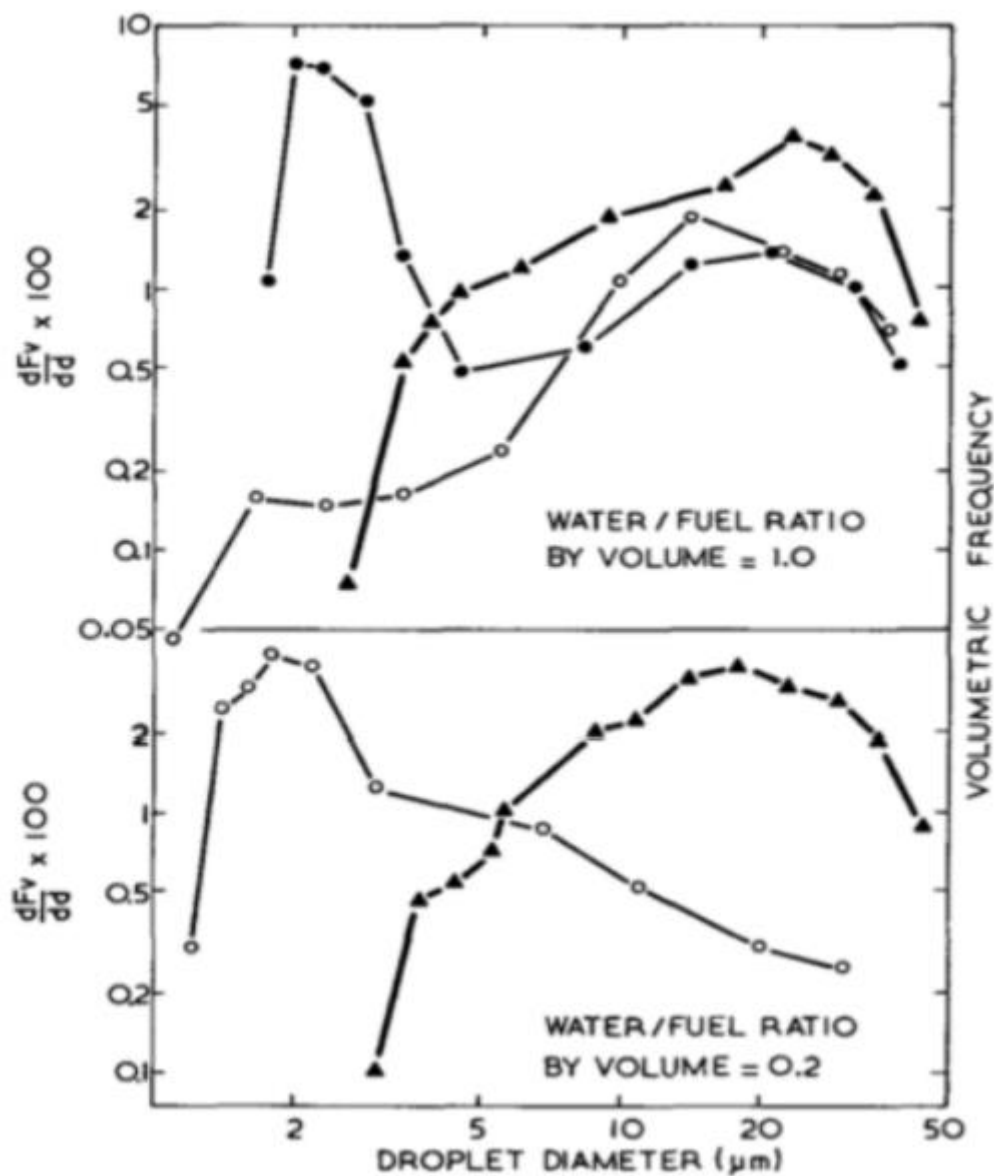


Ilustración 45: Tamaño más frecuente de la gota según el sistema de inyección. Fuente [8]

Los trazos con círculos corresponden a inyección directa mezclada con agua.

