



# MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

#### TÉCNICAS DE CONTROL EN LA DISMINUCIÓN DE NO<sub>x</sub> EN MOTORES DIESEL. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE DE ALTA Y BAJA PRESIÓN EN DISTINTOS PARAMETROS DEL MOTOR.

Autor: D. Rafael Girón Atienza

Tutor: D. Blanca Giménez Olavarria

Valladolid, Julio 2016

**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid  
(España)



**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





## **TÉCNICAS DE CONTROL EN LA DISMINUCIÓN DE NO<sub>x</sub> EN MOTORES DIESEL. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE DE ALTA Y BAJA PRESIÓN EN DISTINTOS PARAMETROS DEL MOTOR.**

### **RESUMEN BREVE**

La necesidad de frenar el gran impacto de los sistemas de transporte sobre la calidad de aire ha llevado al desarrollo de una normativa de regulación de los gases contaminantes. La última actualización de la misma hace especial hincapié en los óxidos de nitrógeno. Con la realización del presente trabajo fin de máster se pretende valorar las distintas técnicas de eliminación de óxidos de nitrógeno con mayor proyección en la actualidad como la recirculación de gases de escape, la tecnología SKYACTIV, la adición de agua, el lean NO<sub>x</sub> trap o el sistema de reducción catalítico selectivo. Entre los distintos sistemas analizados, se profundiza en el estudio de la recirculación de gases de escape. Se valora la influencia de la misma sobre el comportamiento del motor, su eficacia en la eliminación de NO<sub>x</sub> y una comparativa entre los dos sistemas más trascendentales. (EGR de alta presión y EGR de baja presión)

## **CONTROL TECHNIQUES IN NO<sub>x</sub> REDUCTION IN DIESEL ENGINES. INFLUENCE OF HIGH AND LOW PRESSURE EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM IN DIFFERENT ENGINE PARAMETERS.**

### **SHORT ABSTRACT**

The great impact the ways of transport have on the air quality leads the legislation to develop new restrictions in the current pollutant limits. The last updates have focused on nitrogen oxides. This handwork studies the different technics for the NO<sub>x</sub> elimination, for example exhaust gas recirculation, SKYACTIV technology, water addition, Lean NO<sub>x</sub> trap, selective catalyst reduction. It has dived in the EGR and its influence in the engine performance, NO<sub>x</sub> elimination efficiency as well as a comparative between the two main systems. (EGR high pressure and EGR low pressure)



## TÉCNICAS DE CONTROL EN LA DISMINUCIÓN DE NO<sub>x</sub> EN MOTORES DIESEL. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE DE ALTA Y BAJA PRESIÓN EN DISTINTOS PARAMETROS DEL MOTOR.

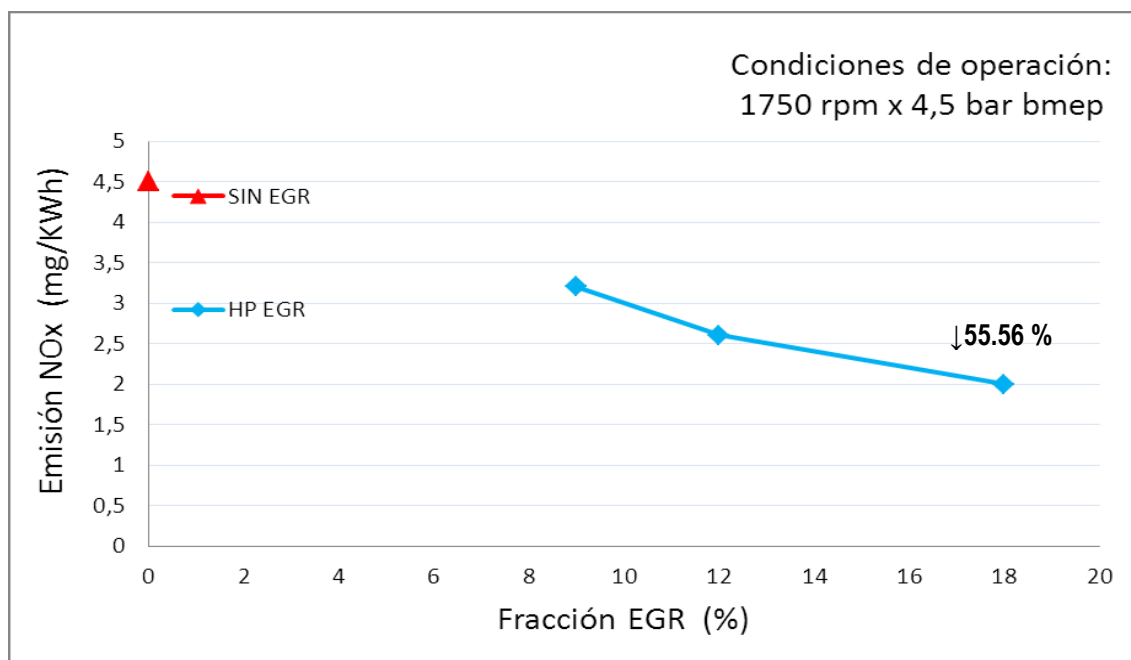
### RESUMEN EJECUTIVO

La masificación del vehículo como medio de transporte, el aumento en ventas del vehículo equipado con motor de combustión interna alternativo y el gran impacto sobre la salud y el medio ambiente provocan la regulación de los contaminantes emitidos por los mismos. Dicha normativa impone límites máximos de emisión a los principales contaminantes como CO, HC, partículas y NO<sub>x</sub>. Aproximadamente la mitad de las emisiones de óxidos de nitrógeno son atribuidas a los motores de los automóviles.

El presente trabajo pretende analizar los sistemas de eliminación de óxidos de nitrógeno con mayor proyección en la actualidad. Para ello, es necesario conocer los mecanismos de formación de NO<sub>x</sub> presentes en un proceso de combustión, NO<sub>TÉRMICO</sub>, NO<sub>COMBUSTIBLE</sub>, NO<sub>INMEDIATO</sub>. Alrededor del 90% de los óxidos de nitrógeno que se originan en un motor de encendido por compresión durante la combustión se producen mediante la vía del NO<sub>TÉRMICO</sub>.

Existen dos tipos de medidas en la eliminación de óxidos de nitrógeno. Medidas que actúan sobre el control de la combustión evitando la formación de NO<sub>x</sub>, conocidas como técnicas activas, entre las que destacan recirculación de los gases de escape, adición de agua o tecnología SKYACTIV. Por otro lado, existen medidas capaces de eliminar los óxidos de nitrógeno una vez expulsados del motor con pos procesos de tratamiento de gases de escape, este tipo se conoce como técnicas pasivas. Las principales son Lean NO<sub>x</sub> trap (LNT) y sistema de reducción catalítico selectivo (SCR).

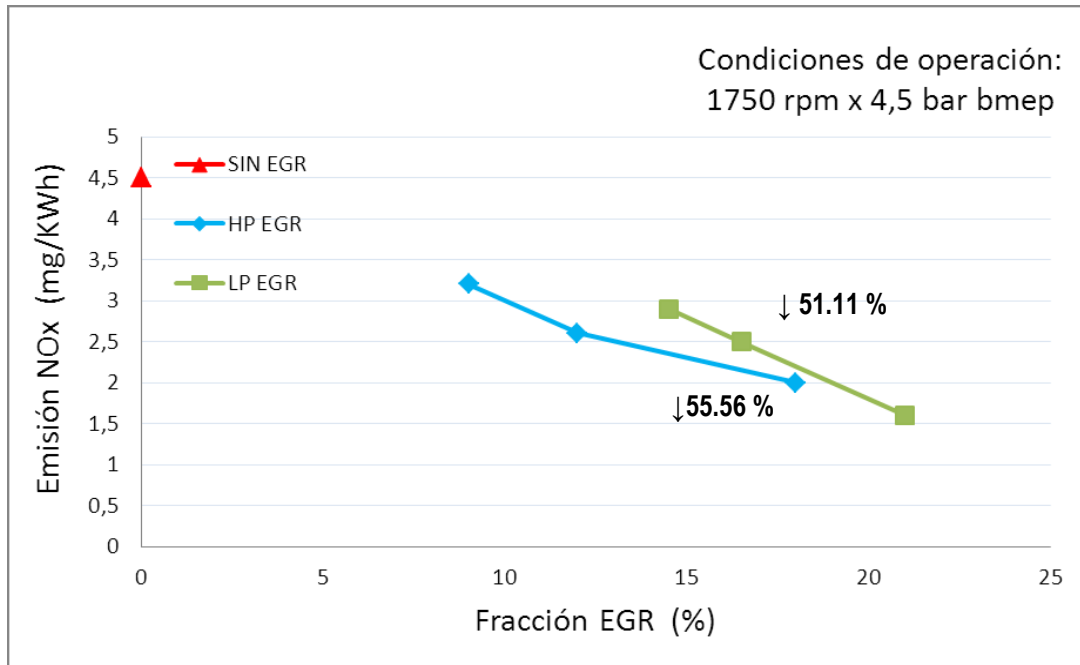
A pesar del desarrollo de los sistemas pos tratamiento de las emisiones de NO<sub>x</sub> en motores diésel, las medidas activas presentan un papel muy interesante en la formación de NO<sub>x</sub>. Este trabajo se centra en el estudio de la EGR, puesto que es un sistema con proyección futura debido al buen comportamiento, sencillez técnica y reducido coste frente a otros sistemas de reducción de emisiones. Para verificar la eficacia de dicho dispositivo se analiza la variación que sufren parámetros característicos del motor con la inclusión de gases recirculados.



**Figura Resumen.1:** Emisiones de óxidos de nitrógeno en función de la tasa de EGR. Fuente: Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref 1]

En la figura mostrada se corrobora la eficacia de la misma en emisiones de NOx. También se observa como a tasas de EGR más elevadas la capacidad del sistema se reduce y existiendo también una penalización en el comportamiento del motor es mayor.

Por último se realiza un estudio comparativo de los dos sistemas de recirculación de gases inertes más relevantes (EGR de alta presión y EGR de baja presión)



**Figura Resumen.2:** Emisión de NOx según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni Massimo Capobianco [Ref 1]

Con el uso del sistema de baja presión se consigue bajar la temperatura, parámetro fundamental en la formación de NOx. Además el comportamiento del motor se ve menos perjudicado con la inclusión de este dispositivo. En la figura se muestra como la eficacia en la eliminación de formación de NOx se ve penalizada con el aumento de tasa EGR HP, debido al aumento de la temperatura inicial que sufre la mezcla. Sin embargo con la EGR LP la capacidad de eliminación de NOx no se ve influenciada.

Como conclusión, debido a las características de ambos dispositivos, el sistema de recirculación de alta presión es mejor en condiciones de operación del motor a baja temperatura mientras que el sistema de baja presión tiene mejor comportamiento cuando el motor se encuentra en condiciones de operación normales.

## CONTROL TECHNIQUES IN NO<sub>x</sub> REDUCTION IN DIESEL ENGINES. INFLUENCE OF HIGH AND LOW PRESSURE EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM IN DIFFERENT ENGINE PARAMETERS.

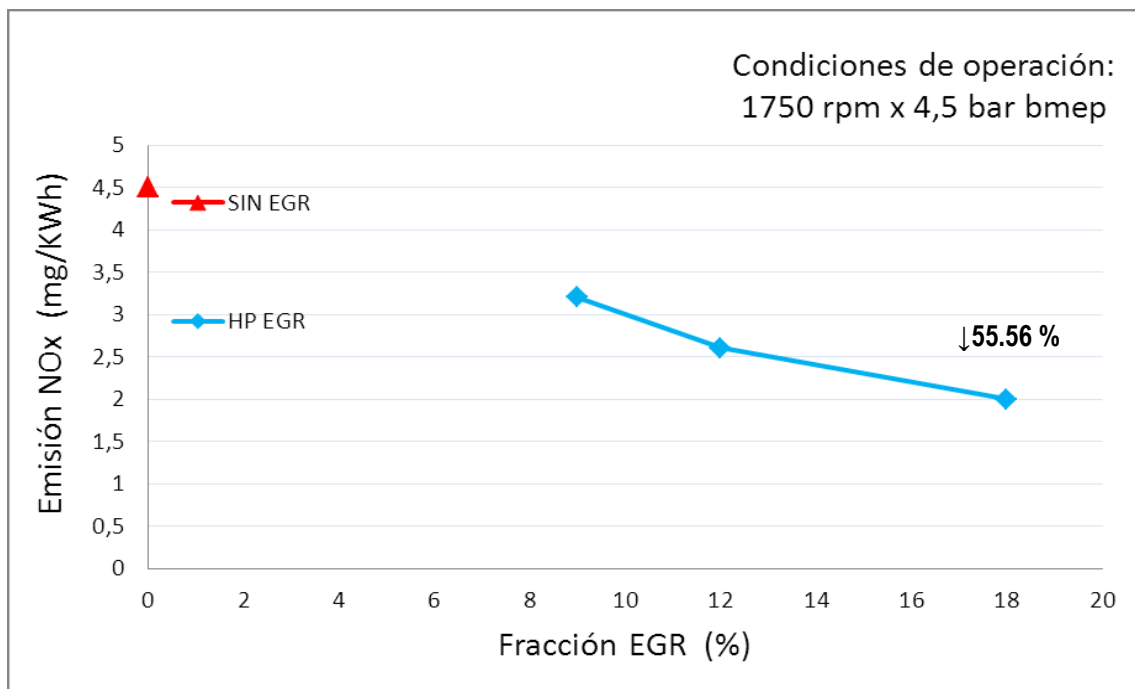
### EXECUTIVE ABSTRACT

The pollutant emissions have been regulated due to masiffication of the vehicle as way of transport, the increase in internal combustion engine vehicle sales and the big impact in people health and environment. The current regulation fixes maximum limits of the main pollutants such as CO, Soot, HC and NO<sub>x</sub>. Approximately half of the NO<sub>x</sub> emissions are attribute to internal combustion engines.

This handwork aims to analyze the NO<sub>x</sub> elimination systems that have a best prospective. To do that, it is necessary to be conscious of the NO<sub>x</sub> formation mechanisms in a combustion process: NO<sub>THERMIC</sub>, NO<sub>FUEL</sub> and NO<sub>PROMPT</sub>. In the combustion process of an engine, almost 90% of the NO<sub>x</sub> are produced via NO<sub>THERMIC</sub>.

There are two ways to eliminate NO<sub>x</sub>. On one hand, it is the method called “active technic” that regulates the combustion avoiding NO<sub>x</sub> formation like exhaust gas recirculation, water addition or SKYACTIC technology. On the other hand, there are methods able to eliminate NO<sub>x</sub> once they are exhausted from the engine with exhaust after treatment gases processes known as passive technologies. The main ones are Lean NO<sub>x</sub> Trap and Selective Catalytic reduction.

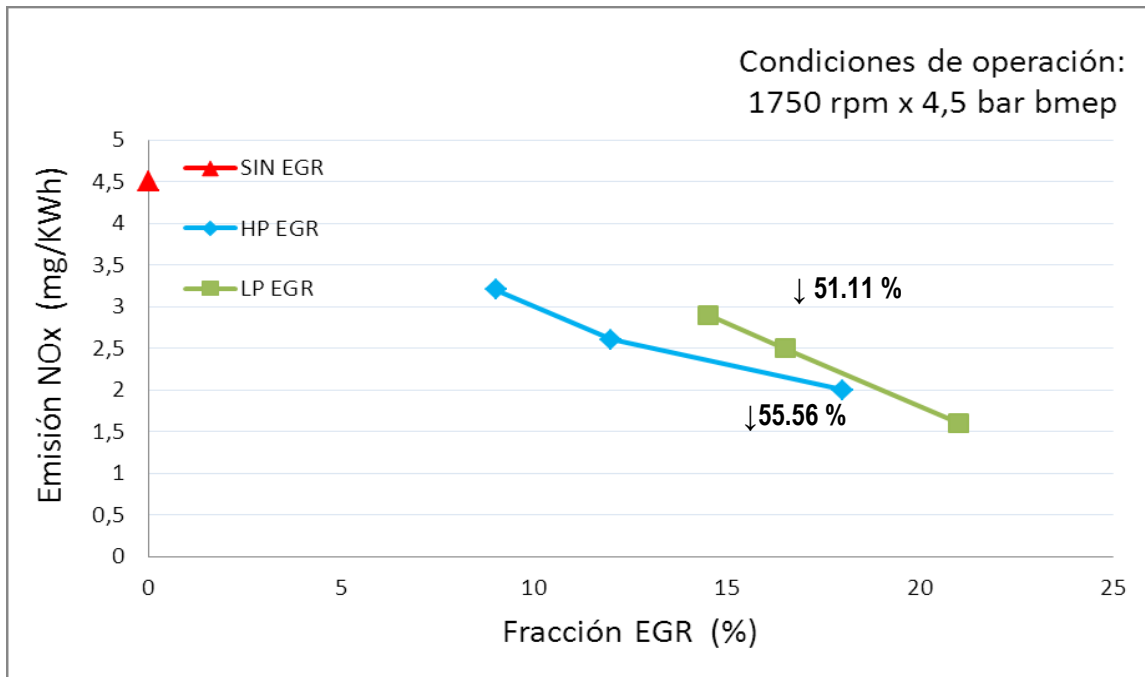
Despite of the development of NO<sub>x</sub> emission after treatment systems in diesel engines, the active technics play an interesting roll in NO<sub>x</sub> formation. This handwork focuses on the study of the EGR, because it is the most prospective system due to the performance, technical simplicity and low cost in comparison to others systems. In order to verify the efficiency of this device, it has to be analyze the engine characteristic parameters variation with the addition of the recirculated gases.



**Figura Resumen.1:** Emisiones de óxidos de nitrógeno en función de la tasa de EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref 1]

In the shown figure it is possible to see the efficiency in NO<sub>x</sub> emissions and also, how a higher EGR rates, the system capacity reduces and a decrease in the engine performance.

Finally, it has been made a comparative analysis between the two more important exhausts gases recirculation systems (EGR high pressure and low pressure)



**Figura Resumen.2:** Emisión de NOx según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Giorgio Zamboni Massimo Capobianco [Ref 1]

Thanks to the use of the low pressure system, the temperature drops, which is basic in the NOx formation. Moreover, the engine performance is less influence with the addition of this system. It is possible to see in the figure, how the efficiency in NOx elimination is impacted with the EGR HP rate increase due to the initial temperature rise that the mixture suffers. However, the NOx elimination capacity is not influenced with the EGR LP.

As a conclusion, due to the characteristics of both systems, the high pressure system is better in low temperature conditions. Meanwhile the low pressure system gives a better performance in normal operation conditions of the engine.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, que siempre están conmigo



## **ÍNDICE**

### **1. Introducción**

#### **1.1. Antecedentes y justificación del TFM**

##### **1.1.1. Contaminantes de los motores de combustión interna alternativos**

##### **1.1.2. Legislación**

##### **1.1.3. Óxidos de Nitrógeno. Formación**

###### **1.1.3.1. NO térmico**

###### **1.1.3.2. NO del combustible**

###### **1.1.3.3. NO inmediato**

###### **1.1.3.4. NO a partir del N<sub>2</sub>O**

###### **1.1.3.5. NO<sub>2</sub> a partir del NO**

##### **1.1.4. Efectos de los NO<sub>x</sub> sobre la salud y el medio ambiente**

#### **1.2. Objetivos**

### **2. Técnicas de control en la disminución de NO<sub>x</sub>**

#### **2.1. Técnicas activas**

##### **2.1.1. Recirculación de los gases de escape (EGR). Clasificación**

##### **2.1.2. Adición de agua**

##### **2.1.3. Tecnología SKYACTIV - D**

##### **2.1.4. Otras técnicas**

#### **2.2. Técnicas pasivas**

##### **2.2.1. Lean NO<sub>x</sub> Trap (LNT)**

##### **2.2.2. Sistema de reducción catalítica selectiva (SCR)**

##### **2.2.3. Otras técnicas**

### **3. Impacto de la EGR en distintos parámetros del motor y las consecuencias en la formación de NO<sub>x</sub>**

#### **3.1. Composición de la masa de aire**

#### **3.2. Proporción aire fresco/combustible**

#### **3.3. Masa admitida**

#### **3.4. Calor específico de la masa en cilindro**

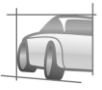
#### **3.5. Temperatura entrada al motor**

#### **3.6. Temperatura máxima**

#### **3.7. Temperatura salida del motor. (Antes de turbina)**

#### **3.8. Caudal de entrada al motor**

- 3.9. **Presión de entrada en turbina y velocidad de la turbina**
- 3.10. **Presión en cilindro**
- 3.11. **Eficiencia térmica**
- 3.12. **Consumo específico de combustible**
- 3.13. **Tiempo de retraso**
- 3.14. **Fracción de masa quemada**
- 3.15. **Calor liberado**
- 3.16. **Combustión premezclada**
- 3.17. **Combustión por difusión**
- 3.18. **Cantidad de O<sub>2</sub>**
- 3.19. **Temperatura adiabática de la llama**
- 3.20. **Emisión de partículas**
- 3.21. **Emisión de HC/CO**
- 3.22. **Síntesis de la formación de NO<sub>x</sub>**
- 4. **Comparativa de la EGR LP y EGR HP**
  - 4.1. **Ratio aire/combustible**
  - 4.2. **Temperatura del aire de entrada al motor**
  - 4.3. **Temperatura del aire de entrada a turbina**
  - 4.4. **Temperatura aguas abajo del compresor**
  - 4.5. **Caudal de entrada al motor**
  - 4.6. **Caudal de aire recirculado**
  - 4.7. **Presión y velocidad angular de turbina**
  - 4.8. **Variación sobre la turbina regulable**
  - 4.9. **Eficiencia**
  - 4.10. **Consumo específico de combustible**
  - 4.11. **Variación de la presión en cilindro**
  - 4.12. **Requerimientos de la potencia del intercooler**
  - 4.13. **Velocidad del calor liberado**
  - 4.14. **Fracción de masa quemada**
  - 4.15. **Emisión de CO**
  - 4.16. **Emisión de partículas**
  - 4.17. **Síntesis de la formación de NO<sub>x</sub>**



## **5. Conclusiones**

### **5.1. Generales**

### **5.2. Específicas**

### **5.3. Principales aportaciones del autor del TFM**

### **5.4. Sugerencias para trabajos futuros**

## **6. Referencias bibliográficas**



## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1: **Vehículos matriculados en España por tipo de carburante y periodo.**

Figura 1.2: **Composición de los gases de escape de motores diésel y gasolina**

Figura 1.3: **New European Driving Cycle.**

Figura 1.4: **Emisión de Nox por sectores.**

Figura 1.5: **Emisión de Nox en función de la temperatura y del ángulo del cigüeñal.**

Figura 1.6: **Constante de equilibrio de la formación de NO y NO<sub>2</sub> en función de la temperatura.**

Figura 2.1: **SFOC, NOX, HC y CO en función de la proporción agua-combustible.**

Figura 2.2: **Efecto de la emulsión de agua y el timing del comienzo de la inyección en las emisiones y el consumo de combustible de un motor diésel.**

Figura 2.3: **Esquema inyección de agua y combustible en el mismo inyector.**

Figura 2.4: **Simulación de un proceso de combustión con inyección de agua (izquierda), y sin inyección de agua (derecha).**

Figura 2.5: **Reducciones de las emisiones de NOx en un motor diésel Sulzer 4RTX54 a través de la inyección directa de agua.**

Figura 2.6: **Comparativa combustión según compresión.**

Figura 2.7: **NOx, Partículas y consumo según presión de inyección.**

Figura 2.8: **Temperatura media en función del tiempo de inyección**

Figura 2.9: **Emisión de NOx en función del ángulo de inyección.**

Figura 2.10: **Reducción de NOx en función del porcentaje de O<sub>2</sub>.**

Figura 2.11: **Reducción de NOx common rail.**

Figura 2.12: **Fases de funcionamiento del LNT.**

Figura 3.1: **Esquema motor con EGR HP y EGR LP.**

Figura 3.2: **Variación de componentes de la mezcla en función de la tasa EGR.**

Figura 3.3: **Proporción de aire fresco/combustible en cilindro.**

Figura 3.4: **Estrangulamiento térmico 1500rpm, 75% carga en función de la tasa EGR.**

Figura 3.5: **Calor específico en función de la tasa EGR.**

Figura 3.6: **Temperatura de admisión en función de la tasa EGR.**

Figura 3.7: **Temperatura de máxima alcanzada en función de la tasa EGR.**

Figura 3.8: **Temperatura salida del motor en función de la tasa EGR.**

Figura 3.9: **Caudal de entrada en función de la tasa EGR.**

Figura 3.10: **Presión a la entrada de la turbina en función de la tasa EGR.**

Figura 3.11: **Velocidad de la turbina en función de la tasa EGR.**

Figura 3.12: **Variación presión en cilindro según ángulo del cigüeñal.**

Figura 3.13: **Eficiencia térmica en función de la tasa EGR.**

Figura 3.14: **Consumo específico de combustible en función de la tasa EGR.**

Figura 3.15: **Tiempo de retraso en función de la tasa EGR.**

Figura 3.16: **Fracción de masa quemada según temperatura.**

Figura 3.17: **Calor liberado según ángulo del cigüeñal.**

Figura 3.18: **Combustión premezclada según ángulo del cigüeñal.**

Figura 3.19: **Combustión difusión plena carga, 1200rpm en función de la tasa EGR.**

Figura 3.20: **Proporción de oxígeno en función de la tasa EGR.**

Figura 3.21: **Gráfica modelo teórico temperatura adiabática.**

Figura 3.22: **Emisiones de partículas en función de la tasa EGR.**

Figura 3.23: **Emisiones de HC/CO en función de la tasa EGR.**

Figura 3.24: **Emisiones de óxidos de nitrógeno en función de la tasa de EGR.**

Figura 4.1: **Esquema componentes motor de encendido por compresión.**

Figura 4.2: **Ratio aire/combustible según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.3: **Variación sobre el O<sub>2</sub> de entrada según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.4: **Temperatura del aire de entrada según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.5: **Temperatura del aire de salida según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.6: **Temperatura aguas abajo del compresor según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.7: **Caudal del aire de entrada según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.8: **Caudal del aire recirculado según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.9: **Presión salida del motor (entrada en turbina) según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.10: **Variación de los álabes de la turbina según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.11: **Eficiencia según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.12: **Consumo específico de combustible según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.13: **Variación de la presión según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.14: **Gradiente de presión según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.15: **Potencia requerida por el intercooler según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.16: **Caída de presión en intercooler según tasa de EGR y tipo de EGR.**



Figura 4.17: **Velocidad calor liberado según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.18: **Fracción de masa quemada según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.19: **Emisión de CO según tasa de EGR y tipo de EGR.**

Figura 4.20: **Emisión de partículas según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.21: **Emisión de NOx según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR.**

Figura 4.22: **Emisiones de NOx acumuladas en el ciclo NEDC de un motor K9K con el uso de EGR HP y EGR HP y LP.**

Figura 5.1: **Sistema de recirculación de gases sugerido para investigaciones futuras**



## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1: **Tabla emisiones.**

Tabla 3.1: **Dosado relativo y efectivo en función de la tasa EGR.**

Tabla 3.2: **Calor específico y exponente adiabático.**

Tabla 3.3: **Tabla variación parámetros con la modificación de TEGR.**

Tabla 3.4: **Variación parámetros turbocompresor a 2bar y 1500rpm.**

Tabla 3.5: **Tabla resumen repercusión EGR sobre los parámetros de combustión y efectos sobre la emisión de NOx.**

Tabla 3.6: **Tabla componentes de la mezcla con y sin EGR**

Tabla 4.1: **Variación parámetros turbocompresor a 2bar y 1500rpm alta presión**

Tabla 4.2: **Variación parámetros turbocompresor a 2bar y 1500rpm baja presión**

Tabla 4.3: **Tabla resumen comparativa de EGR sobre los parámetros de combustión y efectos sobre la emisión de NOx.**



## NOMENCLATURA

$[O_2]_{AIRE}$  : Oxígeno en el aire

$\gamma$ : Exponente adiabático

$Al_2O_3$ : Óxido de aluminio

A/V: Relación agua/volumen

ATDC: after top dead center (después del punto muerto)

$BaCO_3$ : Carbonato de bario

$BaO$ : Óxido de bario

$BaSO_4$ : Sulfato de bario

BSFC: Brake specific fuel consumption (Consumo específico de combustible medido en banco)

C/H: Relación carbono/hidrógeno del combustible

CA: Crack angle (Ángulo de cigüeñal)

$C_c$ : Velocidad de combustión

$C_{CL}$ : Velocidad de combustión laminar

$CO(NH_2)_2$ : Urea

$CO(NO_2)_2$ : Nitrito cobaltoso

CO: monóxido de carbono

$CO_2$ : dióxido de carbono

COS: Sulfuro de carbonilo

$C_p$ : calor específico a presión constante

DFQL: Derivada de la fracción de calor liberado

EGR: exhaust gas recirculation (recirculación de gases de escape)

EGR HP: exhaust gas recirculation high pressure (recirculación de gases de escape de alta presión)

EGR LP: exhaust gas recirculation low pressure (recirculación de gases de escape de baja presión)

$F_{efe}$ : Dosado efectivo

FQL: Fracción de calor liberado

$F_R$ : Dosado relativo

FSN: Filter smoke number (número filtrado de opacidad)

GLP: Gas licuado del petróleo

$H_2O$ : agua

$H_2S$ : Sulfuro de hidrógeno

HC: hidrocarburos

HCN: Cianuro de hidrógeno

HNO<sub>3</sub>: Ácido nítrico

ICE: Internal combustion engine (Motor de combustión interna)

ID: Ignition delay (Retraso de la ignición)

LNT: Lean NOx Trap (Trampa de NOx)

$\dot{m}_{aire}$  : Gasto de aire fresco

$\dot{m}_{AIRE\ TEÓRICA}$  : gasto de aire fresco teórica

$\dot{m}_{EGR}$  : Gasto masa de gas inerte

$\dot{m}_{O_2ADM}$  : Gasto másico de oxígeno en admisión

N<sub>2</sub>O: Óxido nitroso

N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Óxido nítrico

NEDC: New European Driving Cycle (nuevo ciclo de homologación europea)

NH<sub>2</sub>: Ácido propanóico

NH<sub>3</sub>: Amoníaco

NO: Óxido nítrico

NO<sub>2</sub>: Dióxido de nitrógeno

NOx: óxidos de nitrógeno

O<sub>2</sub>: oxígeno

O<sub>3</sub>: Ozono

OH: hidróxido

PM: Particulate matter (masa de partículas)

P<sub>max</sub>: Maximum in-cylinder pressure (máxima presión en cilindro)

PNA: Passive NOx absorber (Sistema absorbente de NOx)

Pt: Platino

Qw: Transferencia de calor

SCR: selective catalytic reduction (Reducción catalística selectiva)

SFOC: Specific fuel oil consumption (Consumo específico de combustible)

SNCR: Selective non-catalytic reduction (Reducción selectiva no catalítica)

SO<sub>2</sub>: Dióxido de azufre

SO<sub>3</sub>: Trióxido de azufre

Soot: Partículas

TEGR: Tasa de EGR

TiO<sub>2</sub>: Dióxido de titanio

T<sub>peak</sub>: Peak in-cylinder gas mean temperature (temperature pico en cilindro)

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Pentaóxido de divanadio





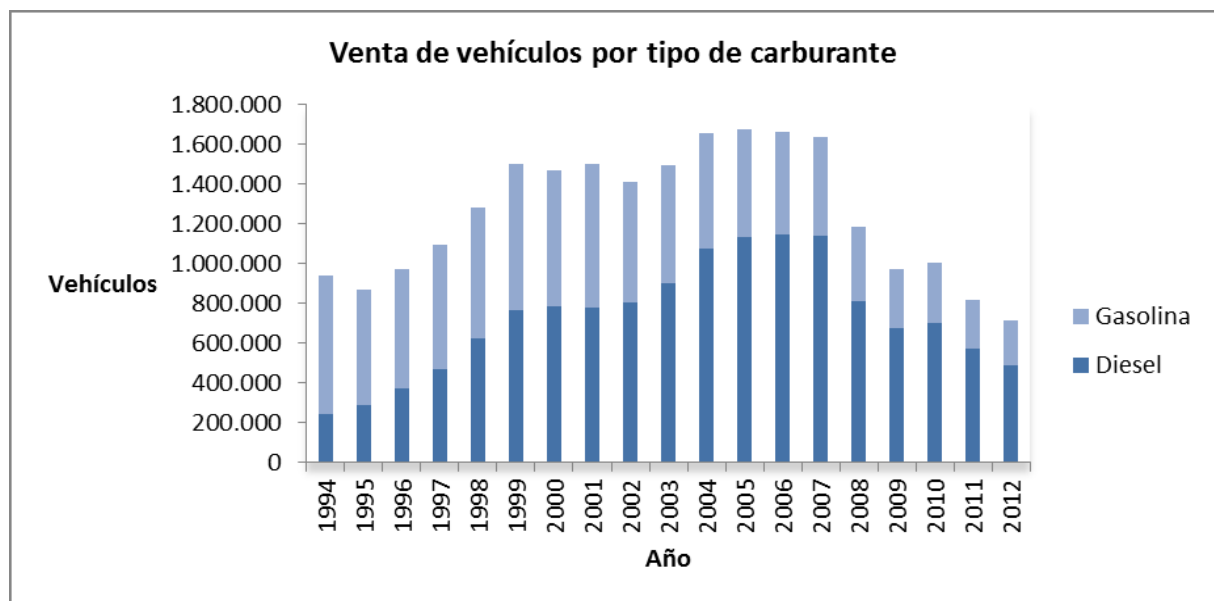
# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y justificación del TFM

Los motores de combustión se han utilizado desde finales de siglo XIX en el sector de la automoción. Entre los cuales se encuentra el motor de encendido provocado inventado por Nicolaus A. Otto y el motor de encendido por compresión inventado por Rudolf Diesel. Debido a sus puntos fuertes como la autonomía, precio económico, el bajo tiempo de repostaje y su buena distribución del combustible hace que en la actualidad gocen de una buena implantación comercial y una buena acogida social.

En los últimos años el nivel de ventas del motor de mezcla pobre o diésel se ha visto incrementado frente al motor de encendido provocado. La capacidad de obtener mayores niveles de rendimiento debido a la disponibilidad de trabajar con relaciones de compresión más elevadas y, en consecuencia, alcanzar un rendimiento térmico teórico mayor; este dato, reflejado en el consumo específico de combustible, ha hecho que el motor de encendido por compresión se haya generalizado en los vehículos de transporte de mercancías y, especialmente en el caso de la flota española, suponga una amplia cuota en los turismos convencionales.

En la siguiente figura 1.1 se muestra cómo el número de vehículos diésel vendidos en España es superior al de los vehículos de gasolina, superando los dos tercios en los últimos años.



**Figura 1.1:** Vehículos matriculados en España por tipo de carburante y periodo. Fuente: Instituto Nacional de estadísticas [Ref.Web 1]

Como se ha comentado, los motores de encendido por compresión alcanzan una mayor economía de combustible, debido al menor consumo de combustible (menor CO<sub>2</sub> g/km). Además, estos motores son más duraderos y emiten menor cantidad de CO, HC y gases de efecto invernadero que los motores de encendido provocado que funcionan con una relación aire/combustible estequiométrica. En el pasado, debido a la imposibilidad tecnológica de inyectar a presiones muy elevadas, los motores diesel no eran muy eficientes y se empleaban principalmente para vehículos pesados y aplicaciones agrarias. El desarrollo tecnológico en el mundo del automóvil, la concienciación ambiental y la preocupación por el

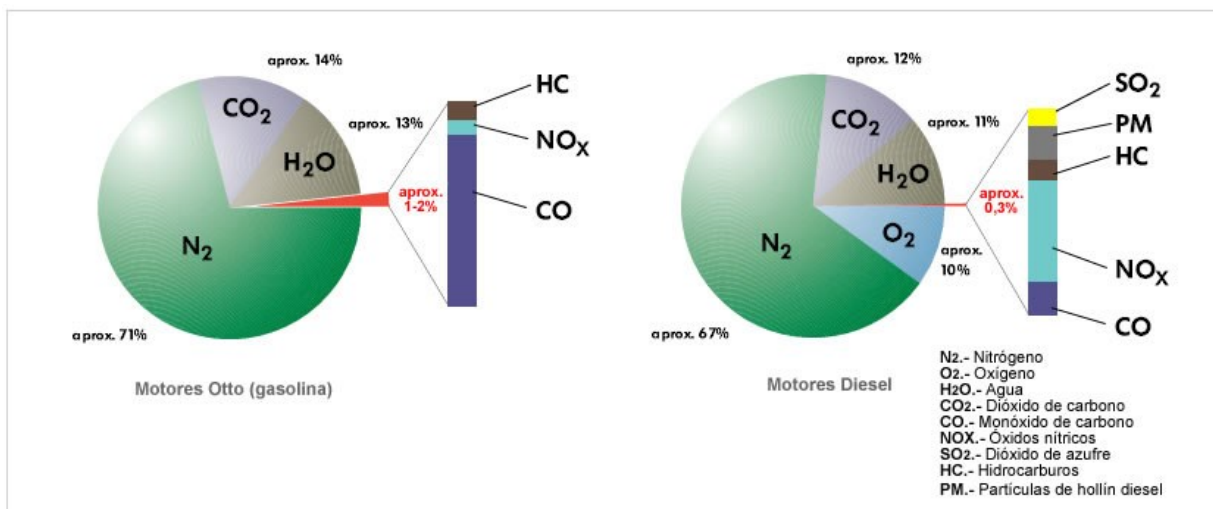
calentamiento global debido a las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) han aumentado la popularidad de los vehículos de ciclo diesel los últimos años en la unión europea.

El inconveniente de estos motores es el incremento de las emisiones de NO<sub>x</sub> debido a las altas temperaturas de combustión, y al tipo de combustión con exceso de oxígeno. Al no trabajar en relación estequiométrica hace que los catalizadores de tres vías, plenamente desarrollados en los motores de encendido provocado, no puedan ser utilizados para el control de la contaminación producida por el funcionamiento de los motores diesel.

Durante las últimas décadas, existen varias líneas de eliminación de NO<sub>x</sub>. Entre las que se encuentran técnicas activas, que disminuyen la formación de este contaminante creando una atmósfera no propicia para su producción y técnicas pasivas basadas en postratamientos de los gases de escape para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> a partir de tratamientos químicos.

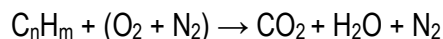
### 1.1.1 Contaminantes de los motores de combustión interna alternativos

Los automóviles representan una fuente importante de contaminación del aire. Las emisiones procedentes de los escapes de los vehículos se ven detalladas en la siguiente figura 1.2:



**Figura 1.2:** Composición de los gases de escape de motores diesel y gasolina. Fuente: ArchivosVolskwagen [Ref.Web 2]

La reacción de combustión simplificada que se produce en un motor es:



Esta reacción no se cumple de manera completa, produciendo partículas e inquemados.

A partir de este gráfico podemos clasificar los componentes de los gases de escape:

- El nitrógeno (N<sub>2</sub>), es un gas no combustible, incoloro e inodoro, se trata de un componente esencial del aire que respiramos (78 % nitrógeno, 21 % oxígeno, 1 % otros gases) y alimenta el proceso de la combustión conjuntamente con el aire de admisión. La mayor parte del nitrógeno aspirado vuelve a salir puro en los gases de escape; sólo una pequeña parte se combina con el oxígeno (O<sub>2</sub>) formando óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- Oxígeno (O<sub>2</sub>), es un gas incoloro, inodoro e insípido. Es el componente más importante del aire que respiramos (21 %). Es imprescindible para el proceso de combustión, con una mezcla ideal

el consumo de combustible debería ser total, pero en el caso de la combustión incompleta, el oxígeno restante es expulsado por el sistema de escape.

- Agua ( $H_2O$ ), es aspirada en parte por el motor (humedad del aire) o se produce con motivo de la combustión “fría” (fase de calentamiento del motor). Es un subproducto de la combustión y es expulsado por el sistema de escape del vehículo, se lo puede visualizar sobre todo en los días más fríos, como un humo blanco que sale por el escape, o en el caso de condensarse a lo largo del tubo, se produce un goteo. Es un componente inofensivo de los gases de escape.
- Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) Se produce al quemarse los combustibles que contienen carbono (gasolina, gasóleo). El carbono se combina durante esa operación con el oxígeno aspirado. Es un gas incoloro, no combustible. A pesar de ser un gas no tóxico, reduce el estrato de la atmósfera terrestre que suele servir de protección contra la penetración de los rayos UV (la tierra se calienta) provocando alteraciones climatológicas.
- Monóxido de carbono ( $CO$ ), se produce con motivo de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono. Es un gas incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico. Bloquea el transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos. Es mortal, incluso en una baja concentración en el aire que respiramos. En una concentración normal en el aire ambiental se oxida al corto tiempo, formando dióxido de carbono  $CO_2$ .
- Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), son combinaciones de nitrógeno  $N_2$  y oxígeno  $O_2$  (p. ej.  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O...$ ). Los óxidos de nitrógeno se producen al existir una alta presión, alta temperatura y exceso de oxígeno durante la combustión en el motor. El monóxido de nitrógeno ( $NO$ ), es un gas incoloro, inodoro e insípido. Al combinarse con el oxígeno del aire, es transformado en dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), de color pardo rojizo y de olor muy penetrante, provoca una fuerte irritación de los órganos respiratorios. El  $N_2O$ , es mas estable que el  $NO$  y el  $NO_2$ , lo que le permite alcanzar la estratosfera donde la radiación solar lo transforma de nuevo en  $NO$  que reacciona con el ozono para formar  $NO_2$ , además es el responsable en cierta medida del preocupante calentamiento global o efecto invernadero. Las medidas destinadas a reducir el consumo de combustible suelen conducir lamentablemente a un ascenso de las concentraciones de óxidos nítricos en los gases de escape, porque una combustión más eficaz produce temperaturas más altas. Estas altas temperaturas generan a su vez una mayor emisión de óxidos nítricos. Posteriormente se desarrollará este tipo de contaminante.
- Dióxido de azufre ( $SO_2$ ), el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso propicia las enfermedades de las vías respiratorias, pero interviene sólo en una medida muy reducida en los gases de escape. Es un gas incoloro, de olor penetrante, no combustible. Responsable de la lluvia ácida. Si se reduce el contenido de azufre en el combustible es posible disminuir las emisiones de dióxido de azufre.
- Hidrocarburos ( $HC$ ), son restos no quemados del combustible, que surgen en los gases de escape después de una combustión incompleta. La mala combustión puede ser debido a la falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica), por formación de la mezcla incorrecta y por una baja velocidad de inflamación (mezcla pobre), por lo que es conveniente ajustar la riqueza de la mezcla. Los hidrocarburos  $HC$  se manifiestan en diferentes combinaciones (p. ej.  $C_6H_6$ ,  $C_8H_{18}$ ) y actúan de diverso modo en el organismo. Algunos de ellos irritan los órganos sensoriales, mientras que otros son cancerígenos (p. ej. el benceno).

- Las partículas de hollín PM (masa de partículas; inglés: particulate matter). Son generadas en su mayor parte por los motores diesel, se presentan en forma de hollín o cenizas. Se relacionan con enfermedades cardiovasculares y respiratorias. [Ref.Web 3]

### 1.1.2 Legislación

Debido a la necesidad de frenar la influencia del tráfico en la calidad del aire, ha provocado que se impongan límites legales a las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Gran parte de la normativa está enfocada en reducir las emisiones contaminantes procedentes de los automóviles y de otros vehículos de transporte. Los contaminantes que generalmente regulan son las emisiones de NOx, CO, HC y PM de los gases de escape de los vehículos; mientras que los principales componentes, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, que componen el 98% de los gases de escape no son regulados, aunque existe un compromiso por parte de la Unión Europea para el control y reducción de las emisiones de dióxido de carbono con base en ayudas fiscales.

Los medios de transporte son responsables de un 5 % de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), del 25 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), del 87 % de las de monóxido de carbono (CO) y del 55 % de las de óxidos de nitrógeno (NOx). Este gran porcentaje de contaminantes de los vehículos a nivel europeo provoca que los niveles de contaminación se vean limitados por unas medidas de contaminación que han ido evolucionando con el transcurso de los años tal y como se muestra en la siguiente tabla 1.1:

**Tabla 1.1:** Tabla emisiones. Fuente: Asociación de Fabricantes Europeos de Automóviles (ACEA) [Ref.Web 4]

Vehículos ligeros (pasajeros)							
Directiva	Entrada	Tipo	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	Partículas (g/km)
EURO1	10/07/1992	Gasolina	2.72	-	-	0.97	-
	01/07/1992	IDI	2.72	-	-	0.97	0.14
	01/07/92-94	DI	2.72	-	-	1.358	0.196
EURO2	1996	Gasolina	2.7	-	-	0.5	-
	1996	IDI	1.0	-	-	0.7	0.08
	1996-99	DI	1.0	-	-	0.9	0.10
EURO3	2000	Gasolina	2.3	0.2	0.15	-	-
	2000	IDI/DI	0.64	-	0.50	0.56	0.05
EURO4	2005	Gasolina	1.0	0.1	0.08	-	-
	2005	IDI/DI	0.5	-	0.25	0.3	0.025
EURO 5	2009 2011	Gasolina	1.0	0.1	0.06	-	0.005
	2009 2011	Diesel	0.5	-	0.18	0.23	0.005
EURO 6	2014 2015 2017	Gasolina	1.0	0.1	0.06	-	0.005
	2014 2015 2017	Diesel	0.5	-	0.08	0.17	0.005

La normativa europea sobre emisiones ha ido marcando el camino de las tecnologías desarrolladas por los fabricantes de automóviles. Con la entrada de la EURO 5 los vehículos diesel se vieron obligados a dotar sus motores de filtros de partículas debido a la restricción que sufrió ese contaminante en ese año. Mientras que con la entrada de la norma EURO 6 la restricción más elevada es para el contaminante NOx, por lo que los fabricantes de automóviles dotaran a los mismos con medidas anticontaminantes de NOx como puede ser la EGR, el Lean NOx Trap, o el Selective Catalytic Reduction (SCR).