Los trazos con rectángulos corresponden a inyección en el conducto de admisión.

Los trazos con triángulos corresponden a inyección directa el cilindro.

2.6 Campos de aplicación

La inyección de agua es un sistema que se usa para complementar los motores empezó a desarrollar durante la segunda guerra mundial para mejorar entre otras cosas el rendimiento de los motores de los aviones.

Cuando se estuvo desarrollando nunca se pensó que podía ser usando para motores de potencias bajas, es decir, motores de coches; y mucho menos cuando la marca Saab introdujo un sistema para complementar la sobrealimentación, el intercooler.

Sin embargo, debido a la normativa actual, donde se requiere reducir todo lo posible las emisiones de NOx y de monóxido de carbono entre otras, además de la necesidad de fabricar motores mucho más eficientes, la inyección de agua se convierte en un sistema muy interesante de implementar. Muchas marcas grandes ya están empezando a implementarlo y desarrollarlo para sus vehículos.

La marca BMW lanzó al mercado el deportivo M4 GTS, el cual implementaba la inyección de agua junto al sistema de sobrealimentación aprovechando así las prestaciones del vehículo al máximo.

La marca BOSH patentó un sistema de inyección de agua en un motor llamado “Water-Boost”, el cual se ofrecía como alternativa a otras soluciones diferentes que se ofrecían en el sector de la automoción. La compañía establecía una mejora en las prestaciones de un 5%, una reducción de CO de un 4% y un ahorro de un 13% en el combustible.

En el sector de la competición de automoción todavía no hay modelos que lo usen ya que el tanque de agua fue prohibido por la FIA, pero marcas como Honda desarrollaron una moto con el sistema de inyección de agua que no salió a la luz.

En el año 1995, la marca japonesa Mitsubishi desarrolló un sistema de inyección de agua que finalmente no se llegó a implementar en ninguno de sus modelos.
[15]

2.7 Inconvenientes y posibles desafíos

- Es un método que resulta poco eficiente cuando el motor trabaja a regímenes bajos.
 - Se podría solucionar con un motor que tenga una relación de compresión que pueda variar. Por ejemplo, con el uso de un árbol de leva tipo Miller. [9]
- En temperaturas inferiores a cero grados centígrados es inservible.
 - Se podría solucionar al añadirle alcohol consiguiendo así un punto de congelación inferior. [12]
- Parte del agua puede caer al Carter por contacto con la pared. Según se ha comprobado en algún experimento tras 50 horas de funcionamiento, el agua se mezcla con el aceite en un 10%. [15]
- Puede haber problemas de corrosión y resistencias de algunos materiales. [17]
- Hay que rellenar el depósito de agua cada cierto tiempo y esto podría limitar la autonomía del vehículo. [17]
 - En los experimentos se estima que se consume entre 4 y 5 veces menos de agua que de combustible por lo tanto no habría problema.
- El software necesitado es más complicado. [17]

2.8 Ventajas

Aumentar potencia y eficiencia del motor:

- Se consigue reducir la temperatura de combustión, el agua al evaporarse en la cámara de combustión absorbe calor de la cámara de combustión, esto reduce la temperatura de los gases de escape. Con esto se consigue una mejor combustión y así completa, se aumenta la potencia del motor y se mejora la eficiencia térmica.
- La reducción de la temperatura en la cámara de combustión nos permite aumentar el índice de compresión del motor, consiguiendo mayor potencia y rendimiento.

Reducción de las emisiones contaminantes:

- Disminución de las emisiones NOx gracias a la menor temperatura de la combustión, esto hace que se generen menos óxidos de nitrógeno y gases nocivos para el medioambiente y la salud.
- Menos cantidad de partículas ya que el agua nos ayuda a eliminar las partículas de hollín del tubo de escape.

Otras:

- El agua en algunos casos puede servir para mejorar la lubricación de las paredes del cilindro.
- Se consigue un efecto antidetonante gracias a la inyección de agua.
- Mayor flexibilidad a la hora de diseñar el motor ya que la tecnología de inyección de agua permite a los ingenieros diseñar motores que aguanten mayor potencia y sean más eficientes sin tener que hacer cambios estructurales importantes.