Para comercializar los vehículos en Europa, éstos deben pasar una homologación rigida por la Unión Europea. Los contaminantes de los vehículos son determinados en el New European Driving Cycle y éstos deben ser menores a los impuestos en la norma. Posteriormente en la figura 1.3 se muestra el ciclo homologado que los vehículos tienen que pasar en bancos de rodillos.

	urbano	Extra urbano
Distancia (km)	4x1.013	6.955
Duración (s)	4x195	400
Velocidad media (km/h)	18.7	62.6
Velocidad máx. (km/h)	50	120

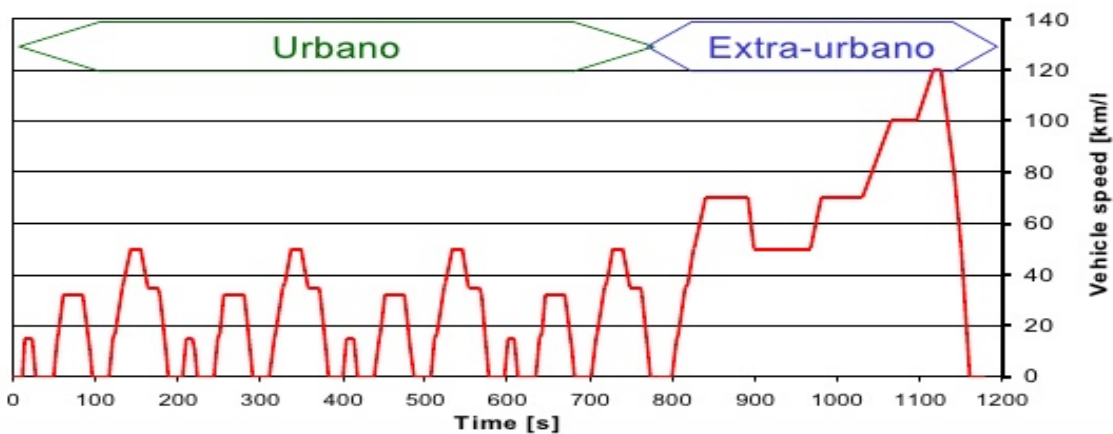


Figura 1.3: New European Driving Cycle. Fuente: FIA Foundation. [Ref.Web 5]

### 1.1.3 Óxidos de nitrógeno. Formación

Se realizará un estudio de los óxidos de nitrógeno como gas contaminante en los motores de encendido por compresión debido al gran impacto de los óxidos nitrosos emitidos por vehículos diesel en la calidad del aire tal y como se muestra en la figura 1.4. Como se ha comentado con anterioridad la normativa actual (EURO 6) implica una reducción de este contaminante, por lo tanto, en la actualidad el desarrollo de la tecnología actual se esta inclinando en la reducción de los NOx en los vehículos diesel.

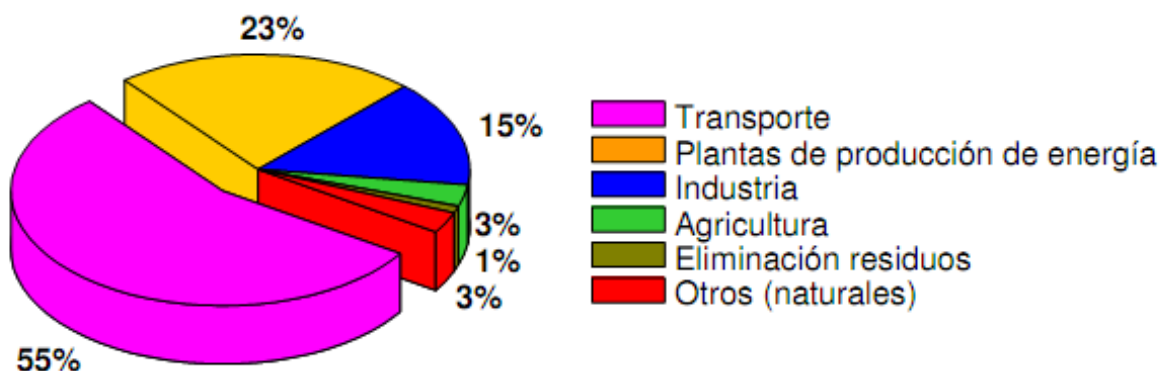


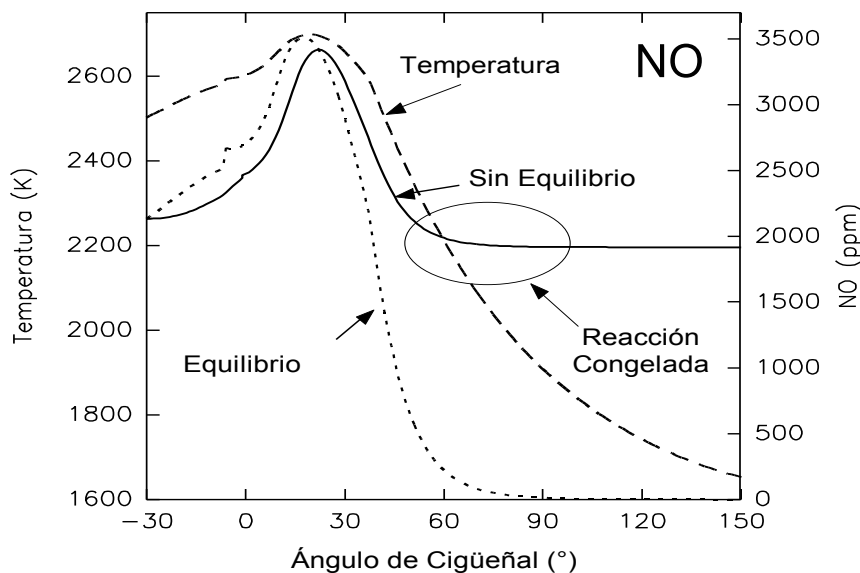
Figura 1.4: Emisión de Nox por sectores Fuente: Ministerio de medio ambiente [Ref. 2]

La reacción generada entre los combustibles fósiles y el aire constituido por nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %), y otras sustancias (1 %), da lugar a la emisión de óxidos de nitrógeno, principalmente NO y NO<sub>2</sub>, denominados generalmente como NOx. La fuente principal de NOx en los procesos de combustión como los que tienen lugar en los motores diesel, es la oxidación del nitrógeno molecular

(N<sub>2</sub>). Al óxido de nitrógeno formado a través de este proceso, se le denomina comúnmente como NOx térmico. Si el combustible utilizado en la combustión contiene nitrógeno, la oxidación del mismo significa una fuente adicional de NOx, aunque en unos porcentajes generalmente inferiores al 5%. Otras fuentes de generación de NOx son las denominadas como generación de NOx súbito en las zonas de la cámara de combustión donde las mezclas son muy ricas en combustible, por último, la generación de NOx procedente del N<sub>2</sub>O intermedio que puede tener lugar a bajas temperaturas (principalmente cuando se utilizan dosados relativos muy bajos o grandes cantidades de EGR).

Las concentraciones de equilibrio químico del NO derivado de la combustión, son despreciables, al enfriarse la mezcla de gases procedentes de la combustión en la carrera de expansión y escape. Pero en la práctica no se llega a alcanzar el equilibrio químico, y existe una importante diferencia entre las concentraciones de NO que corresponderían al equilibrio químico, y las concentraciones reales de NO que se obtienen en el escape de los motores de combustión interna alternativos.

En la combustión de un motor de encendido por compresión se producen reacciones en desequilibrio debido a que la apertura de la válvula de escape produce una congelación de la reacción derivando en un aumento de los NO tal y como se observa en la figura 1.5.

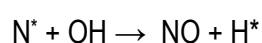
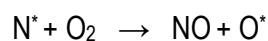
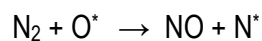


**Figura 1.5:** Emisión de Nox en función de la temperatura y del ángulo del cigüeñal. Fuente: Motores térmicos. Universidad de Valladolid [Ref. 3]

Como consecuencia cuanto más corto sea el Intervalo de tiempo existente desde el punto de máxima temperatura hasta el punto en el que se abre la válvula de escape más pronto se congela la reacción y por lo consiguiente mayor emisiones.

### 1.1.3.1 NO Térmico.

Los óxidos de nitrógeno se producen principalmente mediante el por esta vía, cuando se tiene una combustión con exceso de aire a alta temperatura. En estas condiciones el N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del aire se pueden combinar para formar los NOx mediante el mecanismo establecido por Zeldovich (1946). Ocurren las siguientes reacciones:



La formación del NO térmico crece exponencialmente con la temperatura y es considerable la cantidad del mismo que se puede generar en presencia de una llama con temperaturas alrededor de los 1500 K. Del mismo modo, cuando las temperaturas de combustión son inferiores a 1000 K, las emisiones de NO se reducen significativamente. La conversión es favorecida para altas temperaturas, donde se produce el pico de temperatura, e intervienen además como condiciones favorables el tiempo de residencia en la zona de llama y la concentración de oxígeno, siendo proporcional la formación de NO térmico a la raíz cuadrada de la concentración de oxígeno.

La formación de NOx térmico, es el mecanismo predominante por el que se producen las emisiones de NOx, cuando se queman combustibles líquidos. La formación de NOx térmico se realiza en el frente de llama.

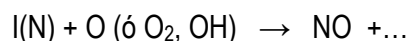
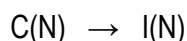
En la práctica la formación de NO térmico en un motor depende de:

- Parámetros de la combustión (temperatura, exceso de aire, cantidad de combustible etc.)
- Condiciones de operación del motor
- Diseño de la cámara
- Tiempo de residencia
- Características del combustible

Por esta vía el NO representa entre un 90% y un 95% de los NOx producidos a alta temperatura.

### 1.1.3.2 NO del combustible

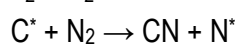
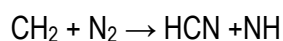
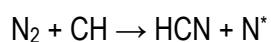
Se forma por oxidación del nitrógeno contenido en el combustible. Este tipo de formación de NOx que se realiza en el frente de llama, es menos relevante que la anterior debido a las cantidades de nitrógeno que contiene los combustibles. Por cada 0,1% de nitrógeno contenido en el combustible, se producen en el motor diesel aproximadamente 0,6 g/kWh de NOx. Los combustibles contienen compuestos nitrogenados donde el nitrógeno se encuentra enlazado dentro de estructuras aromáticas. La reacción de formación puede ser descrita como:



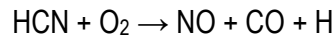
Donde C(N) es el nitrógeno en el combustible, mientras que I(N) representa intermediarios que contienen nitrógeno como CN, HCN, NH y NH<sub>2</sub>. Bajo condiciones reductoras, el nitrógeno enlazado al combustible C(N) se une para formar compuestos de nitrógeno, I(N), los cuales se oxidan fácilmente para formar NO. Esta formación es poco dependiente de la temperatura. [Ref. 5]

### 1.1.3.3 NO inmediato

Se produce por reacción de nitrógeno molecular con fragmentos de hidrocarburos en el frente de la llama. Los enlaces N=N pueden romperse fácilmente en presencia de radicales libres procedentes del combustible CH, CH<sub>2</sub>, etc. Según la teoría de Fenimore (1979). Estas reacciones se producen en atmósferas muy ricas en combustible con dosados locales en torno a 1.2 y a altas temperaturas.



Los compuestos acabaran formando NOx.

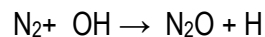
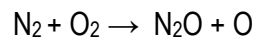
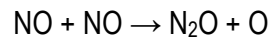


Existen numerosas teorías acerca de este tipo de formación de NOx. Este mecanismo es el de menor importancia relativa a la hora de contribuir a la formación de óxidos de nitrógeno. [Ref. 5]

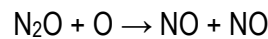
#### 1.1.3.4 NO a partir del N<sub>2</sub>O.

El NO que se genera en los procesos de combustión, puede provenir también a través de una cuarta vía, procedente de la generación intermedia de N<sub>2</sub>O. Este mecanismo de generación de NO, se produce principalmente cuando la combustión se produce a temperaturas bajas y mezclas pobres con dosados relativos inferiores a 0,8. Aparentemente se forma entre las temperaturas de 800 K y 1100 K en la zona de postcombustión. A temperaturas bajas, la molécula de N<sub>2</sub>O es relativamente estable, mientras que a temperaturas altas el N<sub>2</sub>O que se forma se reduce a N<sub>2</sub>.

Las reacciones principales que determinan la generación de N<sub>2</sub>O intermedio en los procesos de combustión, son las siguientes:



El mecanismo de generación de N<sub>2</sub>O aquí presentado, y que, como se ha comentado tiene lugar a bajas temperaturas, y en condiciones de mezcla pobre, se presenta como una fuente de generación de NO adicional, cuando el N<sub>2</sub>O es reacciona con los átomos de O para formar NO:



Esta reacción ha sido a menudo despreciada ya que generalmente no es una fuente significativa de NO en relación con el NO producido por las tres vías estudiadas anteriormente (térmico, procedente del N del combustible y súbito). Sin embargo, condiciones de mezcla pobre en combustible y bajas temperaturas, pueden hacer incrementar la cantidad de NO producido a través de la formación previa de N<sub>2</sub>O.

Los principales parámetros característicos que provocan la formación de NOx por este camino son:

- El nitrógeno contenido en el combustible
- Las características del combustible
- La concentración de nitrógeno del combustible liberada a la fase gaseosa en la zona de llama.
- Temperatura adecuada.
- Las condiciones de la combustión ya que varía según la velocidad de calentamiento.
- La adición del aire y la manera en que éste se mezcla con el combustible.
- Los parámetros de la combustión (especialmente el exceso de O<sub>2</sub>)
- El diseño del motor



Diversos estudios han demostrado, que el contenido en azufre del combustible utilizado en los motores diesel, repercute también en la formación de  $N_2O$ , de forma que, cuanto mayor es el contenido de azufre, mayores son las emisiones de  $N_2O$  de los motores diesel. [Ref. 6]

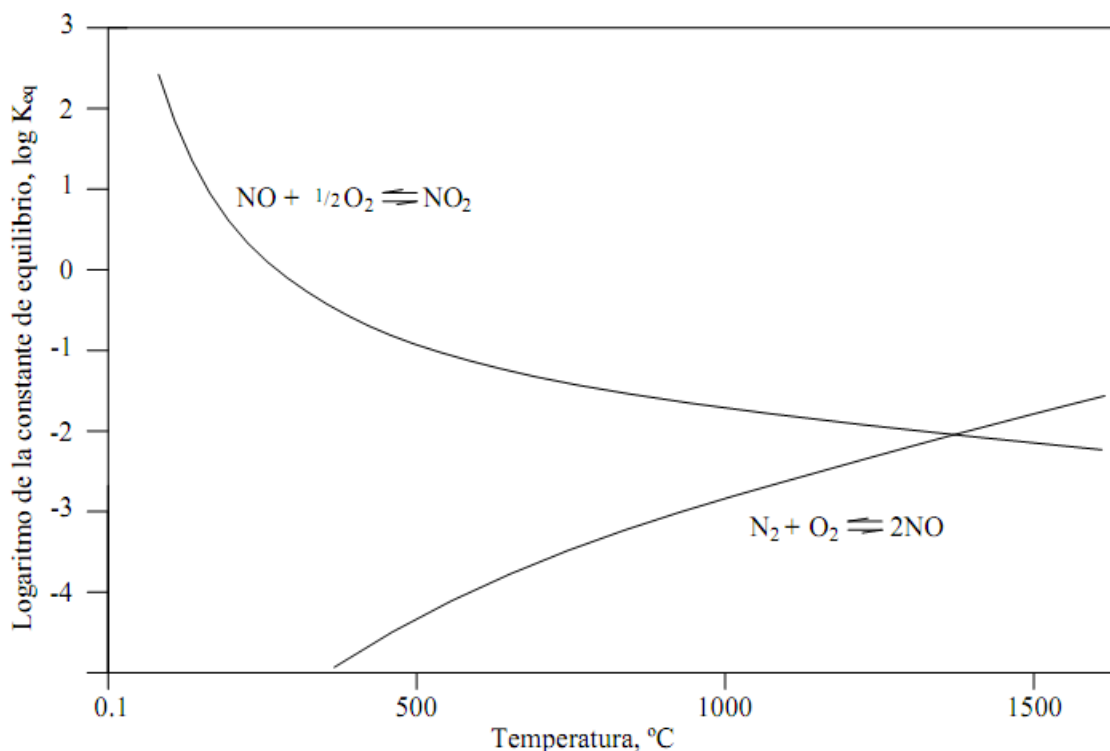
Las estrategias basadas en la reducción de la temperatura de combustión en los motores diesel (como la utilización de mezclas pobres homogéneas o elevadas tasas de EGR), pueden conducir a incrementos en las emisiones de  $N_2O$ . Por otro lado, en ensayos de laboratorio, se ha demostrado que en los procesos de Reducción Catalítica Selectiva (SCR) parte del  $NO_x$  reducido se transforma en  $N_2O$ , siendo este fenómeno más intenso cerca de la “ventana” de temperatura óptima del proceso. Con la inyección de amoníaco, entre el 3 y el 5% del  $NO_x$  reducido por los sistemas SCR sería transformado a  $N_2O$ .

### 1.1.3.5 $NO_2$ a partir de $NO$ .

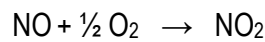
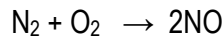
Considerando condiciones de equilibrio químico, obtendríamos que para una combustión en las condiciones de Presión y Temperatura como la que se produce en los motores de combustión interna alternativos, la relación  $NO_2/NO$  debería ser bastante pequeña.

Sin embargo, los datos experimentales muestran que esto no es así en los motores diesel (sí en los motores de encendido provocado), ya que la relación antes mencionada alcanza valores que, normalmente, oscilan entre el 10% y el 30%, esta diferencia es debida principalmente al tipo de combustión en los motores de encendido por compresión, que se trabaja con exceso de oxígeno.

La diferencia de esta relación se demuestra a continuación. El monóxido de nitrógeno que se forma en el frente de llama a alta temperatura puede convertirse rápidamente en dióxido de nitrógeno al salir desprendido del frente de llama a zonas más frías de la cámara de combustión tal y como se muestra en la siguiente figura 1.6:



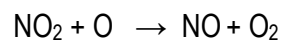
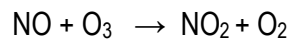
**Figura 1.6:** Constante de equilibrio de la formación de  $NO$  y  $NO_2$  en función de la temperatura. Fuente: Tesis doctoral Reducción de emisiones contaminantes en grandes instalaciones de combustión. Ismael Prieto. [Ref. 4]



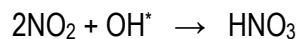
En los procesos reales de combustión las reacciones anteriores ocurren simultáneamente. Según datos termodinámicos a temperatura ambiente se formará poco NO y por lo tanto poco NO<sub>2</sub> y cualquier cantidad de NO reaccionará para constituir NO<sub>2</sub>. A temperaturas convencionales de combustión (>1550 K) se produce una formación apreciable de NO, con cantidades despreciables de NO<sub>2</sub>. Sin embargo, todos los gases de la combustión se enfrían rápidamente, esto hace que la temperatura desplace la composición de equilibrio del NO y NO<sub>2</sub>. Si hay presencia de oxígeno, a medida que se enfríe el gas, se favorecerá la conversión del NO a NO<sub>2</sub>. No obstante, esta reacción está limitada cinéticamente. Por tanto, la concentración final de los óxidos de nitrógeno en los gases de combustión queda esencialmente bloqueada a los valores hallados durante su formación a temperaturas más altas, es decir la especie predominante es el NO. [Ref. 7]

### 1.1.4 Efectos de los NOx sobre la salud y el medio ambiente

Los óxidos de nitrógeno juegan un papel importante en la fotoquímica de la troposfera y la estratosfera debido a su participación en varias reacciones fotoquímicas. Los óxidos de nitrógeno producidos por el hombre están compuestos principalmente de NO y estas especies son fácilmente oxidables a NO<sub>2</sub> promoviendo la destrucción de la capa de ozono según las reacciones:



Además, el NO<sub>2</sub> puede reaccionar con radicales de hidróxido para formar ácido nítrico que al ser soluble en agua, condensa y contribuya a la acidificación en forma de lluvia ácida según la reacción:



La lluvia ácida es responsable de la perturbación de los ecosistemas causando la muerte biológica de lagos y ríos. En menor medida, el NOx y los compuestos orgánicos volátiles reaccionan fotoquímicamente en las capas atmosféricas más bajas y producen nitrato de peroxiacetilo (PAN), nitrato de peroxibenzolilo (PBN) y otros agentes oxidantes que facilitan la formación de smog o niebla contaminante.

Una exposición breve al NO<sub>2</sub> puede provocar irritación del sistema respiratorio y ocular. A largo plazo, los principales efectos pueden ser un desarrollo pulmonar más lento en los niños y la aparición de enfermedades respiratorias crónicas y cerebrovasculares. [Ref. 8]

## 1.2 Objetivos

El desarrollo tecnológico, la necesidad inherente del transporte y el crecimiento exponencial de la población en los últimos años han incrementado el número de vehículos motorizados de forma masiva. Como consecuencia, la contaminación del aire es cada vez más evidente llegando a convertirse en un problema grave a nivel global que es obligatorio subsanar. Con ello añadir el crecimiento de la venta de vehículos diesel tal como se mostró en el apartado anterior unido a los efectos que causan sus emisiones a los seres vivos y al medio ambiente. La principal problemática de los vehículos diesel es el incremento de las emisiones de NOx debido a sus condiciones de operación (atmósfera oxidante).

Para el control de las emisiones de NOx y el cumplimiento de la normativa Euro 6 que acaba de entrar en regulación, existen numerosas medidas tecnológicas vigentes y algunas que están en desarrollo. El objeto del presente proyecto es el conocimiento de las técnicas de control de NOx en motores diesel, y

el estudio en profundidad del sistema de recirculación de gases de escape de alta y baja presión haciendo una comparativa entre ambos. Para ello se pretende alcanzar los siguientes subobjetivos:

- Conocimiento de las medidas activas anticontaminantes que limitan las emisiones de NOx de los vehículos dotados de motores de combustión por compresión.
- Comprensión de los sistemas pasivos implantados que limitan las emisiones de NOx en los motores diésel.
- Influencia de los sistemas de recirculación de gas inerte (EGR) en el comportamiento del motor.
- Estudio de la capacidad de los sistemas de recirculación de gas inerte en la limitación de formación de óxidos de nitrógeno.
- Comparativa de la influencia de distintas EGR según el lugar de extracción e inclusión del gas inerte, (EGR de alta y baja presión) en diferentes parámetros del motor. De las dos alternativas uno de los objetivos principales del presente trabajo es determinar cuál de ellas presenta un mejor compromiso entre la reducción en la formación de óxidos de nitrógeno y un menor impacto en las prestaciones del motor.



## 2 TÉCNICAS DE CONTROL EN LA DISMINUCIÓN DE NO<sub>x</sub>

### 2.1 Técnicas activas

Estas medidas son capaces de evitar que se produzca la formación de NO<sub>x</sub> durante el proceso de combustión mediante técnicas de control de dicho proceso (la principal causa de producción de NO<sub>x</sub> es la oxidación del nitrógeno molecular atmosférico a altas temperaturas durante el proceso de combustión). Actúan preferentemente sobre los mecanismos de formación del NO<sub>x</sub> térmico (fuente de más del 90% del NO<sub>x</sub> emitido por los motores de combustión), y sobre la formación del NO<sub>x</sub> procedente de la oxidación del nitrógeno contenido en el combustible.

Podemos dividir asimismo estas técnicas en dos categorías. Aquellas que actúan sobre la temperatura de combustión, y aquellas técnicas basadas en la relación aire/combustible, debido a que la velocidad de formación de NO<sub>x</sub>, también se ve influenciada por ella.

#### 2.1.1 Recirculación de gases de escape. Clasificación.

La recirculación de gases de escape es un sistema que consiste en redirigir una parte de los gases de escape de los motores de combustión hacia el colector de admisión, para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno.

La EGR funciona principalmente, a baja y media carga del motor y a baja velocidad. La proporción de gas recirculado se adecúa para cada motor con la principal finalidad de disminuir la temperatura en la cámara de combustión y la presencia de oxígeno con el objetivo de disminuir la formación de los NO<sub>x</sub>.