Capítulo 3. APLICACIÓN DE INYECCIÓN DE AGUA EN AUTOMOVILES

3.1 Motor BMW M4 GTS

El BMW M4 GTS es uno de los pocos vehículos de carretera que incorporan el sistema de inyección de agua. Con este sistema consiguen una mejora en la potencia para acelerar y reducir el consumo en un motor de seis cilindros en línea con turbo. [20]

En la siguiente imagen se puede ver como es el motor:



Ilustración 46: Silueta motor BMW M4 GTS. Fuente [18]

El agua es inyectada con un atomización fina en la aspiración del motor de tal forma que se evapora inmediatamente y se consigue así refrigerar la aspiración. Al aplicarlo se comprueba que la temperatura de la compresión se reduce y además se consigue reducir la posibilidad de auto detonación favoreciendo la sobrealimentación del motor y mejorando el punto de encendido de la mezcla.

Gracias a la inyección de agua todos los componentes se benefician ya que el agua actúa como refrigerante ayudando a reducir el desgaste de las piezas y aumentar la vida útil del motor.

La inyección de agua permite que se pueda utilizar de varias formas, esto permite a los diseñadores, de BMW, por ejemplo, tener mayor libertad a la hora de diseñar

el motor pudiendo equilibrar así la eficiencia del combustible y conseguir una mayor potencia entre otras cosas.

Como se ha explicado con los ensayos realizados por los científicos anteriores, en los motores sobrealimentados se permite una mayor relación de compresión en estos motores, como puede ser el motor del BMW M4 GTS, el cual cuenta con un turbo. [20]



Ilustración 47: Chasis del BMW M4 GTS. Fuente [19]

3.1.1 Conseguir un mayor rendimiento y reducir el consumo

Si el sistema de alimentación produce la mayor potencia a las máximas rpm, se puede aumentar la potencia en un 8%. Hay un factor que es muy influyente, la temperatura, la cual puede provocar una gran pérdida de potencia que se puede compensar con más cantidad de agua inyectada.

Además, la potencia del motor se ve afectada por la temperatura de funcionamiento del motor ya que cuando un motor de combustión interna se sobrecalienta pierde totalmente su fuerza y los elementos del motor se pueden gripar.

En el caso de superar una temperatura determinada, el funcionamiento del motor no sería el correcto y se provocaría una combustión no eficiente y descontrolada provocando así pérdidas de potencia y en casos graves posibles daños perjudiciales para el motor.

En los motores turboalimentados, el aire de la admisión se calienta en el compresor hasta los 160°. Aunque se cuente con sistemas de refrigeración intermedios, estos están limitados y según como se haya diseñado el vehículo, el tamaño del sistema de refrigeración y la aerodinámica del vehículo proporcionando un flujo de aire se puede reducir esta temperatura de admisión hasta unos 70° antes de que entre en la cámara de combustión.

Para conseguir una mayor potencia se consigue aumentando la presión de sobrealimentación. [20]

3.1.2 Elevar el caballaje con la inyección de agua

Para elevar al caballaje requerido se inyecta agua muy fina en la cámara de admisión reduciendo así la temperatura unos 25°.

Con este enfriamiento se hace posible avanzar el punto de chispa para conseguir llegar al valor óptimo consiguiendo así una combustión mucho más eficiente a la vez que reduce la temperatura de combustión. Además, se consigue una mayor cantidad de aire ya que el aire aspirado es más frío, con esto se consigue que la presión media de combustión sea más elevada optimizando el desarrollo del par y la potencia.

Por último, este sistema de enfriamiento consigue reducir el valor térmico de varios componentes de motor, como:

- Pistones.
- Válvulas de escape.
- Catalizador.
- Turbocompresor.