Existen diferentes métodos de recirculación, los más importantes se describen a continuación.

- Según el lugar de extracción de los gases a recircular.
  - EGR interno: técnica basada en el aprovechamiento de los reflujos en las válvulas para atrapar parte de los gases residuales en el cilindro. Tiene como ventaja la simplicidad constructiva y la independencia de gradiente de presión entre escape y admisión. Su funcionamiento está basado en un diseño particular de la distribución en la cual un perfil peculiar de las levas de escape permite que estas se reabran durante la carrera de admisión en un punto en que la presión de escape es superior a la del cilindro. De esta manera el gas inerte es devuelto al cilindro. Pese a su simplicidad tiene varios inconvenientes como son las altas temperaturas del gas, que hacen que reduzcan la masa admitida y por lo tanto la necesidad de altas presiones de sobrealimentación y la dificultad de regulación que presentan. Además a más temperatura de la mezcla menos efectividad de restricción en formación de NO<sub>x</sub>
  - EGR externo: En esta técnica el gas recirculado procede de algún punto del escape introduciéndolo en la admisión debido a la diferencia de presión. Este sistema necesita una válvula para regular los gases recirculados. Los puntos de colocación son de gran importancia puesto que la diferencia de presión determinará la tasa de EGR recirculada.
- En el caso de los sistemas de EGR externo se puede realizar ramificación (ver figura 4.1).
  - EGR de alta presión: Este sistema consiste en extraer el gas inerte aguas arriba de la turbina e introducirlo después del compresor de tal manera que el conjunto está a una presión superior a la atmosférica. El gradiente de presión de los colectores y la posición de la válvula determinan la tasa de gas recirculado. El salto de presión limita el gas para altas tasas. Bajo ciertas circunstancias la presión de admisión puede ser superior a la de escape invirtiendo el sentido de los gases, aunque debido a las pequeñas presiones alcanzadas por el compresor en motores de pequeña cilindrada

es casi imposible que suceda. Existe la posibilidad de introducir válvula de estrangulamiento de la admisión.

- EGR de baja presión: En esta técnica, el gas recirculado se extrae aguas abajo de la turbina para llevarlo hasta la entrada del compresor. El gas se suele tomar después de los sistemas de postratamientos para no dañar el compresor. En este sistema no se puede invertir la dirección del flujo; para conseguir más tasa se suele recurrir a una válvula de contrapresión del escape, provocando mayores pérdidas de bombeo.
- Según la temperatura del gas recirculado
  - EGR caliente: la cual no existe ningún sistema de enfriamiento del gas recirculado. Este tipo de EGR tiene un efecto importante en la temperatura de admisión provocando un aumento de emisiones de NOx. Este tipo de sistema es favorable en determinadas circunstancias como en los arranques en frío favoreciendo el inicio de la combustión y reduciendo la dispersión cíclica del motor.
  - EGR frío: En este sistema el gas recirculado se enfría en un intercambiador para no influir en la temperatura de admisión. De esta manera mejoran las prestaciones del motor. Se debe tener precaución con la condensación del vapor de agua presente en el gas recirculado.
- Según la masa admitida
  - EGR de adición: En este tipo de EGR la masa de aire fresco del motor permanece constante con la introducción de masa inerte. Este tipo de EGR se suele usar en los motores de encendido provocado debido a que la mezcla debe de ser estequiométrica por tipología de los sistemas postratamientos.
  - EGR de sustitución: en este caso la masa total admitida permanece constante, la masa inerte ocupa parte del aire fresco. Este sistema es utilizado en los motores de encendido por compresión. [Ref. 9] [Ref. 10]

### 2.1.2 Adición de agua

La adición de agua al proceso de combustión en un motor diesel reduce las emisiones de NOx debido a la reducción de la temperatura de la combustión que ocasiona la utilización de dicho sistema. El agua es un inhibidor de la reacción de combustión, en esto se basan los sistemas de inyección de agua.

$\uparrow \text{Agua} \rightarrow \downarrow C_{CL} \rightarrow \downarrow C_C \rightarrow \downarrow \text{Temperatura Ciclo} \rightarrow \downarrow \text{NOx}$

Donde:

Velocidad de combustión ( $C_C$ ): Es la parte de la velocidad del frente que es consecuencia del trasvase de masa desde la zona fresca a la zona quemada fruto de la combustión

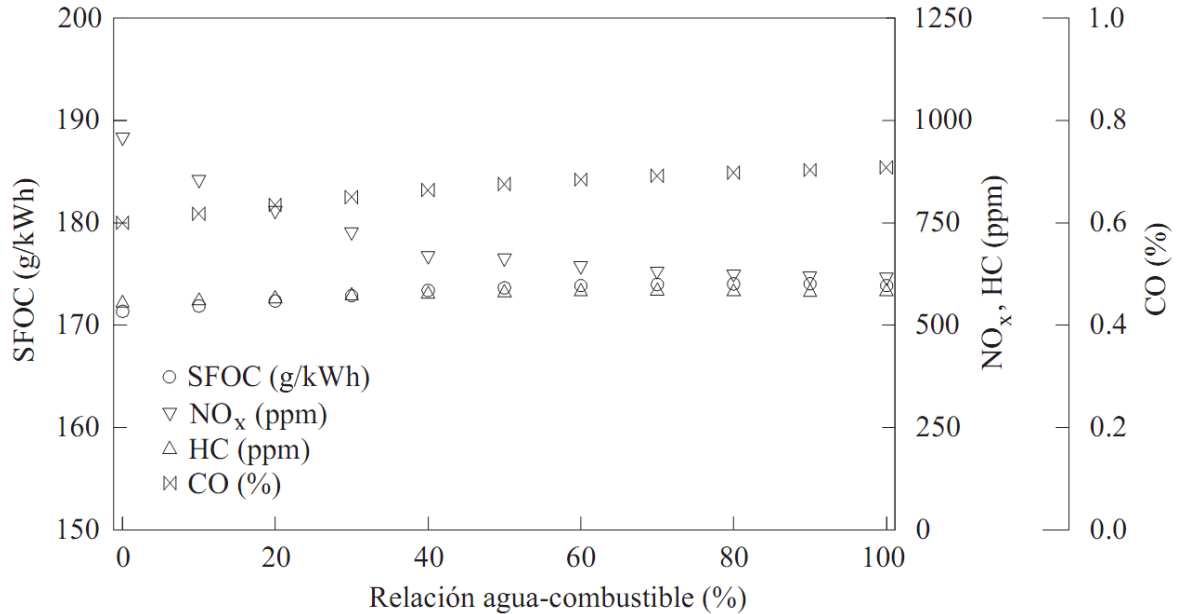
La velocidad de combustión laminar ( $C_{CL}$ ) es aquella con la que progresa el frente en ausencia de turbulencia.

Existen varias formas de añadir agua en el proceso de combustión en un motor diesel, entre las que destacan las siguientes:

- Emulsión de agua en el combustible.

Es posible mezclar agua con combustible e inyectarlo posteriormente en el interior del cilindro para conseguir una reducción de las emisiones de NOx, debido a la disminución de la temperatura pico de la mezcla que conseguiremos durante la combustión. El agua absorbe energía por evaporación, incrementando el calor específico de los gases en el cilindro y reduce la concentración total de oxígeno, lo cual supone un incremento en el número de moles de gases

que debe ser elevado a temperaturas de combustión para hacer reaccionar una cantidad dada de oxígeno con el combustible. El agua también reduce la disponibilidad de oxígeno para la reacciones de formación de NO<sub>x</sub>. Así, podríamos conseguir reducciones en las emisiones de NO<sub>x</sub> en torno al 50% cuando usamos cantidades significantes de agua, tal y como se observa en la siguiente figura 2.1.

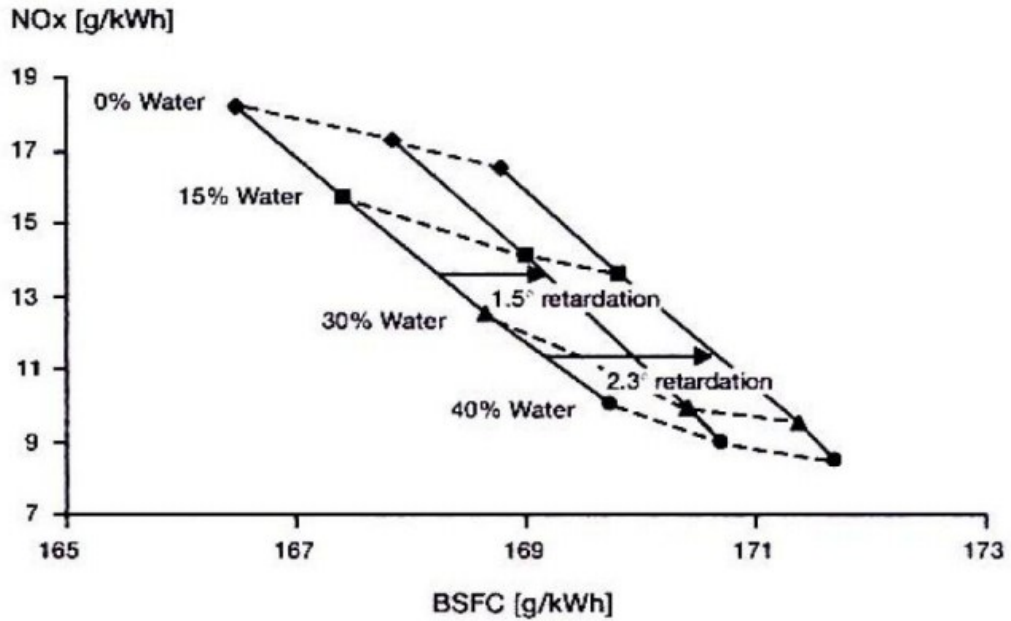


**Figura 2.1:** SFOC, NO<sub>x</sub>, HC y CO en función de la proporción agua-combustible. Fuente: Universidad de Ferrol Carlos Gervasio Rodríguez Vidal, María Isabel Lamas Galdo. [Ref. 11]

En el ensayo se observa cómo para un 40% de adición de agua se reduce la formación de NO<sub>x</sub> en un 40%. Aunque se ve un incremento de HC y CO causado por las temperaturas más bajas, lo cual provoca combustiones más lentas y combustión parcial. El SFOC también se ve incrementado debido a la disminución de la eficiencia por combustión incompleta.

Este proceso puede presentar más inconvenientes, como son los siguientes:

- Carácter corrosivo del agua
- Si no se realizan cambios en los sistemas de inyección se pierde potencia debido a que éstos están diseñados para unos caudales máximos.
- Se necesita una temperatura más elevada al tener la mezcla mayor viscosidad.
- Grado de fiabilidad reducido.
- Retardo del comienzo de la inyección y aumento del consumo específico tal y como se observa en la figura 2.2.

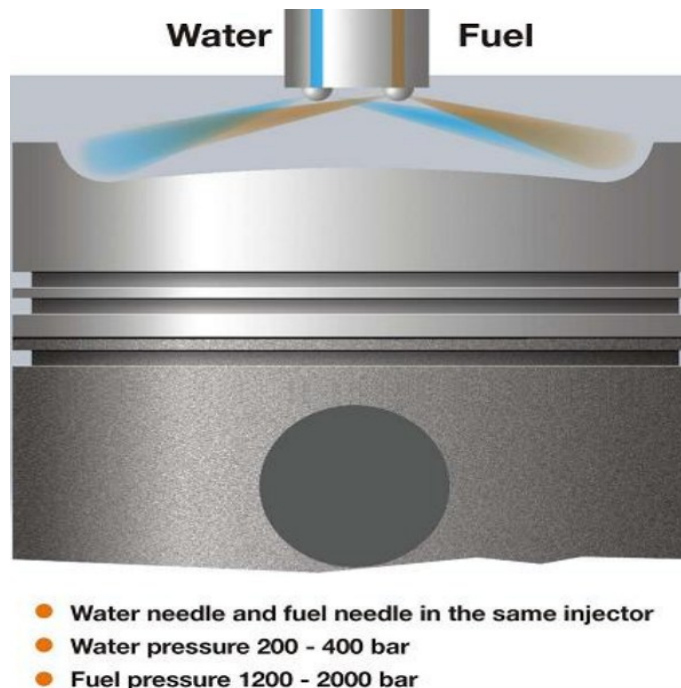


**Figura 2.2:** Efecto de la emulsión de agua y el timing del comienzo de la inyección en las emisiones y el consumo de combustible de un motor diesel. Fuente: NON-ROAD DIESEL EMISSION REDUCTION STUDY [Ref.Web 6]

- Inyección directa del agua en la cámara de combustión.

Técnica que consiste en la inyección de agua directa en la cámara de combustión a través de un sistema de inyección que funcionaría en paralelo con el sistema de inyección de combustible. Esta técnica tiene alguna ventaja frente a la anterior entre la que se destaca:

- Posibilidad de añadir agua con un tiempo distinto al de la adición de combustible. De esta forma, podremos inyectar el agua en el momento más adecuado para el proceso de combustión, sin la necesidad de otro inyector tal y como se observa en la figura 2.3.

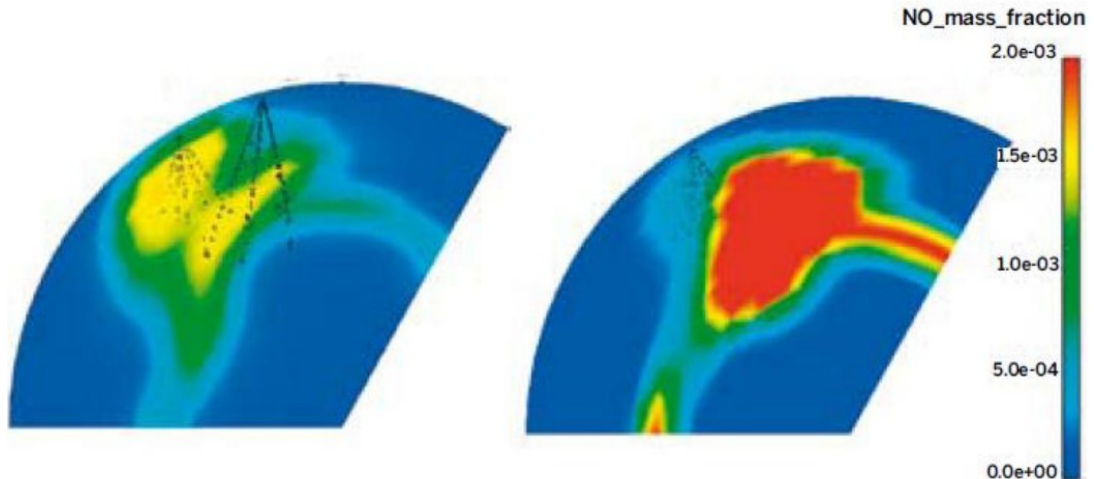


**Figura 2.3:** Esquema inyección de agua y combustible en el mismo inyector. Fuente: EMISSION CONTROL. Göran Hellén. Wärtsilä Finland Oy. Technology Engine Division [Ref. 12]



- Posibilidad de mantener las prestaciones del motor sin necesidad de realización de cambios importantes en el sistema de inyección. Así como de inyectar el agua en la zona de la cámara de combustión más adecuada para la reducción de emisiones de NOx.

En la siguiente figura 2.4 se muestra la masa de NOx en un cilindro con dos tipos de configuración inyección directa e inyección directa de combustible y agua.

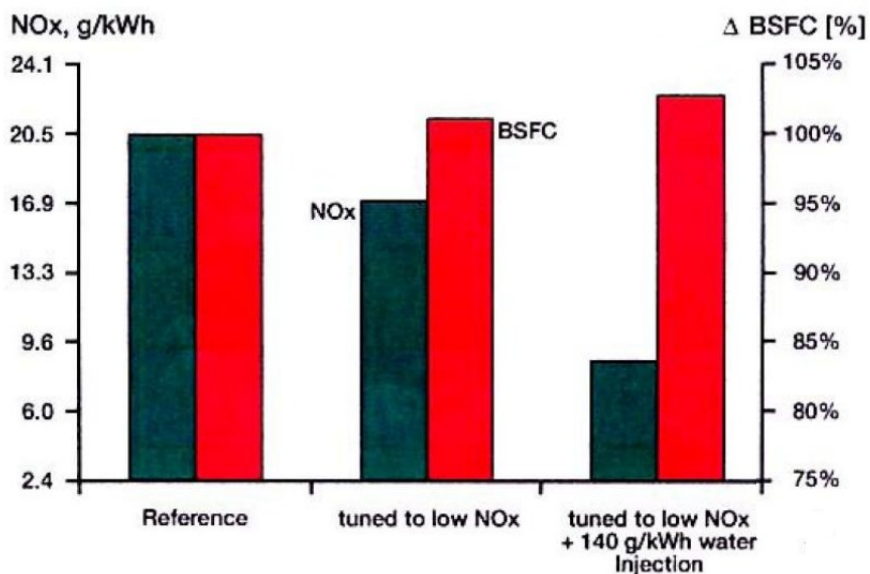


**Figura 2.4:** Simulación de un proceso de combustión con inyección de agua (izquierda), y sin inyección de agua (derecha). Fuente: NEXT STEPS IN EXHAUST EMISSIONS CONTROL FOR WÄRTSILÄ LOW-SPEED ENGINES. David Brown, Rudolf Holtbecker [Ref. 13]

En la figura 2.4 se puede observar que la inyección de agua tiene lugar directamente en la zona de mayor concentración de NOx y la inyección se ha realizado en el punto óptimo de funcionamiento de la técnica.

Características importantes de este sistema:

- Los ratios de consumo de agua/combustible empleados son del orden de 0,4 a 0,7 en peso.
- Se puede instalar en motores existentes
- Se pueden conseguir reducciones del 50% - 60% en formación de NOx aunque penalizando el consumo específico de combustible. En la siguiente figura 2.5 se observa cómo se consigue este objetivo.



**Figura 2.5:** Reducciones de las emisiones de NOx en un motor diesel Sulzer 4RTX54 a través de la inyección directa de agua. Fuente: NON-ROAD DIESEL EMISSION REDUCTION STUDY [Ref. 7]

Inconvenientes más comunes del sistema

- Las gotas de agua en fase líquida puedan alcanzar la superficie interna del cilindro, debido a que en este caso, el agua podría destruir la capa de aceite de lubricación y dañar el funcionamiento del motor.
- Incremento de los costes de mantenimiento.
- Problemas potenciales de corrosión.
- Reducción del grado de fiabilidad de los motores.
- Alto coste del sistema de inyección de agua.
- Adición de agua en el aire de admisión.

La última técnica de añadir agua en la mezcla de aire-combustible consistiría en añadir agua evaporada al aire de admisión que fluye por el colector de admisión antes de introducirlo en el cilindro. Las expectativas de reducción de emisiones de NOx que se pueden conseguir con este proceso son similares a las conseguidas con las técnicas explicadas, pudiéndose conseguir reducciones del orden del 10% en las emisiones de NOx por cada 20% de porcentaje de agua añadido.

Las principales ventajas de este sistema son las siguientes:

- Costes de inversión bajos.
- Se consiguen reducciones de las emisiones de NOx del orden del 50% al 60% con leves penalizaciones en el consumo específico.
- Los motores pueden operar con el sistema de humidificación desconectado si fuera necesario.

Los principales inconvenientes son:

- Consumo de agua limpia relativamente elevado.
- Costes de producción del agua limpia.
- La temperatura del aire tiene que ser elevada en ocasiones para evitar la condensación de agua en el conducto de admisión de aire. [Ref. 7]

### 2.1.3 Tecnología SKYACTIV – D

La tecnología Skyactiv es una estrategia de fabricación implementada por Mazda. No solamente se basa en la mejora de los motores sino que también afecta a la carrocería y transmisiones. Dicha tecnología se centra en la reducción de peso y mejora de la eficiencia, aumentando el rendimiento, comportamiento y seguridad del vehículo.

La principal baza es la disminución de la relación de compresión a 14:1, una baja relación de compresión reduce la temperatura y la presión de combustión cuando el pistón está en punto muerto superior. Además permite avanzar el momento de inyección aumentando la carrera de expansión respecto a los motores con una compresión más alta, por lo tanto, la ignición es más lenta y se mejora la mezcla del aire y el combustible. De esta manera, la combustión es más uniforme, limpia y genera menor consumo y menor emisión de partículas y NOx.

Un decremento de la relación de compresión hace posible un adelanto en la inyección del combustible, consiguiendo un tiempo de retraso mayor y por lo consiguiente una mezcla más homogénea tal y como se muestra en la figura 2.6.

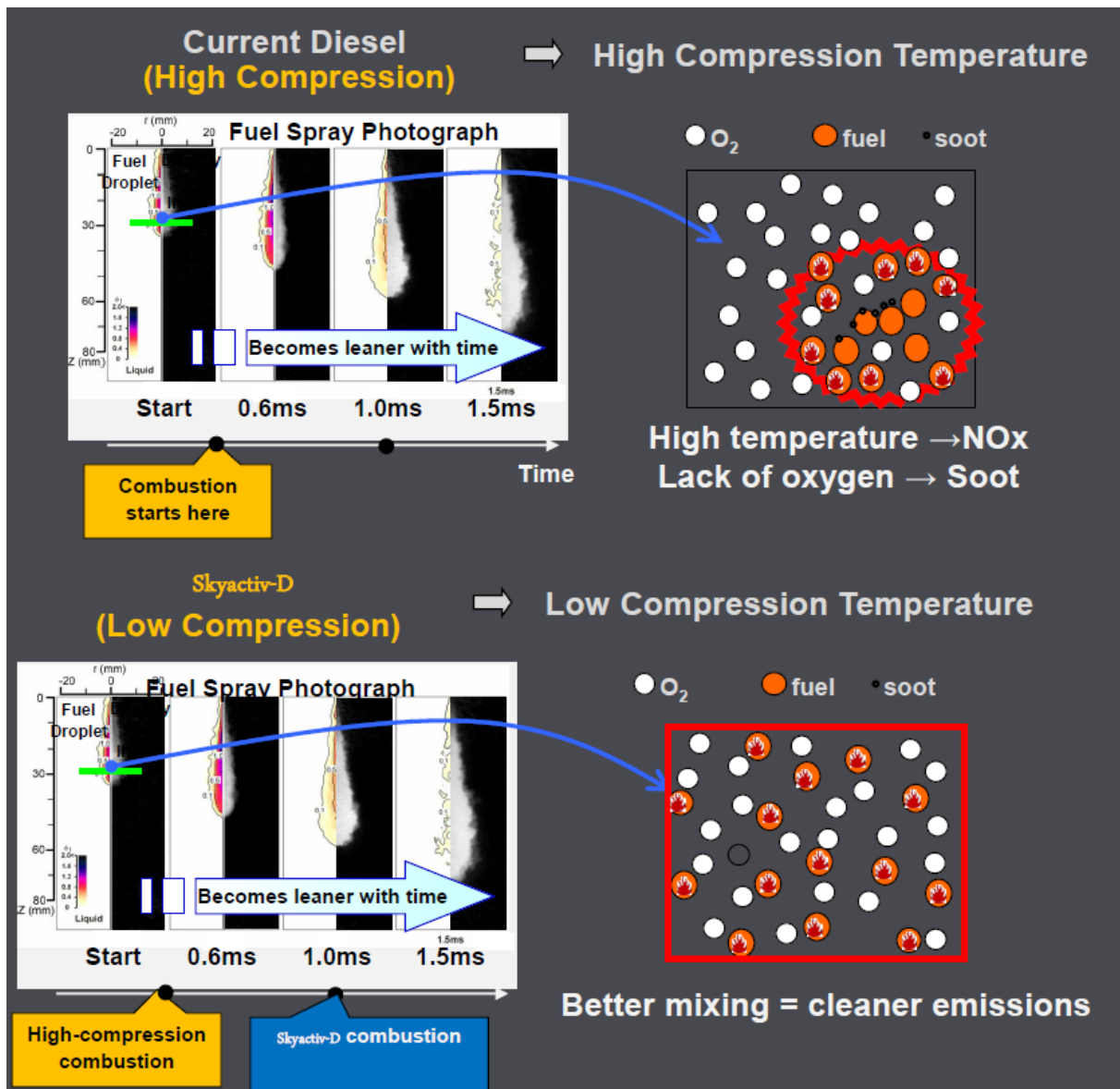


Figura 2.6: Comparativa combustión según compresión. Fuente: Mazda [Ref.Web 7]

Para evitar que la baja relación de compresión afecte en el funcionamiento en frío del motor, se constituye de un sistema de levantamiento de válvulas variable en el escape.

Este sistema permite mantener ligeramente abierta la válvula de escape durante la fase de admisión, posibilita la entrada de gases calientes al cilindro aumentando así la temperatura en la cámara de combustión. De esta manera, mientras el motor alcanza su temperatura óptima, se facilita la ignición de la mezcla evitando fallos de encendido.

Una baja relación de compresión en un motor diésel provoca generalmente problemas a la hora de arrancar en frío. Para solucionar este aspecto, se ha equipado este motor con bujías incandescentes cerámicas, piezoinyectores de orificios múltiples, el motor debe estar en un punto estratégico para el próximo arranque y un sistema de control variable de las válvulas de escape.

Se consigue un sistema que consigue una entrega de par más plana durante todo el rango de revoluciones con transiciones más lineales con la incorporación de un turbo de dos etapas que consiste en la aplicación de dos turbocompresores de diferentes dimensiones que actúan conjuntamente según las necesidades de la marcha. A menor carga motor, el turbo pequeño ofrece una respuesta más rápida, evitando retrasos en la entrega del par motor. Con una mayor carga motor, el turbo de mayor dimensión ofrece más potencia.

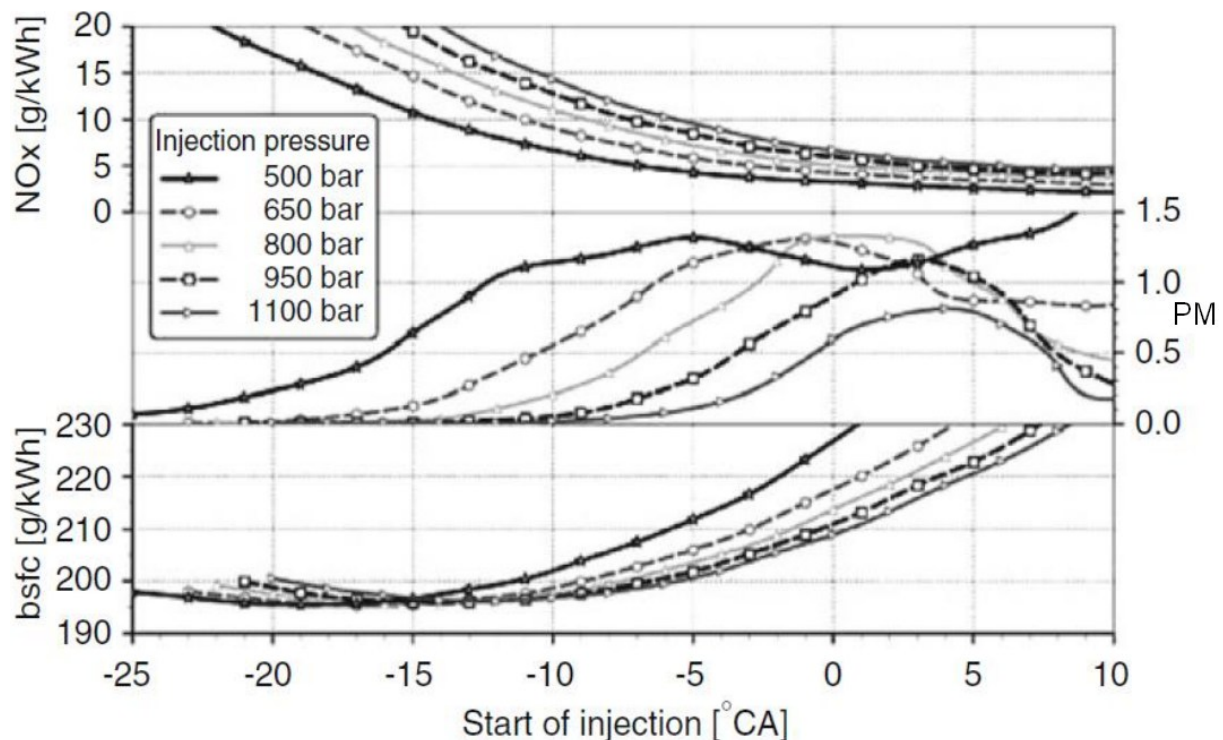
La baja relación de compresión también se traduce en una menor tensión en los componentes y esto permite reducir el peso. Las paredes de la culata de este motor son más delgadas, mientras que su bloque de cilindro es de aluminio.

Las ventajas descritas anteriormente permiten bajar emisiones de NO<sub>x</sub>, esto hace que sea el único motor capaz de homologar EURO 6 sin sistemas de postratamiento.

## 2.1.4 Otras técnicas

### • Modificando la presión de inyección de combustible

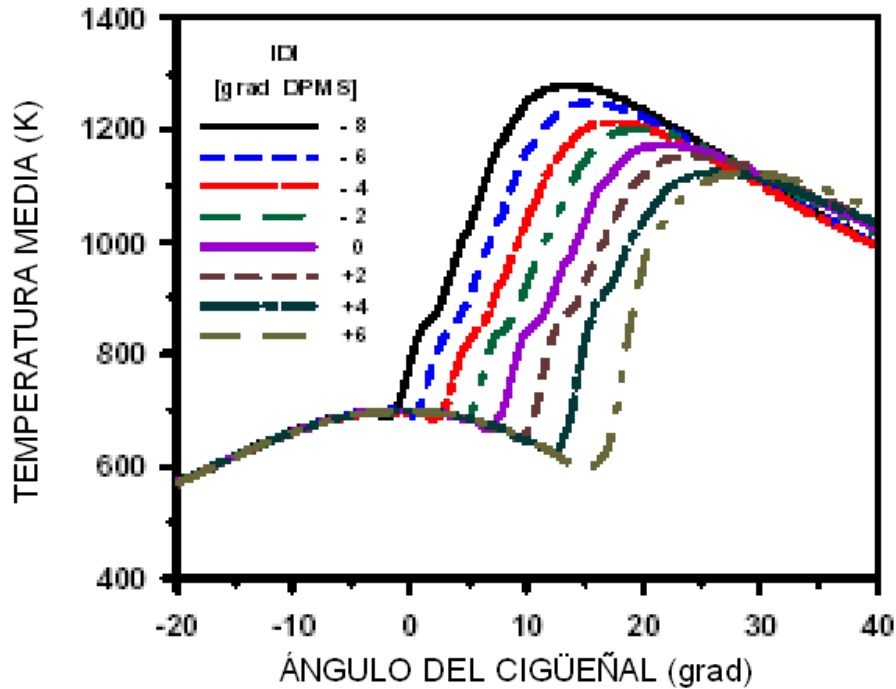
Modificando la presión de inyección de combustible se consigue reducir la presión máxima y así la temperatura en el cilindro. Sin embargo, no se reduce la temperatura pico solamente, sino también la temperatura media provocando una reducción de la eficiencia térmica del motor, así como un incremento del consumo de combustible y de las partículas. En la figura 2.7 se observa como con un retraso de la inyección de dos grados se reduce la presión máxima en 10 bar, las emisiones de NO<sub>x</sub> se ven reducidas en un 10%, pero el consumo de combustible aumenta en torno a 3 g/kWh. Con este método se puede llegar a reducir un 25% las emisiones de NO<sub>x</sub>.



**Figura 2.7:** NO<sub>x</sub>, Partículas y consumo según presión de inyección. Fuente: HANDBOOK OF DIESEL ENGINES. Klaus Mollenhauer, Helmut Tschöke. [Ref. 14]

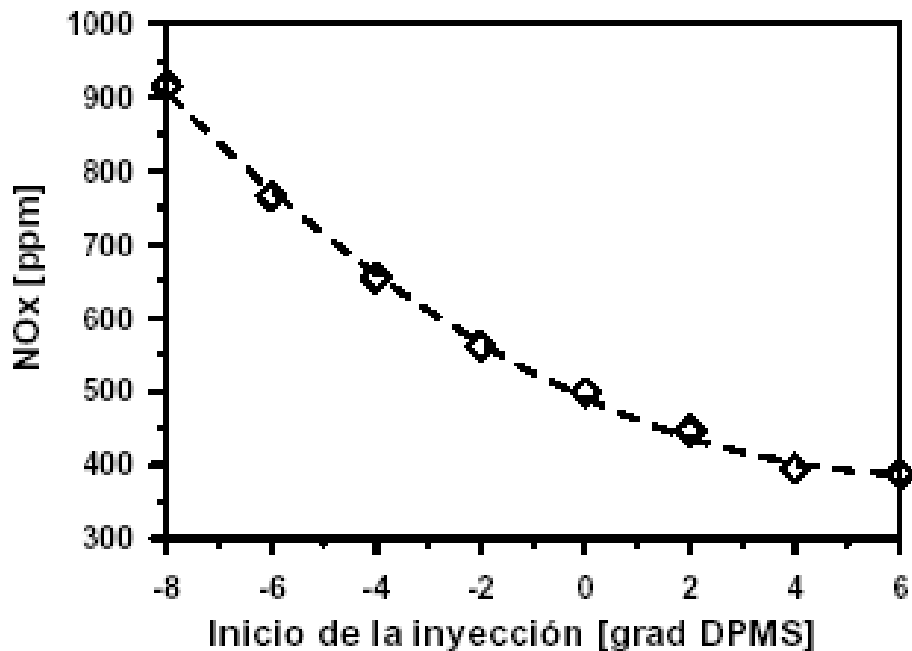
### • Modificando el tiempo de inyección de combustible

Modificando el tiempo de inyección de combustible se consigue bajar la presión y la temperatura en cilindro. Como se comentó en el capítulo uno, el 90% de la formación de los óxidos de nitrógeno se realizan mediante el mecanismo NO<sub>TÉRMICO</sub>. En la figura 2.8 se muestra como la temperatura disminuye 200 K aproximadamente con un retraso de la inyección de 12°.



**Figura 2.8:** Temperatura media en función del tiempo de inyección. Fuente: Estudio numérico de la reducción simultánea de nox y hollín en un motor diésel [Ref. 15]

En la figura 2.9 se observa como la formación de NOx se reducen en un 60% con una diferencia en el tiempo de inyección de 14°.



**Figura 2.9:** Emisión de NOx en función del ángulo de inyección. Fuente: Estudio numérico de la reducción simultánea de nox y hollín en un motor diésel [Ref. 15]

Existen otras variaciones en el timing de la inyección, la pre-inyección y la pos-inyección que afectan directamente en el consumo de combustible y en la emisión de contaminantes como pueden ser NOx y partículas.

- **Utilización del ciclo Miller**

El ciclo Miller es una modificación del ciclo estándar, en la cual se modifica el tiempo de apertura de la válvula de admisión, mejorando de esta manera la renovación del aire y la introducción de aire fresco con la ayuda de sobrealimentación.

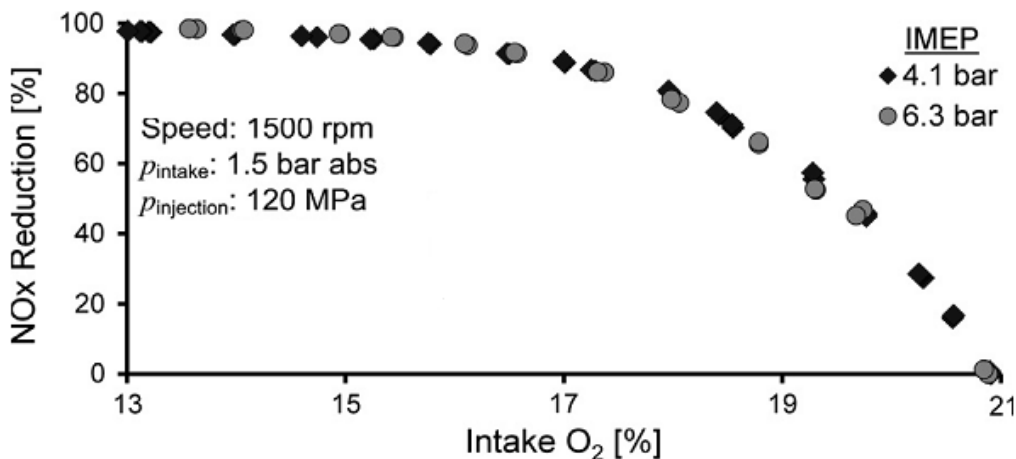
Con este ciclo se consigue disminuir la temperatura de inicio y la temperatura media del ciclo reduciendo la formación de NOx. De igual manera se reduce el consumo específico de combustible en torno a 1 – 2 g/Kwh.

Según un ensayo de *Wartsila* la reducción de emisión de NOx con el empleo del ciclo Miller esta en torno al 15 – 20% sin aumentar el consumo específico de combustible. [Ref. 16]

- **Ajuste de la relación aire combustible**

Esta relación es uno de los factores más importantes en la reducción de formación de NOx en los motores de encendido por compresión. Consiguiendo bajar la concentración de oxígeno en admisión conseguimos disminuir la concentración de oxígeno en el frente de llama, por lo tanto la oxidación del N<sub>2</sub> se complica. Por otro lado se reduce temperatura media y pico de la combustión.

En la siguiente figura 2.10 se puede ver cómo variando la proporción de oxígeno en la mezcla logramos la reducción de formación de NOx por este método.



**Figura 2.10:** Reducción de NOx en función del porcentaje de O<sub>2</sub>. Fuente: Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycle. Usman Asad, Ming Zheng [Ref. 17]

Se debe tener en cuenta que mezclas muy pobres se reduce las emisiones de NOx porque la velocidad de combustión y la temperatura alcanzada es muy baja. Mezclas con un dosado cerca del estequiométrico (0.95) aumentan las emisiones de óxidos de nitrógeno debido a que hay suficiente oxígeno para que el N<sub>2</sub> del aire se oxide ( $N_2 + 2O_2 \rightarrow 2NO$ ) y la velocidad de combustión es alta. Mientras que para dosados ricos (por encima del estequiométrico) los NOx se ven reducidos, por un lado por la falta de oxígeno para oxidar el nitrógeno, y por otro por la reducción de la velocidad de combustión.

El principal compromiso consiste en la correcta elección de la relación aire-combustible de forma que se combinen adecuadamente las emisiones de NOx, sin que afecte a otros parámetros como pueden ser la potencia del motor y el consumo específico entre otros, así como también las emisiones de partículas y otros contaminantes. [Ref.Web 8]

- **Alta relación de compresión**

Esta técnica se lleva a cabo para disminuir la formación de NOx formados a partir del incremento de presión durante la combustión. Para restablecer los incrementos en el consumo de combustible que se provocaban con la técnica del retraso de la inyección, se incrementa la relación de compresión del motor, de esta manera las emisiones de NOx son menores sin penalizar en el consumo de combustible.

El incremento de la presión provocado por el proceso de combustión causa una sobrepresión de los gases contenidos en la cámara de combustión que fueron comprimidos inicialmente por el pistón y son comprimidos después durante el proceso de combustión. Esta post-compresión conduce a la elevación de la temperatura pico en la cámara de combustión. Si conseguimos no incrementar la presión durante la combustión, se pueden reducir de forma significativa las emisiones de NOx. Desafortunadamente, esto no se puede conseguir de forma simple.

Se puede conseguir una combustión a presión cuasi-constante sin tener una pérdida de eficiencia térmica incrementando la presión de la compresión por un lado y retardando la inyección de combustible por otro o aplicando la multi-inyección. La presión de compresión puede ser incrementada mediante el incremento de la relación de compresión geométrica, variando el tiempo de apertura/cierre de las válvulas de admisión y escape, o incrementando la presión de entrada del aire de admisión al cilindro. Con este sistema, podríamos llegar a conseguir reducciones en la emisión de NOx del orden del 25% sin incrementos significativos en el consumo de combustible. [Ref. 16]

- **Formación de la mezcla**

La distribución del combustible en el interior de la cámara interviene en el factor más determinante en la formación de NOx, debido a que influye directamente en la transferencia de calor, así como en la distribución de temperaturas en el cilindro a lo largo del ciclo térmico del motor, por lo que es obvia la influencia en las emisiones de NOx así como en otros parámetros como puede ser la potencia y el consumo específico entre otros.

La distribución del combustible en el interior del cilindro se ve determinada por diversos factores como pueden ser: el diseño del sistema de inyección de combustible (nº de inyectores, diámetro de los mismos, presión de inyección, orientación para mejorar la distribución del combustible,...), la duración y el ángulo de comienzo de la inyección, el diseño de la cámara de combustión, así como su compacidad.

Con la optimización de esta técnica se pueden conseguir reducciones considerables en las emisiones de NOx, incluso del 30%, variando de forma conjunta las técnicas que se detallan a continuación. Incrementar la atomización del combustible, lleva a una mejor combustión, una mayor eficiencia térmica indicada, y a reducciones en las emisiones de NOx y partículas, en general. Retrasando la inyección se consigue una reducción de NOx tal y como se vio en el punto anterior. De igual manera modificando el diseño de la cámara se consigue una distribución más homogénea que facilita la combustión. No obstante hay que tener cuidado con el diseño de la cámara debido a que las cámaras compactas producen mayores emisiones de NOx.

Compacidad de cámara

$\uparrow$  Compacidad  $\rightarrow$   $\downarrow$  A/V  $\rightarrow$   $\downarrow$  Qw  $\rightarrow$   $\uparrow$  Temperatura Ciclo  $\rightarrow$   $\uparrow$  NOx

Otro aspecto a tener en cuenta es mantener la temperatura de las paredes de la cámara de combustión en niveles bajos y uniforme. [Ref. 18]

- **Sistema Stop&Start**

Este sistema apaga el motor cuando el vehículo se detiene comprobando que no hay marchas engranadas, que el sensor de giro de ruedas del ABS marca cero y que el sensor electrónico de la batería (EBS) indica que su reserva de energía es suficiente para volver a encender el motor. De esta forma se reduce tanto el consumo de combustible como emisiones.

- **Utilización de combustibles con menor cantidad de Nitrógeno**

El metanol, es un combustible que no contiene nitrógeno y tampoco contiene azufre, por lo cual su utilización en motores diesel podría contribuir a reducir las emisiones de NOx. Como contrapartidas, la combustión del metanol es de peor calidad, es más corrosivo, existen problemas de logística su utilización en motores existentes requiere la modificación de los sistemas de transporte, almacenamiento, bombeo e inyección del combustible en los motores diesel y, finalmente, su coste es más elevado.

El uso de gases licuados procedentes del petróleo (GLP), como combustibles a gran escala, está mucho más extendido que el metanol y existe mucha más infraestructura para su distribución a nivel mundial, por lo cual podrían presentarse como combustibles alternativos. El uso dual de GLP/diésel en motores de encendido por compresión (inyección piloto), consigue reducir las emisiones de NOx notablemente. [Ref. 19]

- **Aditivos al combustible**

Se puede agregar aditivos al combustible que aumenten el índice de cetano, con el cual se favorece el proceso de combustión en los motores diésel. De esta forma, podrían conseguirse reducciones de las emisiones de NOx en motores diésel. Se han realizado estudios con un aporte de 3 aditivos distintos (2-Etilhexil Nitrato-EHN, Di-terciario butil peróxido-DTBP y un aditivo derivado de combustibles orgánicos-ODA) en los que se puede ver una minoración del orden del 10% a baja carga pero a plena carga las emisiones son similares a las alcanzadas con combustibles convencionales. [Ref. 20]

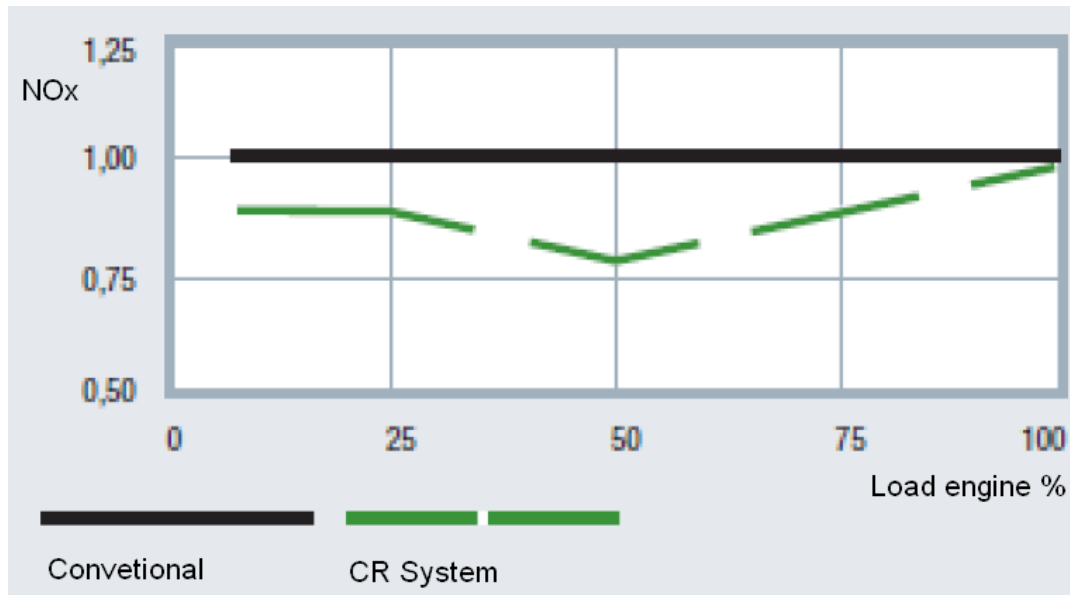
- **Inyección de oxígeno**

Una alternativa teórica pero que carece de viabilidad económica sería la utilización de O<sub>2</sub> en lugar de aire para la combustión, sería un método para la reducción de las emisiones de NOx de un motor diésel válido desde el punto de vista teórico, puesto que permitiría evitar la formación tanto del NOx térmico como del NOx súbito. Sin embargo, esta aplicación está condicionada por los altos costes necesarios para la generación de grandes cantidades de O<sub>2</sub>, tanto de inversión, como de explotación (consumo de energía), así como por la pureza del O<sub>2</sub> necesaria, debido a que el N<sub>2</sub> residual, intervendría en la formación de NOx y podrían no conseguirse los efectos deseados pero si reducirlos en orden de magnitud del 80%.

- **Common rail**

El Common Rail es un sistema de inyección de combustible en motores diésel en el que el combustible, antes de su entrada al motor, es bombeado a alta presión a un conducto común a varios cilindros desde el cual se alimenta cada uno de los inyectores. La inyección se controla de forma electrónica a través de la actuación de las válvulas de inyección. Permiten una reducción de NOx debido a una optimización del control y a una variación del tiempo de inyección que es una medida de reducción explicada.