Para aumentar el umbral de detonación del motor se emplea el método de inyección de agua, además también es útil para resolver problemas con el diseño de motores de alto rendimiento, como el motor del BMW M4 GTS. Esto es debido a dos factores que afectan directamente a la relación de compresión [20]:

- Potencia que se produce a la salida.
- La cantidad de combustible que es consumida.

3.1.3 Obtener una mayor compresión en el punto de mayor rendimiento con la inyección de agua

Gracias a la inyección de agua el umbral de detonación se puede elevar, esto permite que la relación de compresión se puede aumentar. Gracias a esto es posible optimizar la potencia de salida de los motores turboalimentados. Esta tecnología se caracteriza a que cuanto menor octanaje de combustible mayor es su eficacia.

En cuanto a la implementación de este sistema, los diseñadores de BMW decidieron disponer los tres inyectores de agua en la cámara de admisión que suministran agua a dos de los cilindros que tiene el motor. Esto permite que la distribución del agua sea uniforme y además permite que el diseño del motor sea más compacto.

El depósito de agua se encuentra en el maletero, dicho deposito es de 5 litros de capacidad, además también se encuentra junto al depósito la bomba, los sensores y válvulas. La bomba suministra agua a una presión de 10 bares aproximadamente, la cantidad de agua se varía según la carga, la velocidad y la temperatura gracias a una ECU.

El agua se inyecta en punto donde se obtiene un mayor rendimiento además de busca la mayor compresión posible.



Ilustración 48: Depósito de agua BMW M4 GTS. Fuente [20]

Cuando se hace una conducción deportiva y dura en pista, el depósito de agua debe ser rellenado cada vez que el vehículo reposta combustible, sin embargo, en uso más controlado, por ejemplo, un uso de diario, el intervalo en que se debe rellenar es más largo, siempre dependiendo del estilo de conducción de cada persona.

Por ejemplo, en una conducción rápida por autopista el depósito se rellena cada cinco repostajes de combustible. En una conducción más tranquila no requiere de agua constantemente para lograr una mayor practicidad. [20]



Ilustración 49: Motor del BMW M4 GTS. Fuente [19]

CONCLUSIONES

Desde 1878, la inyección de agua en motores de combustión interna ha sido objeto de estudio para muchos investigadores, los cuales intentaban sacar rendimiento a dicho sistema. Dicho sistema se empleó en varias etapas, como la segunda guerra mundial para conseguir mayor potencia durante las batallas hasta día de hoy empleado para reducir emisiones entre otras.

Dependiendo del tipo de motor y de cómo sea existen distintos métodos de inyección de agua que se pueden emplear. Además, varía como se inyecta la gota de agua entre otros parámetros.

Existen distintos campos de aplicación para dicho sistema, el más conocido es en el mundo de la automoción donde vehículos como el BMW M4 GTS empleaban dicho sistema para conseguir vehículos potentes con bajo consumo y baja contaminación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Kousoulidou, Marina; Ntziachristos, Leonidas ; Mellios, Giorgos; Zissis, “Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments,” Atmos. Environ., vol. 42, pp. 7465–7475, 2008.
- [2] colaboradores de Wikipedia. (2024b, febrero 15). *Daimler-Benz DB 601*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Daimler-Benz_DB_601
- [3] Wikipedia contributors. (2024b, marzo 6). *Rolls-Royce Merlin*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Rolls-Royce_Merlin
- [4] HowStuffWorks. (2023, 31 octubre). *Messerschmitt BF 109(ME 109)*. <https://science.howstuffworks.com/messerschmitt-bf-109.htm>
- [5] Wikipedia. (2024, 23 enero). *Supermarine Spitfire*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Supermarine_Spitfire
- [6] Mecanico, I. (s. f.-b). *DIFERENCIAS ENTRE MEP y MEC*. <https://mimapamental.blogspot.com/2013/09/diferencias-entre-mep-y-mec.html>
- [7] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals. New York.
- [8] G. Greeves, I. M. Khan, and G. Onion, “Effects of water introduction on diesel engine combustion and emissions,” Symp. Combust., vol. 16, no. 1, pp. 321–336, 1977.
- [9] W. Mingrui, N. T. Sa, R. F. Turkson, L. Jinping, and G. Guanlun, “Water injection for higher engine performance and lower emissions,” J. Energy Inst., vol. 90, no. 2, pp. 285–299, 2017
- [10] F. Bozza, V. De Bellis, and L. Teodosio, “Potentials of cooled EGR and water injection for knock resistance and fuel consumption improvements of gasoline engines,” Appl. Energy, vol. 169, pp. 112–125, 2016.