**Figura 2.11:** Reducción de NOx common rail. Fuente: HANDBOOK OF DIESEL ENGINES. Klaus Mollenhauer, Helmut Tschöke [Ref. 14]

Como se observa en la figura 2.11 se aprecia una evidente reducción de NOx a media carga con el sistema de inyección de rail común.

- **Refrigeración del aire de admisión**

Con la refrigeración del aire de admisión provoca un aumento de la densidad del aire por lo que se consigue una mayor potencia y por sin un aumento de la cilindrada con la ayuda del turbocompresor debido a que se puede introducir más masa fresca.

Con la refrigeración del aire de admisión se consigue una considerable reducción de NOx. En automoción esta técnica se consigue con intercambiadores de calor de dos tipos: aire – aire y aire – líquido. Los intercambiadores aire-aire utilizan el aire exterior para enfriar el aire de admisión al fluir por el intercambiador. Dependiendo de las características y eficiencia del dispositivo, el aire de admisión en ocasiones puede refrigerarse a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. En los sistemas aire-líquido, se utiliza un circuito adicional de líquido refrigerante como medio de enfriamiento, por ello la cantidad de calor extraída por unidad de tiempo es mayor (mayor coeficiente de transmisión térmico). Sin embargo, de igual forma a temperaturas ambiente excesivamente bajas, se puede dar un sobre enfriamiento del aire de admisión que puede conducir a un aumento de las emisiones de partículas diésel, por ello este tipo de sistema normalmente cuentan con un bypass que regula la temperatura del aire de admisión.

- **Alternativas**

Hibridación, pilas de hidrógeno, electrificación...

## 2.2 Técnicas pasivas

Estas medidas son capaces de eliminar las emisiones de NOx una vez expulsados del motor a través de sistemas de postratamiento de gases de escape.

Al tratarse de técnicas que actúan tratando los gases de escape de los motores de encendido por compresión, permiten actuar sobre la totalidad de los NOx emitidos por dichos motores ya sea de forma individual o mediante una combinación de un conjunto de sistemas.

## 2.2.1 Lean Nox Trap (LNT)

El lean NOx trap es un dispositivo que se utiliza para reducir los óxidos de Nitrógeno en los motores de combustión interna con exceso de oxígeno bajo el principio de adsorción de NOx. Este principio fue utilizado por primera vez en los catalizadores de tres vías de los motores de encendido provocado. En la actualidad se implanta en motores de baja/media cilindrada de combustión por compresión.

Se debe tener claro la diferencia entre adsorción y absorción. La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida) en forma líquida o gaseosa. La absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una "solución".

En la práctica, el LNT se conoce como un sistema que está constantemente trabajando en dos fases que se conocen como adsorción y desorción de NOx según la térmica del dispositivo y la riqueza. La fase de adsorción o stockage de NOx se consigue cuando la temperatura se encuentre entre los 150°C y 450°C y la riqueza de la mezcla este por debajo de la estequiométrica (Fase de funcionamiento normal del motor). La fase de desorción o reducción de NOx se desarrolla cuando el acumulador está saturado, esta fase se provoca cuando la térmica es elevada en torno a los 600°C y el motor trabaje en riqueza superior a la estequiométrica (durante 20s DeNOx y 10min DeSOx), fase conocida como purga. [Ref. 21]

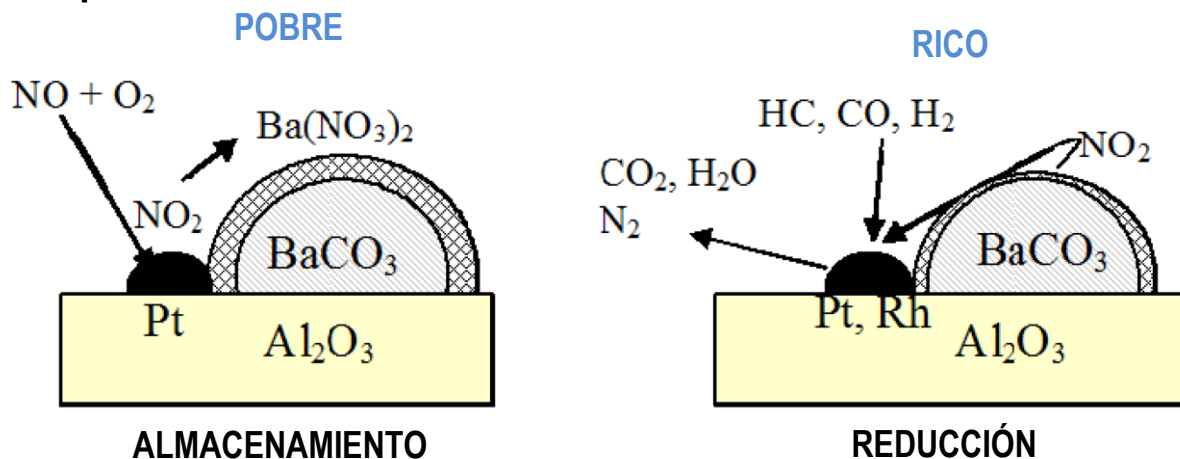
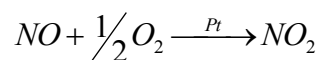


Figura 2.12: Fases de funcionamiento del LNT. Fuente: Epling [Ref. 22]

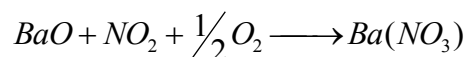
En las dos fases (rico y pobre) que se muestran en la figura 2.12 se realizan los siguientes procesos que se realizan en el LNT:

Fase pobre:

- Oxidación del NO. Este proceso consiste en la oxidación del NO en  $NO_2$  con la presencia de un catalizador de oxidación que principalmente es platino. Esto es necesario debido a que los materiales de adsorción son más eficaces para  $NO_2$ .



- Adsorción de  $NO_2$ . Este paso se realiza gracias a la presencia del componente de adsorción de la que se dotan los LNT (principalmente es el  $BaCO_3$ ) y por el oxígeno sobrante del tipo de combustión empleada. La adsorción del  $NO_2$  se realiza en la superficie del material según la siguiente reacción.

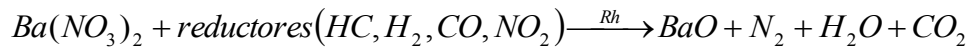


Cuando el acumulador se satura, el modo de combustión del motor pasa a fase rica, cambiando el flujo de gases en composición y en temperatura. El exceso de oxígeno de la mezcla pobre es

sustituido por especies reductoras, principalmente hidrocarburos, monóxido de carbono e hidrógeno.

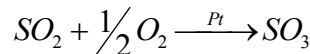
Fase rica:

- Reducción a Nitrógeno. Bajo las condiciones idóneas (atmósfera rica, temperatura en torno a los 600°C y componentes reductores) y con la presencia del catalizador de reducción Rodio se consigue la eliminación de los NOx mediante la siguiente reacción:

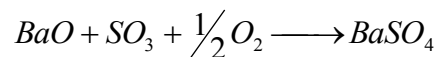


El lean NOx trap tiene una serie de inconvenientes que provocan discrepancias con el razonamiento técnico teórico mostrado con anterioridad:

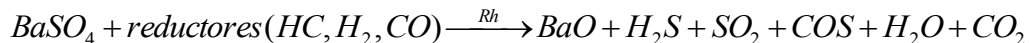
- Debido al contenido de azufre en el combustible y que el componente de adsorción es más afín a reaccionar con el azufre se producen los siguientes subprocesos:
  - Oxidación del SO<sub>2</sub>. Este proceso consiste en la oxidación del SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> con la presencia de un catalizador de oxidación que principalmente es platino, esto ocurre de manera inevitable por la existencia del catalizador y fase pobre (exceso de oxígeno) sucediendo la siguiente reacción:



- De igual manera ocurre con la adsorción de SO<sub>3</sub> con la presencia del BaCO<sub>3</sub>



- Con el azufre acumulado hay que hacer el mismo procedimiento de reducción



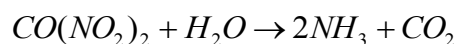
- Liberación de NOx desde los nitritos o nitratos acumulados, Debido a la inestabilidad de los mismos bajo la atmosfera reductora con la presencia de CO, HC, H<sub>2</sub> y las altas temperaturas alcanzadas en la fase rica se provocan las siguientes reacciones formando de nuevo NOx.



- Otros inconvenientes como disolución del aceite por postcombustiones muy tardías, fiabilidad en turbina por las térmicas alcanzadas [Ref. 23] y [Ref. 24]

### 2.2.2 Sistema de reducción catalítica selectiva (SCR)

La Reducción Catalítica Selectiva de NOx se basa en la utilización de un reductor selectivo para reducir el NOx a nitrógeno y agua en los motores diésel con atmósferas con exceso de oxígeno. Estos métodos catalíticos son los más utilizados y adecuados ya que transforman los NOx en nitrógeno, lo que representa una verdadera solución al problema de la contaminación. La Reducción Catalítica Selectiva puede realizarse con distintos agentes reductores, Los más usados en la industria automovilística son el amoníaco y la urea. El amoníaco se almacena en estado líquido, mientras que la urea se almacena en estado sólido, y debe ser hidrolizada antes de ser inyectada.

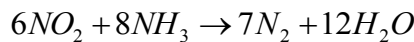
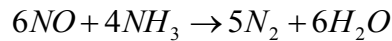
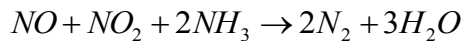
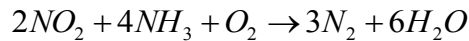
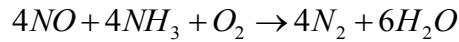


- Funcionamiento teórico

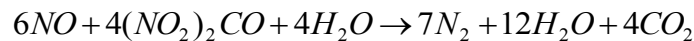
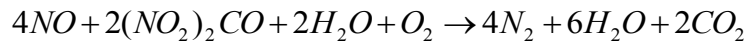
El proceso SCR se realiza con la inyección de un agente reductor (urea o amoníaco) aguas arriba del catalizador produciendo reacciones reductoras en la superficie del dispositivo con una

impregnación de un material catalítico (Pt, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>, Zeolitas). El catalizador tiene que almacenar los NO<sub>x</sub> a una temperatura en torno a los 200°C y reaccionar con el material reductor a una temperatura comprendida entre los 250°C y los 600°C según el material catalítico. Las reacciones principales que se producen son:

- Amoníaco como agente reductor:

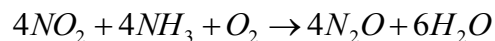
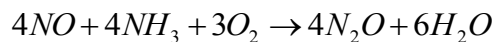


- Urea como agente reductor:

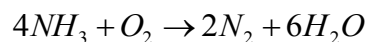


La denominación como “selectiva” tiene lugar debido a que conseguimos que el amoníaco reaccione selectivamente con los NO<sub>x</sub>, y que, sin embargo, no reaccione con el oxígeno.

Desafortunadamente, también es posible la formación de N<sub>2</sub>O. Dicho gas se trata de uno de los principales gases causantes del efecto invernadero. Las principales reacciones no deseadas son:



Otra reacción indeseada que pueden darse en el proceso, es la siguiente, en la que se consume innecesariamente NH<sub>3</sub>.

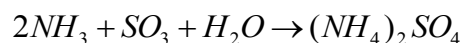
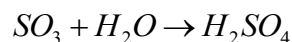


Es importante conseguir una dosificación adecuada del agente reductor en los gases de escape, en el proceso SCR, ya que un exceso de agente reductor conducirá a emisiones no deseadas de agente reductor a la atmósfera, y una dosificación inferior a la necesaria, conducirá a unos porcentajes de reducción de NO<sub>x</sub> inferiores a los deseados. En general, se utilizan relaciones NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> próximas a la estequiométrica en torno a 0.9/0.95 para conseguir la mayor efectividad posible.

De igual manera que ocurre con el LNT, el azufre contenido en el combustible puede intervenir en el proceso de reducción. Con el SO<sub>2</sub> producido en la combustión puede darse la siguiente reacción:



El SO<sub>3</sub> puede reaccionar con el agua, así como con el amoníaco todavía existente en los gases de escape, para formar ácido sulfúrico y sales de amonio.



Cuando esto ocurre, se pueden depositar esas sales, y dar lugar a la desactivación del proceso SCR, con mayor intensidad cuanto menor sea la temperatura de los gases de escape en el catalizador y

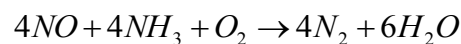
mayor sea el porcentaje de azufre contenido en el combustible. Por otro lado, el ácido sulfúrico puede provocar problemas de corrosión aguas abajo del catalizador. Para evitar este problema, es necesario mantener siempre la temperatura a la entrada del catalizador por encima de 300 °C e intentar que el catalizador sea altamente selectivo [Ref. 25]

### 2.2.3 Otras técnicas

- **Reducción selectiva no catalítica (SNCR)**

Con esta técnica los NOx presentes en la corriente de gas, son reducidos a N<sub>2</sub> a través de su reacción con amoníaco (NH<sub>3</sub>) o urea (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>), a altas temperaturas (entre 900 y 1000 °C), donde no es necesaria la utilización de un catalizador. Para el funcionamiento de este proceso es imprescindible conseguir una distribución uniforme del agente reductor en el flujo de gases en la zona de temperatura correcta. El tiempo en el que los gases deben permanecer en el rango de temperaturas óptimo, está comprendido entre 0,2 y 0,5 segundos para conseguir unas eficiencias del 80%.

Para elevar la temperatura de los gases de escape de un motor diesel a las temperaturas en las que se pueden dar las reacciones de reducción del NOx es necesario proceder a la postcombustión como con el LNT. Con amoníaco como reductor la reacción principal es:

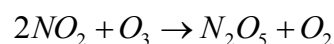
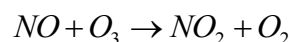


Este proceso presenta problemas similares al SCR, como la necesidad de disponer de infraestructuras de suministro de amoníaco o urea, las fugas de NH<sub>3</sub>, la formación de derivados del azufre cuando se utilizan combustibles con la presencia de los mismos, así como la emisión de N<sub>2</sub>O.

Una alternativa a este sistema puede ser mediante adición del agente reductor directamente en la cámara de combustión, en el momento adecuado, de forma que permita que se produzcan las reacciones que gobiernan el proceso SNCR, en el intervalo de temperaturas necesario, durante el tiempo necesario sin que se produzca una degradación en las prestaciones del motor. [Ref.Web 9]

- **Inyección de OZONO**

Otro proceso de protratamiento no menos complejo sería la inyección de ozono en los gases de escape para oxidar los NO y NO<sub>2</sub> produciendo las siguientes reacciones:



El N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> que se ha producido en la reacción anterior es altamente soluble en agua formando HNO<sub>3</sub>.

Para garantizar la viabilidad del proceso los gases de escape deben estar por debajo de 200 °C aproximadamente, para evitar la disociación del ozono y así garantizar la máxima eficiencia en el proceso.

El ozono lo podremos obtener "in situ" instalando un generador de ozono a través de oxígeno acumulado en tanques o producido también "in situ".

Con la inyección de ozono se pueden conseguir reducciones de las emisiones de NOx del orden del 85%-95%. [Ref.Web 10]

- **PNA (Passive NOx Absorber)**

El PNA es un sistema adsorbente de NOx que no cuenta con catalizador de reducción como el LNT, por lo que solo actúa como un sistema de almacenamiento de NOx. Este dispositivo es utilizado en conjunto con el SCR. En la práctica el PNA se coloca aguas arriba del SCR, de esta manera cuando el SCR no tiene térmica para el correcto funcionamiento el PNA adsorbe NOx y cuando se adquiere la

temperatura adecuada se desprende el NOX del PNA coincidiendo con la entrada de funcionamiento del SCR.

De igual manera que el LNT, el PNA posee mayor afinidad a la adsorción del azufre, provocando una pérdida de eficacia del dispositivo. Debido a ello, estos dispositivos poseen estrategias de desulfatación para eliminar dicho componente. [Ref. 26]

### 3 IMPACTO DE LA EGR EN DISTINTOS PARÁMETROS DEL MOTOR Y LAS CONSECUENCIAS EN LA FORMACIÓN DE NO<sub>x</sub>

La EGR es una técnica de reducción de NO<sub>x</sub> en los motores diésel mediante la cual se introducen gases inertes. Dichos gases no participan directamente en la combustión pero aportan características a la combustión que provocan la reducción de formación de NO<sub>x</sub>.

La recirculación de gases repercute en las dos teorías de formación de NO<sub>x</sub>:

- Temperatura de la llama: con la incorporación de gases inertes en la mezcla procedentes de combustiones anteriores se produce un incremento de la capacidad térmica de la mezcla contenida en el interior del cilindro. Esto es debido a que el calor específico de la mezcla se ve incrementado por la introducción de dichos gases. Esto provoca una reducción de la temperatura durante la combustión a igual aportación de calor.
- Reducción de la concentración de oxígeno: como consecuencia de la sustitución de masa fresca por gases inertes con una menor proporción de oxígeno. La reducción de oxígeno en el frente de llama disminuye la oxidación del nitrógeno que proviene del aire y del combustible.

Estas dos teorías están relacionadas entre ellas. Una disminución en la concentración de O<sub>2</sub> en la mezcla provoca una combustión más lenta, un retraso de la combustión y por lo consecuente una menor temperatura de llama. Esto se produce porque los gases inertes se entremezclan con el O<sub>2</sub> dificultando la reacción y resultando productos inquemados en la combustión.

La recirculación de gases puede tener también consecuencias negativas como puede ser un incremento del consumo específico de combustible, una disminución del rendimiento del motor y un incremento de las emisiones de partículas.

Se conoce como tasa de EGR a la relación entre la cantidad de gas recirculado y la masa total admitida por el motor.

$$EGR = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{EGR}}$$

En los siguientes subapartados se verá cómo afecta el uso de la HP EGR en parámetros de la combustión, consumo de combustible y las emisiones contaminantes, principalmente las emisiones de NO<sub>x</sub>. Para ello se utilizan unos ensayos, que posteriormente se describen, con EGR externa de alta presión refrigerada. El tipo de adición de masa es por sustitución. Las condiciones de operación son propias del ciclo de homologación. En la figura 3.1 se muestra la configuración de la EGR descrita.

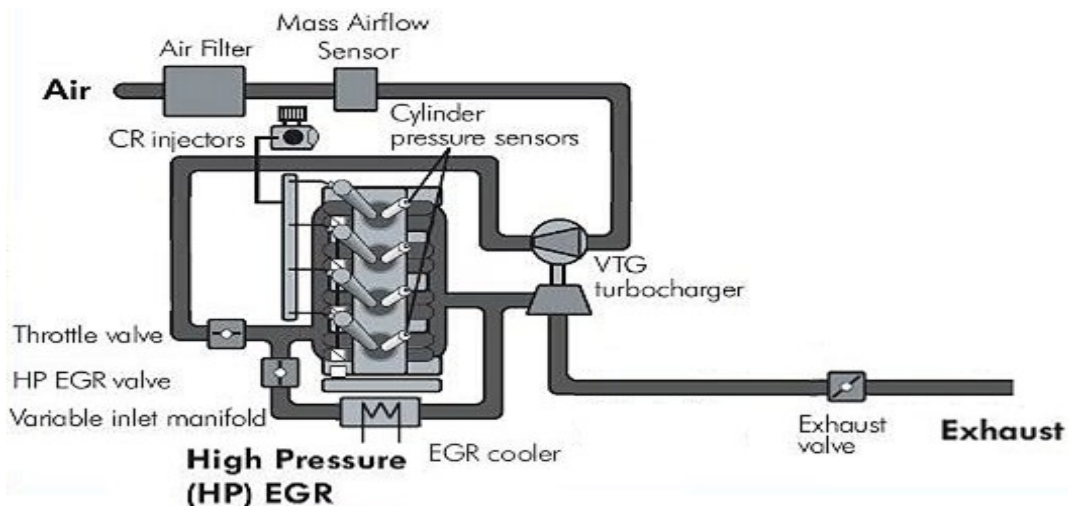


Figura 3.1: Esquema motor con EGR HP. Fuente: Dieselnat [Ref.Web 11]

Las características de los distintos ensayos estudiados en este apartado 3 son las siguientes:

- El experimento tomado de Giorgio Zamboni y Marco Copobianco ha sido realizado en un motor de 4 cilindros de 4 tiempos con una cilindrada de 1900cm<sup>3</sup> con sistema de inyección de rail común, equipado con turbo compresor de geometría variable, con intercambiador de calor del aire de admisión y con un sistema de recirculación de gases de escape de alta presión refrigerado tal y como se observa en la figura 3.1. [Ref. 1]
- El experimento de los autores Xinling Li, Zhen Xu, Chun Guan y Zhen Huang se ha realizado en un motor de 4 cilindros y 4 tiempos con una cilindrada 1751cm<sup>3</sup> con sistema de inyección de rail común, una potencia máxima de 98 KW. El motor está equipado con un turbo compresor de geometría variable con un sistema de refrigeración intercooler y un sistema de recirculación de gases de alta presión refrigerado. [Ref. 27]
- El experimento extraído de los autores B. Rajesh kumar a y S. Saravanan se ha realizado en un motor de 1 cilindro, con una cilindrada de 661cm<sup>3</sup>, equipado con un sistema de inyección directa y un sistema de recirculación de gases de escape de alta presión refrigerado.[Ref. 28]
- El experimento realizado por Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto y Marco Gianoglio Bernardi cuenta con un motor de 4 cilindros y 4 tiempos, con una potencia de 115 KW, con una cilindrada de 1956cm<sup>3</sup> con un sistema de inyección common rail de segunda generación. El motor cuenta con un turbo compresor de geometría variable y un intercambiador en el aire de admisión. Equipado con sistema de recirculación de gases de escape de alta presión. [Ref. 29]
- El experimento tomado de F. Payri ha sido realizado con un motor AVL monocilindrico simulando un motor de 6 cilindros de 11.1 L con una potencia máxima de 300 KW. El motor dispone de una inyección common rail con un inyector. También se simula la recirculación de gases de escape refrigerada de alta presión. [Ref. 30]
- El experimento tomado de Asad, Usman; Tjong, Jimi; Zheng, Ming ha sido realizado sobre un motor de 4 cilindros y 4 tiempos, con una cilindrada de 3200cm<sup>3</sup>, con un sistema de rail común de inyección directa con recirculación de gases de escape de alta presión refrigerada. [Ref. 31]
- El experimento tomado de Youngsoo Park y Choongsik Ba ha sido realizado sobre un motor de 4 cilindros y 4 tiempos con una cilindrada de 2199cm<sup>3</sup>, sistema de inyección de rail común, con una potencia máxima de 149 KW. El motor dispone de un turbo compresor de geometría variable controlada electrónicamente. El motor cuenta con un sistema de recirculación de gases de alta presión. [Ref. 31]

Los ensayos recogen información a partir de una tasa de apertura del 8%, debido a que por debajo de esa cantidad el sistema mecánico no regula la circulación de gases con exactitud.

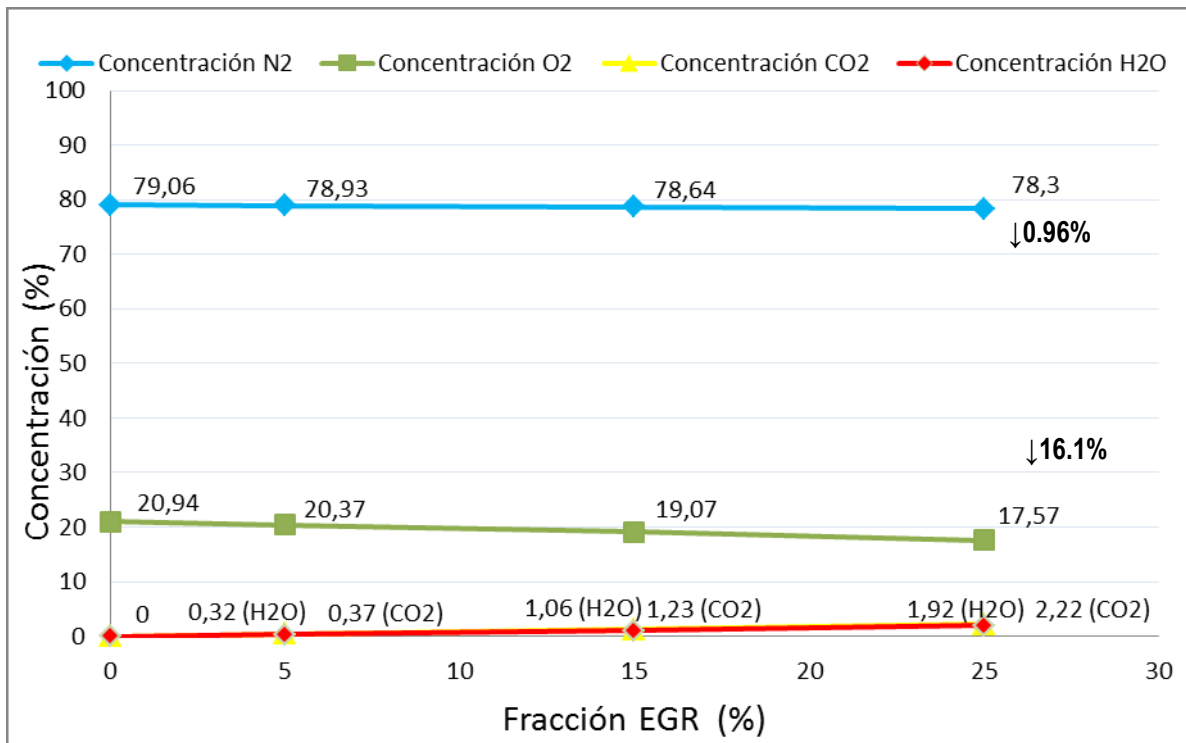
### **3.1 Composición de la masa de aire**

La composición de la masa de aire en cilindro va variando conforme aumenta la tasa de EGR. El aire está constituido principalmente por nitrógeno y oxígeno (79% y 21% respectivamente). Cuando va aumentando la proporción de gas recirculado se va añadiendo a la mezcla componentes inertes procedentes de la combustión anterior. Estos componentes son dióxido de carbono y agua entre otros. Los porcentajes de dichos compuestos vienen fijados por la relación C/H del combustible (1.73), el dosado relativo (0.5 sin EGR) con el que trabaja el motor y la tasa de EGR (desde 0% a 25%) [Ref. 30]

A medida que aumenta la tasa, disminuye el O<sub>2</sub> de la mezcla debido a que la masa fresca se sustituye por gas recirculado con menor porcentaje de oxígeno. También varía en menor medida el nitrógeno.



En la figura 3.2 se observa cómo varían los componentes de la mezcla, donde se observa una disminución de  $O_2$  y un aumento de  $CO_2$  y  $H_2O$  mientras que el  $N_2$  sufre una pequeña disminución corroborando la explicación teórica inicial.



**Figura 3.2:** Variación de componentes de la mezcla en función de la tasa EGR. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. Payri [Ref. 30]

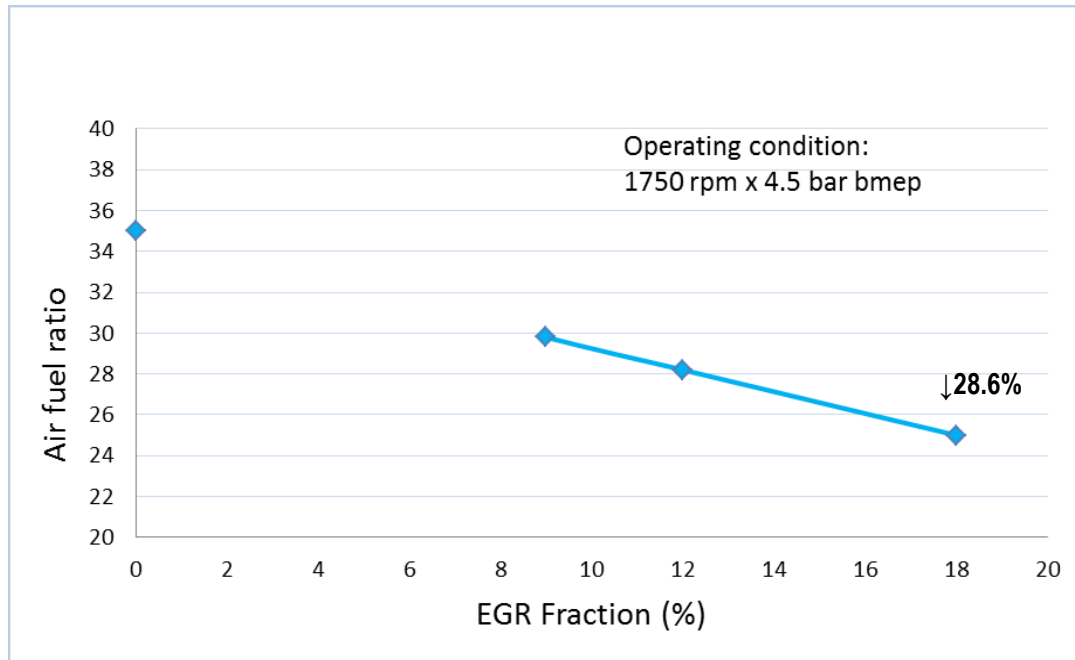
En la figura 3.2 se ve como el nitrógeno se mantiene estable (sufre un decremento del 1%) y el oxígeno disminuye en un 15% reemplazándose por el dióxido de carbono y el agua. Esto repercute notablemente sobre la formación de  $NO_x$  debido a que la mezcla posee un poder calorífico mayor y se necesita mayor energía para incrementar la temperatura de la misma. Y por la disminución de oxígeno, que por un lado reduce la concentración y dificulta la oxidación del nitrógeno y por otro reduce la velocidad y la temperatura de combustión.

### 3.2 Proporción aire fresco/combustible

Como se ha comentado en el punto 3, el tipo de EGR a estudiar es por sustitución. Por lo tanto la masa de aire fresco en cilindro se ve reducida proporcionalmente en la medida que aumenta la tasa de EGR provocando una menor concentración de oxígeno.

En la siguiente figura 3.3 obtenida de un experimento de *Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco* se observa cómo la proporción de aire fresco disminuye con respecto al combustible. El ratio aire/combustible sin EGR es en torno a 35, mientras con una tasa del 18%, el ratio es del 25. [Ref. 1]

Esto repercute en una combustión más lenta (debido a que el chorro de combustible tiene que recorrer más distancia para reaccionar con el oxígeno), en una menor presión máxima y en una menor temperatura de llama, debido a una disminución de oxígeno y un aumento del poder calorífico de la mezcla (caso anterior). También repercute negativamente provocando una combustión incompleta y una disminución de la eficiencia.



**Figura 3.3:** Proporción de aire fresco/combustible en cilindro en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine*. Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

Una disminución de la proporción aire fresco/combustible provoca un aumento del dosado tal y como se observa en la tabla 3.1. La variación del dosado efectivo y relativo es para un combustible con una tasa C/H de 1.73.

En el dosado relativo solo se tiene en cuenta la masa fresca.

Para el cálculo del dosado efectivo se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$F_{efe} = F_R \cdot \frac{1 - TEGR}{1 - F_R \cdot TEGR}$$

El dosado efectivo es el dosado que tiene en cuenta la cantidad total de oxígeno admitida por el motor.

$$F_{efe} = \left( \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{O_2\_ADM}} \right) \cdot \left( \frac{\dot{m}_{O_2\_AIRE}}{\dot{m}_f} \right)$$

De esta manera la cantidad de oxígeno total en la admisión es la suma de la masa de O<sub>2</sub> que aporta el aire fresco mas el O<sub>2</sub> que aporta los gases recirculados.

$$\dot{m}_{O_2\_ADM} = [O_2]_{AIRE} \cdot \dot{m}_{AIRE} + [O_2]_{AIRE} \cdot (1 - F_R) \cdot \dot{m}_{EGR}$$

**Tabla 3.1:** Dosado relativo y efectivo en función de la tasa EGR. Fuente: *Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel*. Payri [Ref. 30]

Tasa EGR (%)	0	5	15	25
F <sub>R</sub>	0.5	0.52 (↑4%)	0.58 (↑16%)	0.63 (↑26%)
F <sub>efe</sub>	0.5	0.51 (↑2%)	0.54 (↑8%)	0.56 (↑12%)

La disminución en el ratio aire/combustible que se observa en el experimento provoca un impacto positivo sobre la formación de NOx, debido a que un aumento de la tasa EGR provoca una disminución de oxígeno en el frente de llama y por lo tanto una disminución en la formación de NOx. Esto ocurre porque la oxidación del nitrógeno del combustible es más compleja.

El dosado relativo aumenta debido a que la concentración de masa fresca es menor. Sin una recirculación de gases, aumentar el dosado provocaría un aumento de la velocidad de combustión y por lo consiguiente un aumento de la temperatura y de NOx. Pero el aumento del dosado es debido a la sustitución de masa fresca por masa inerte, por lo tanto reacciona el mismo combustible con menor calidad produciendo un menor rendimiento térmico provocando, una disminución de temperatura y de NOx.

### 3.3 Masa admitida.

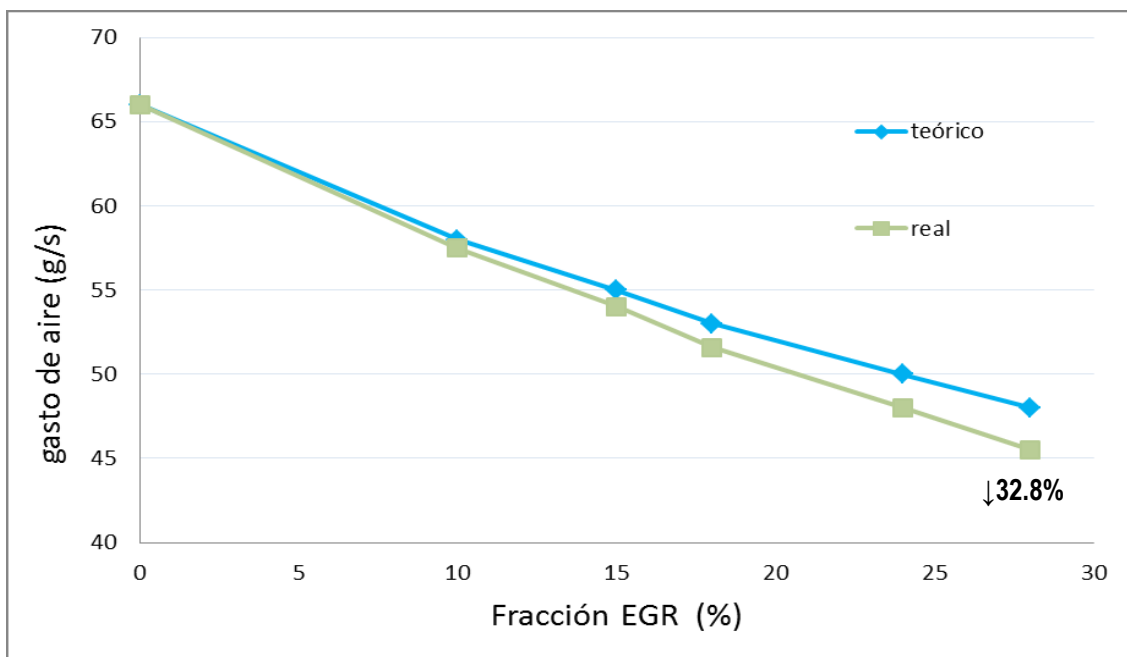
La disminución de la masa admitida en cilindro se conoce como estrangulamiento térmico, esto es debido a un aumento de la temperatura del aire de admisión al introducir gases recirculados a una temperatura mayor disminuyendo la densidad de la mezcla. Este efecto no se produce cuando se consigue bajar la temperatura de los gases de la combustión anterior hasta la temperatura del aire de admisión.

Para cuantificar el estrangulamiento térmico se realiza la hipótesis de que el gasto másico de aire total de admisión permanece constante, es decir la suma del gasto de aire y el gasto de gases recirculados es constante. A partir de ahí se calcula el gasto de aire que teóricamente debería haber entrado en el motor cuando se ha recirculado una determinada cantidad de gases bajo a siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{\text{AIRE TEÓRICA}} = \dot{m}_{\text{AIRE}} \cdot (1 - TEGR)$$

Dónde  $\dot{m}_{\text{AIRE TEÓRICA}}$  es el gasto másico de aire fresco que debería admitir con una tasa de EGR si la masa total admitida permanece constante y  $\dot{m}_{\text{AIRE}}$  es el gasto de aire másico admitido por el motor sin EGR.

En la siguiente figura 3.4 se compara el gasto másico teórico y el experimental y se determina el estrangulamiento térmico.



**Figura 3.4:** Estrangulamiento térmico 1500rpm, 75% carga en función de la tasa EGR. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. Payri [Ref. 30]

En la figura 3.4 se aprecia cómo a medida que aumenta la tasa de EGR aumenta el estrangulamiento térmico debido a un aumento de la temperatura de admisión, aunque ronda entre 0% y 3% por lo que el comportamiento es casi insensible a la disminución de masa admitida.

La cantidad de NOx se mantiene similar tras estudiar este comportamiento debido a que la disminución de masa de aire es muy baja por efecto térmico. Menor masa se traduce en mayor dosado, menor rendimiento volumétrico y menor concentración de oxígeno. Suceden mecanismos que aumentan y que disminuyen la formación de NOx.

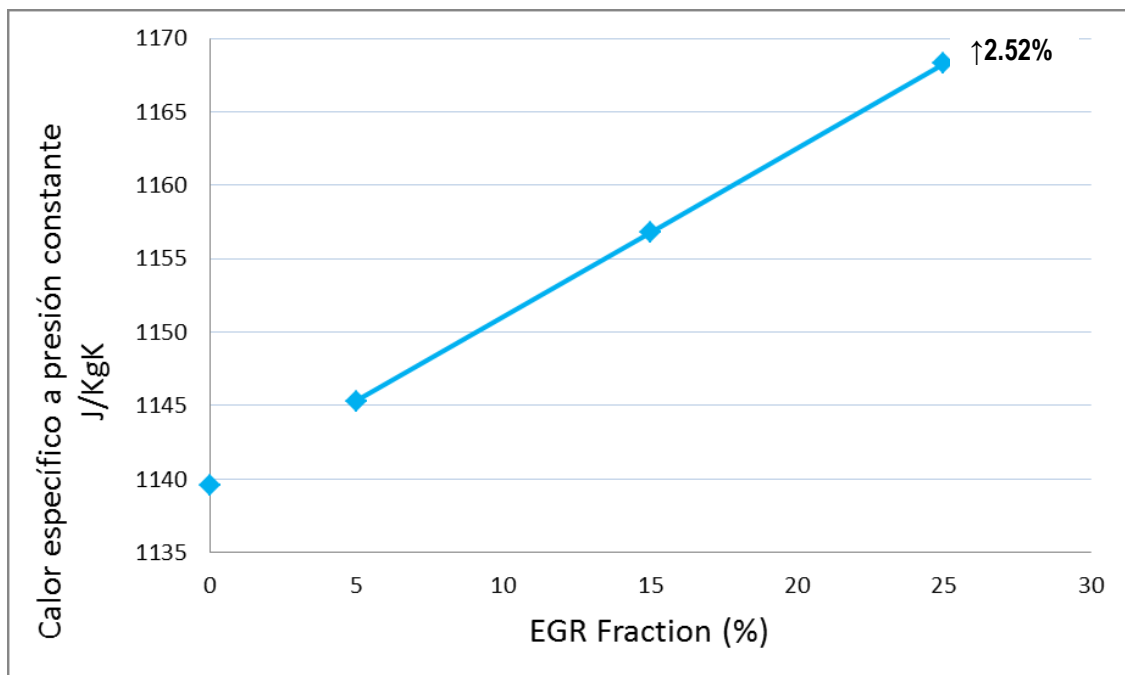
- Parámetros que aumentan la formación de NOx\_ Mayor temperatura debido a que la masa total disminuye, menor rendimiento volumétrico
- Parámetros que restringen la formación de NOx\_ disminución del oxígeno, disminución de nitrógeno.

Por otro lado una reducción de masa fresca implica una disminución en la formación de NOx debido a que existen menos N<sub>2</sub> en la mezcla y menos O<sub>2</sub> en el frente de llama. Como se aprecia en la figura 3.4 la cantidad de aire fresco ha disminuido en un 30% para una tasa de EGR del 25% provocando un decremento de NOx

### 3.4 Calor específico de la masa en cilindro

Con el uso de la recirculación de gases, el calor específico a presión constante se ve incrementado debido al mayor poder calorífico del CO<sub>2</sub> y del H<sub>2</sub>O respecto al N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> presentes en el aire.

En la figura 3.5 y en la tabla 3.2 obtenidas del libro *Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel*. F. Payri se observa el aumento de calor específico a presión constante adquirido de forma teórica bajo la ecuación de Mayer. El calor específico a presión constante (Cp) ha sido calculado para una temperatura de 1000K (temperatura al final de la carrera de compresión). También se observan las variaciones del exponente adiabático. [Ref. 30]



**Figura 3.5:** Calor específico en función de la tasa EGR. Fuente: *Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel*. Payri [Ref. 30]

**Tabla 3.2:** Calor específico y exponente adiabático. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. Payri [Ref. 30]

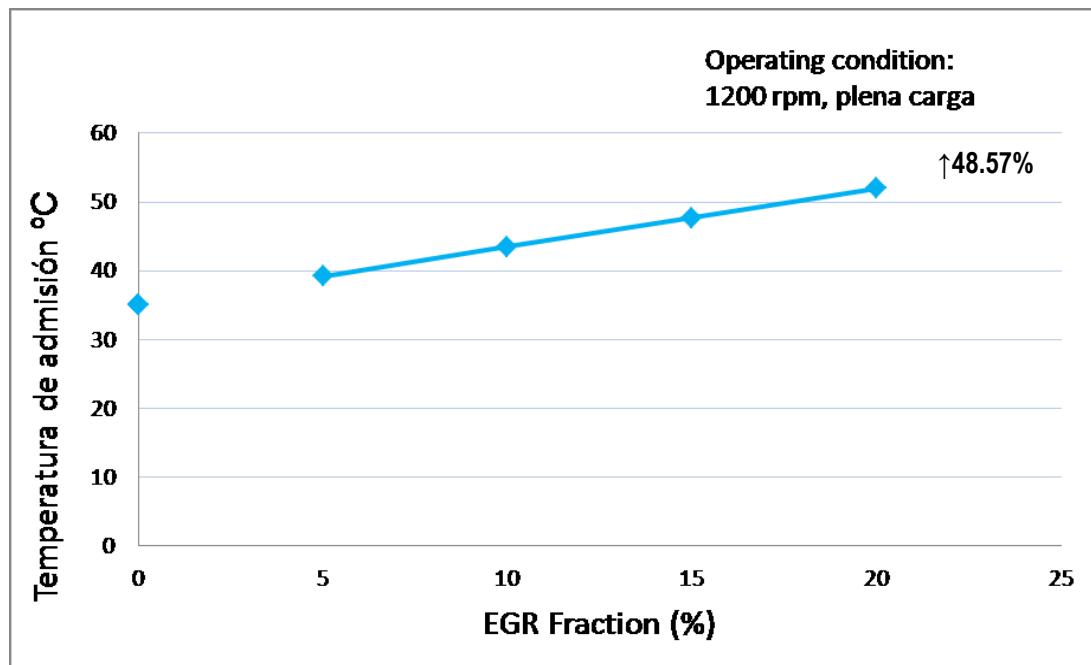
TEGR (%)	$F_R$	Calor específico a presión constante (J/kgK)	Variación $c_p$ (%)	Exponente adiabático	Variación de $\gamma$ (%)
0	0.5	1139.6	0.00	1.337	0.00
5	0.52	1145.3	0.50	1.334	-0.17
15	0.58	1156.8	1.51	1.330	-0.51
25	0.63	1168.3	2.52	1.325	-0.84

En la tabla 3.2 anterior se observa cómo aumenta el calor específico a medida que la tasa de EGR disminuye y como el exponente adiabático disminuye a la vez que disminuye la tasa de EGR. Desde el punto de vista de contaminación de NOx al aumentar el calor específico de la masa, la temperatura de llama se ve reducida disminuyendo las emisiones según el mecanismo de formación por temperatura. Sin embargo, el coeficiente de dilatación adiabática se ve reducido a medida que aumenta la tasa EGR. Esto se traduce en una reducción de la presión y temperatura al final de la compresión del gas y por lo consiguiente una reducción de formación de NOx.

### 3.5 Temperatura entrada al motor

La temperatura de admisión se ve incrementada a medida que aumenta la tasa de EGR debido a que la temperatura del gas recirculado se encuentra a unos 100-150°C según las condiciones de operación del motor y la eficacia de la refrigeración del dispositivo.

En la figura 3.6 se observa cómo la temperatura de admisión se incrementa desde los 35°C que se encuentra sin gas recirculado a los 52°C con un 20% de tasa de EGR.



**Figura 3.6:** Temperatura de admisión en función de la tasa EGR. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. Payri [Ref. 30]

El aumento de temperatura de admisión certificado por dicho experimento tiene algunos efectos que afectan a la combustión y a la formación de NOx:

- Producen un incremento de temperatura proporcional al final de la carrera de compresión.

Una mayor temperatura, según la teoría NOx térmico, equivale a un aumento de formación de NOx.

- Un aumento de velocidad de la combustión y avance del inicio de la combustión.

De igual manera que el caso anterior, los NOx se ven aumentados porque un incremento de la velocidad y del avance de la combustión genera mayor temperatura.

- Reducción de la masa admitida y una disminución de la capacidad volumétrica.

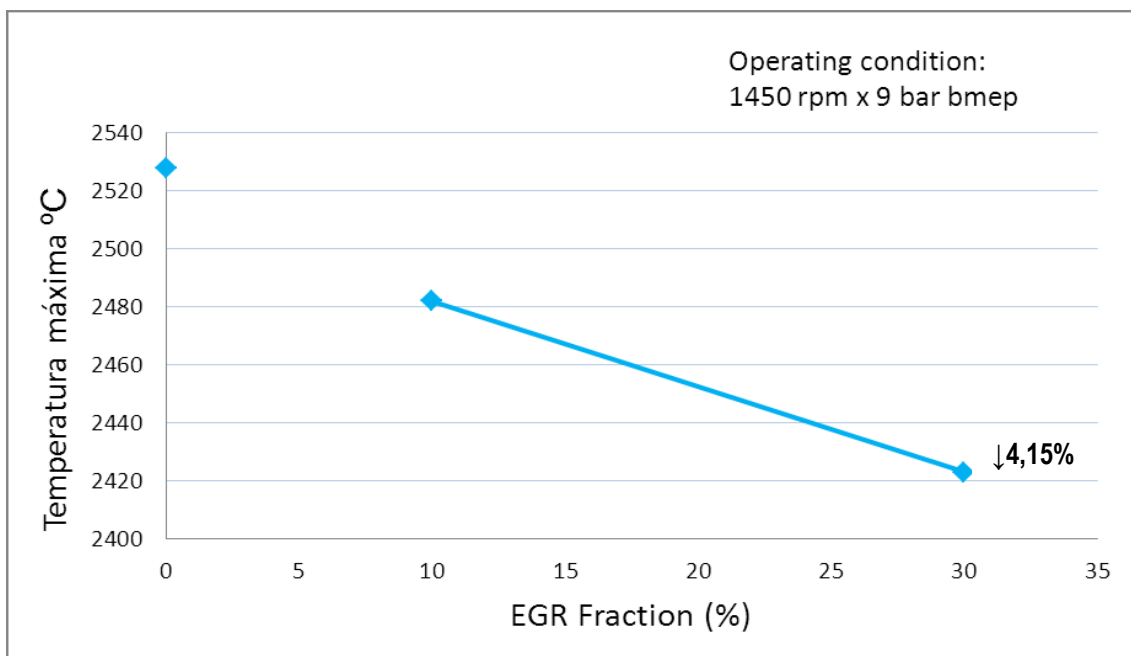
Corresponde a un aumento en emisiones de NOx debido a la disminución del rendimiento volumétrico y a la reducción de la mezcla.