[11] De Colombia, A. (2016). Motores de combustión interna alternativos.
www.academia.edu/22866663/Motores_de_combustion_interna_alternativos

[12] J. D. Fabian Hoppe, Matthias Thewes, Henning Baumgarten, “Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions,” SAGE Journals, vol. 17, no. 1, pp. 86–96, 2015.

[13] C. L. Yaws, “Transport properties of chemicals and hydrocarbons: viscosity, thermal conductivity, and diffusivity of Cl to Cl₁₀₀ organics and Ac to Zr inorganic,” William Andrew Inc, 2009.

[14] Stefania Falfari, Gian Marco Bianchi, Giulio Cazzoli, Claudio Forte, Sergio Negro “Basics on Water Injection Process for Gasoline Engines”, 73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, pp. 52, 2018

[15] M. I. Hassan and A. T. Brimmo, “Modeling In-Cylinder Water Injection in a 2-Stroke Internal Combustion Engine,” Energy Procedia, vol. 75, pp. 2331–2336, 2015.

[16] M. E. A. Fahd, Y. Wenming, P. S. Lee, S. K. Chou, and C. R. Yap, “Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition,” Appl. Energy, vol. 102, pp. 1042–1049, 2013.

[17] M. Nour, H. Kosaka, A. K. Abdel-Rahman, and M. Bady, “Effect of Water Injection into Exhaust Manifold on Diesel Engine Combustion and Emissions,” Energy Procedia, vol. 100, pp. 178–187, 2016.

[18] Mechanic, A. (2018, 14 enero). *Video: Water Injection System for the BMW M4 GTS Car – 3D Animation.* Auto Mechanic.

<https://www.automotivemechanic.org/blog/32-video-water-injection-system-bmw-w4-gts-car-3d-animation>

[19] BWM. (07 de Oktober de 2015). 5 LITER WASSER FÜR 500 PFERDE.

Obtenido de BMW: <https://www.bmw-m.com/de/topics/magazine-article-pool/5-liter-wasser-fuer500-pferde.html>

[20] Bimmertips. (2022, 28 agosto). *How the BMW M4 GTS water injection system works*. BIMMERtips.com. <https://bimmertips.com/bmw-m4-gts-water-injection-explained/>

[21] Z.-J. Wu, X. Yu, L.-Z. Fu, J. Deng, Z.-J. Hu, and L.-G. Li, "A high efficiency oxyfuel internal combustion engine cycle with water direct injection for waste heat recovery," *Energy*, vol. 70, pp. 110–120, 2014.

[22] B. Tesfa, R. Mishra, F. Gu, and A. D. Ball, "Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel," *Renew. Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 333–344, 2012.

[23] E. Arabaci, Y. İçingür, H. Solmaz, A. Uyumaz, and E. Yilmaz, "Experimental investigation of the effects of direct water injection parameters on engine performance in a six-stroke engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 98, pp. 89–97, 2015.

[24] X. Tauzia, A. Maiboom, and S. R. Shah, "Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine," *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3628–3639, 2010.

[25] X. Ma, F. Zhang, K. Han, Z. Zhu, and Y. Liu, "Effects of Intake Manifold Water Injection on Combustion and Emissions of Diesel Engine," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 777–781, 2014.

[26] Z. Zhang et al., “Effect of direct water injection during compression stroke on thermal efficiency optimization of common rail diesel engine,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1251–1258, 2017.

[27] Z. Zhang et al., “Effect of direct water injection during compression stroke on thermal efficiency optimization of common rail diesel engine,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1251–1258, 2017.