Con respecto a la formación de NOx, una mayor temperatura de entrada al motor tiene una contribución negativa en todos los efectos descritos anteriores. Este aspecto puede ser uno de los motivos por lo que en la actualidad este tipo de EGR es utilizada para calentar la mezcla en condiciones de funcionamiento con una temperatura del motor baja y el estudio de una nueva EGR que aumente en menor medida la temperatura de entrada al motor (LP EGR)

### 3.6 Temperatura máxima

La temperatura máxima alcanzada en cilindro se ve disminuida con el aumento de la tasa de EGR. Esto es debido a la modificación que sufre la combustión al incluir componentes en la mezcla con un poder calorífico mayor donde disminuye el exponente adiabático y con ello el exponente politrópico.

En la figura 3.7 se observa cómo la temperatura máxima disminuye a medida que la tasa de EGR aumenta con una magnitud de más de 100°C con una tasa del 30%.



**Figura 3.7:** Temperatura de máxima alcanzada en función de la tasa EGR. Fuente: Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load. Xinling Li, Zhen Xu, Chun Guan, Zhen Huang [Ref. 27]

En cuanto a la emisión de NOx, basándose en el mecanismo de formación más representativo (NO<sub>TÉRMICO</sub>), estos se ven reducidos notablemente debido al decremento de la temperatura.

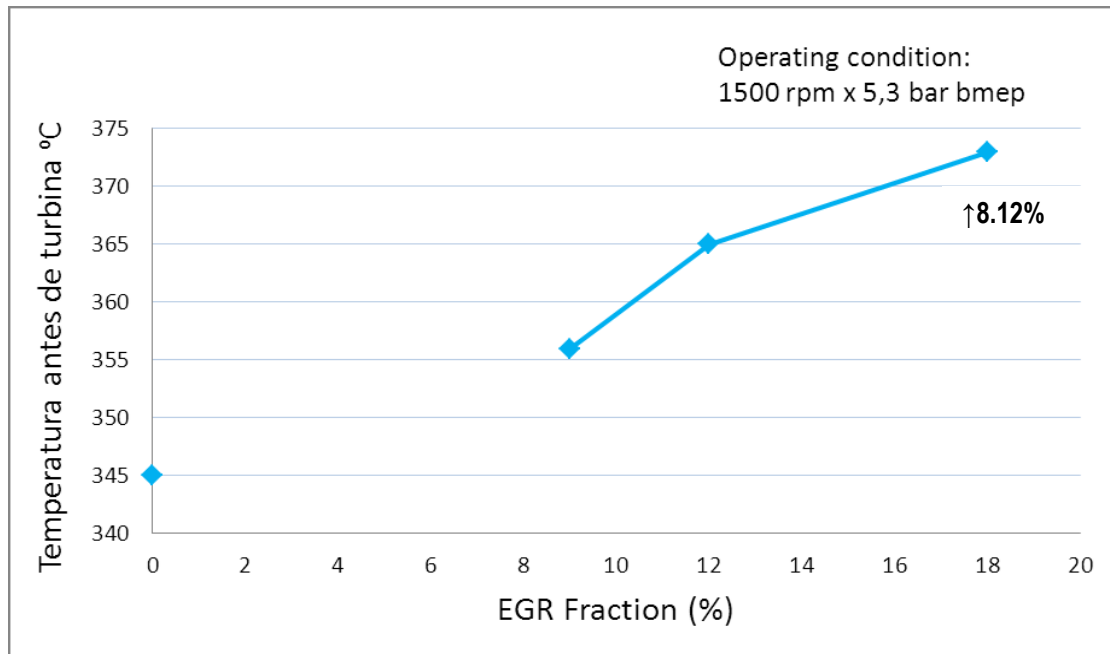
**Tabla 3.3:** Tabla variación parámetros con la modificación de TEGR. Fuente: *Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load.* Xinling Li, Zhen Xu, Chun Guan, Zhen Huang [Ref. 27]

EGR (%)	$P_{\max}$ (MPa)	ID ( $^{\circ}$ CA)	$T_{\text{peak}}$ ( $^{\circ}$ C)	Air-fuel ratio	BSFC (g/kWh)	NO <sub>x</sub> (ppm)	Soot (FSN)
0	8.21	8.26	2528	31.3	210.5	251	0.05
10%	8.12	8.36	2482	20.3	214.4	170	0.12
30%	7.63	9.10	2423	19.9	232.0	45	2.64

En la tabla 3.3 se muestra como para una tasa del 30% las emisiones de NO<sub>x</sub> se ven reducidas hasta 45ppm.

### 3.7 Temperatura salida del motor. (Antes de turbina)

Un aumento de tasa EGR implica una combustión más lenta, y esto se traduce en un menor pico de presión y temperatura y un retraso del mismo. Por este motivo en la figura 3.8 se observa como la temperatura es mayor a medida que aumenta la cantidad de gas recirculado.



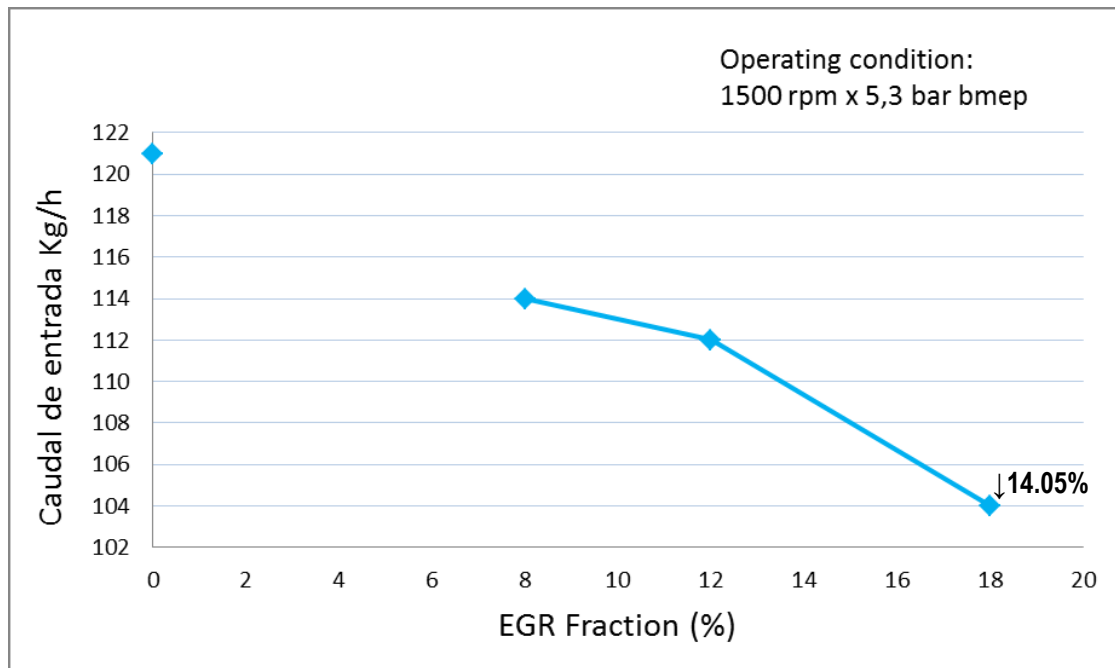
**Figura 3.8:** Temperatura salida del motor en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

Una mayor temperatura en la salida del motor tiene distintas influencias en la formación de NO<sub>x</sub>. En primer lugar con un aumento de tasa, la combustión se produce más tarde, más lenta y por lo tanto menor temperatura pico. Esto se traduce en un decremento en la formación de NO<sub>x</sub>. En segundo lugar al tener una reacción más lineal y con una temperatura de salida mayor se consigue atrasar el congelamiento de la reacción y por lo tanto la reacción se aproxima al equilibrio químico disminuyendo la formación de NO<sub>x</sub>. Este caso es válido solo y cuando la apertura de válvulas de escape se realicen a una temperatura por debajo de la temperatura de congelamiento.

### 3.8 Caudal de entrada al motor

El caudal de entrada al motor se ve reducido con el aumento de tasa EGR. Esto es debido a que la temperatura de los gases recirculados aumenta la temperatura de la mezcla y por lo tanto disminuye la densidad. También ocurre esto por la configuración del sistema que provoca una disminución en la presión de entrada. En la figura 3.9 se aprecia como el caudal de entrada se ha reducido desde 121 kg/h sin EGR hasta 104 Kg/h con una tasa de EGR de 18%.

La influencia de la variación de este parámetro sobre la formación de NOx es similar a la disminución de masa. La mezcla posee menos oxígeno y por lo tanto existe una disminución de la contaminación. Sin embargo una reducción del rendimiento volumétrico, una disminución de masa provocan un aumento de las emisiones de NOx.



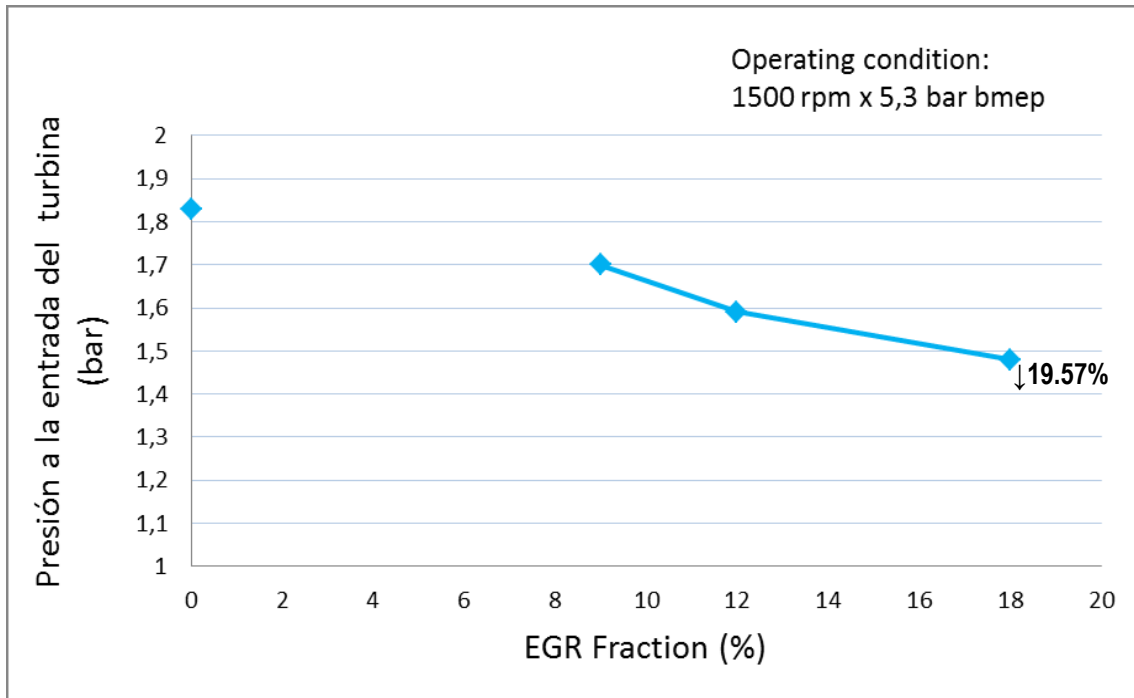
**Figura 3.9:** Caudal de entrada en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

Aunque la diferencia es relativamente baja existe una disminución en la formación de óxidos de nitrógeno debido a la reducción de  $N_2$  y sobretodo de  $O_2$ . Principalmente porque el inicio de la combustión sufre un retraso y por lo consiguiente una menor presión y temperatura.

### 3.9 Presión de entrada en turbina y velocidad de la turbina

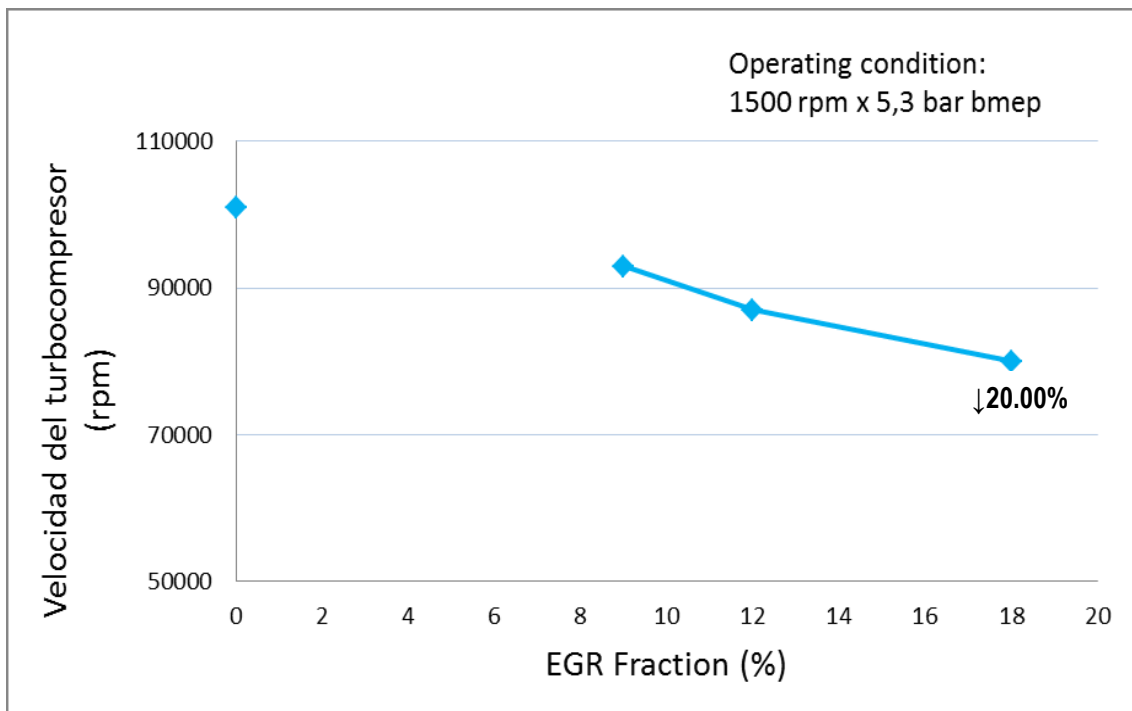
La presión en la entrada del motor se ve reducida con el aumento de tasa EGR, esto es debido a la configuración este tipo de EGR. En la figura 3.10 se aprecia como la presión disminuye 0.35 bar aproximadamente para una tasa del 18%, esto es porque la recirculación de los gases se realiza antes de llegar a turbina, por el mismo motivo el caudal de salida es inferior.





**Figura 3.10:** Presión a la entrada de la turbina en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

De igual manera ocurre con la velocidad del turbocompresor, consecuencia de la falta de caudal y del decremento de la presión con el aumento de la tasa de EGR. En la figura 3.11 se muestra como para una fracción de EGR del 18% la velocidad de giro de la turbina disminuye 20000 rpm.



**Figura 3.11:** Velocidad de la turbina en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

Se produce una disminución directa de las emisiones de NOx debido al decremento de la presión en cilindro y por consecuente la temperatura. La disminución en la velocidad de la turbina y de la presión de salida afecta de manera indirecta a la formación de NOx. Tal y como muestra la tabla 3.4, la eficiencia y la potencia de la turbina se ven reducidas con el crecimiento de la tasa de EGR. Esto

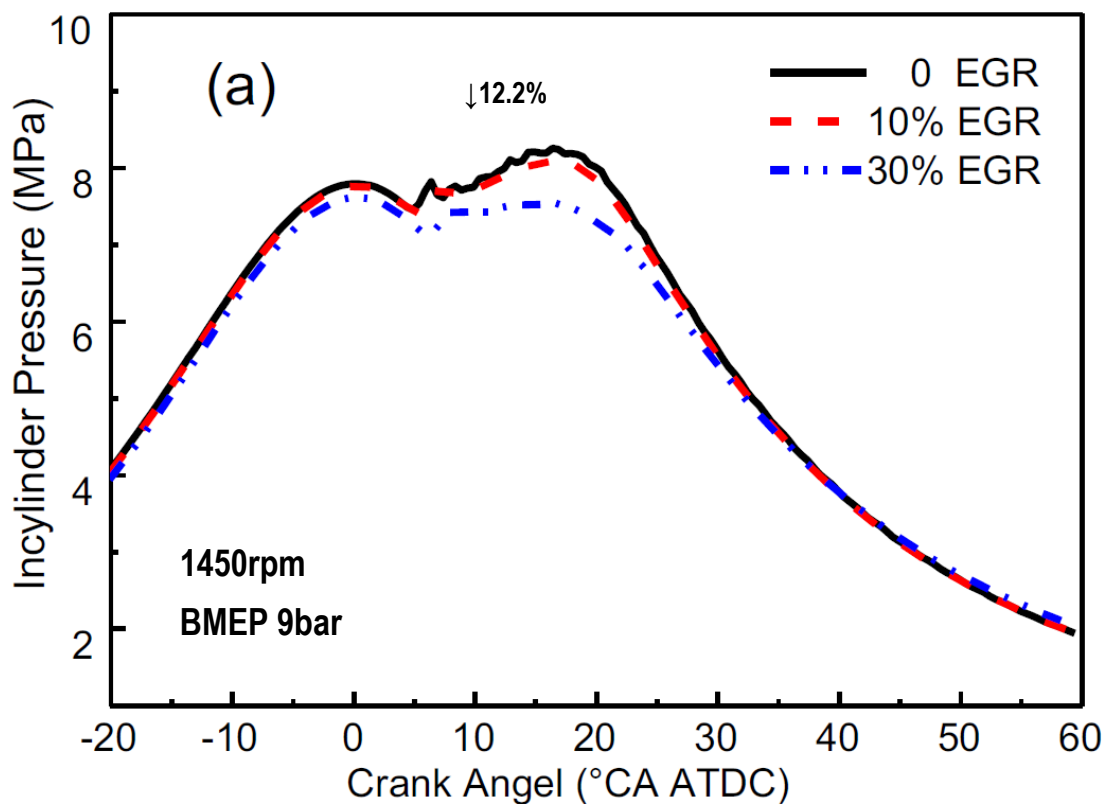
implica un aumento de los NOx debido al aumento de consumo para subsanar ese decremento de la eficiencia. Aunque existe incertidumbre en determinar el grado de influencia en las emisiones por la complejidad de cuantificar dichas influencias, una disminución de la presión provoca una combustión más lenta, un retraso de la misma y por lo tanto una menor temperatura.

**Tabla 3.4:** Variación parámetros turbocompresor a 2bar y 1500rpm. Fuente: Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto, Marco Gianoglio Bernardi [Ref. 29]

		EGR rate (%)					
		0	10	20	30	40	50
Turbine	Efficiency (%)	62.8	61.0	57.2	53.6	50.8	45.0
	Power (kW)	0.685	0.617	0.54	0.464	0.389	0.323
	Mass flow rate (kg/s)	0.03	0.027	0.023	0.020	0.017	0.014
	Back press./boost press. ratio (-)	1.16	1.16	1.17	1.19	1.19	1.23
	Rack position (%)	22.2	18.9	16	13.4	11	3.5
Compressor	Efficiency (%)	52.0	51.3	50.5	49.8	49.2	48.9
	Specific work (kJ/kg)	23.25	23.54	23.5	23.46	23.4	23.94
	Mass flow rate (kg/s)	0.029	0.026	0.023	0.020	0.017	0.014

### 3.10 Presión en cilindro

La presión máxima alcanzada en cilindro se ve reducida con el aumento de EGR. Esto se produce porque al introducir recirculación de gases inertes con esta configuración de EGR se produce una reducción de la presión inicial, una menor presencia de oxígeno e introducción de gases inertes provocando un retraso de la ignición y una combustión más lineal. Esto afecta reduciendo el pico de presión y temperatura. En la figura 3.12 se observa como la presión se reduce 10 bar para una tasa de EGR del 30%.

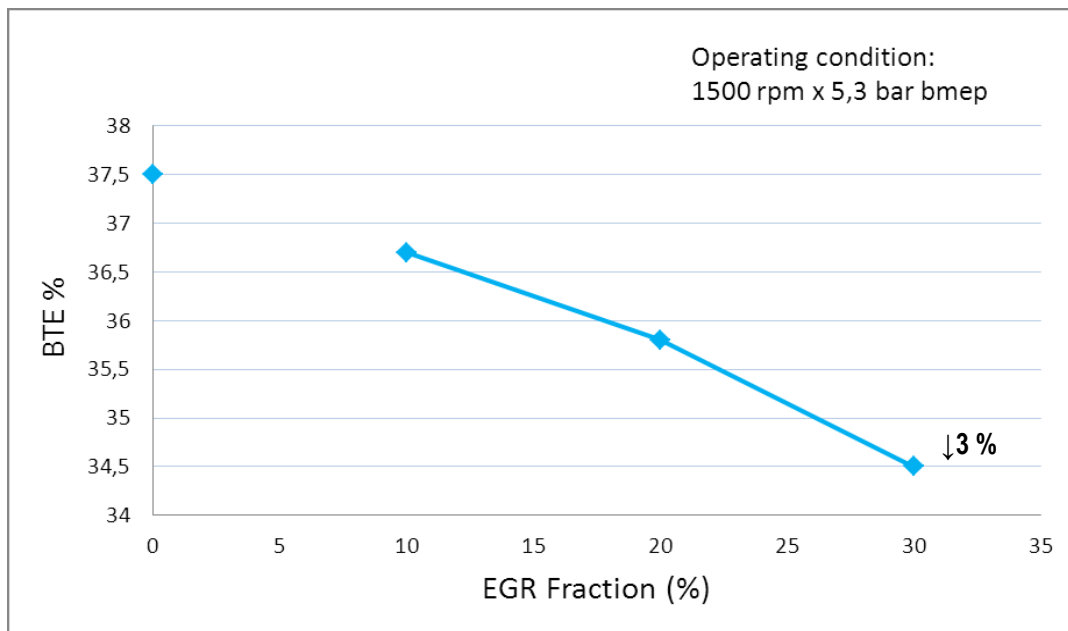


**Figura 3.12:** Variación presión en cilindro según ángulo del cigüeñal. Fuente: Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load. Xinling Li, Zhen Xu, Chun Guan, Zhen Huang [Ref. 27]

Como se ha mencionado una disminución de la presión reduce la formación de NOx porque la temperatura máxima se ve reducida. También se ve reducida la potencia debido a la reducción de presión alcanzada.

### 3.11 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica del motor se ve reducida considerablemente con el aumento de gases recirculados. La eficiencia se ve atacada por la pérdida de calidad de la combustión. Al aumentar la tasa de EGR aumenta los productos inquemados debido a una menor presencia de oxígeno y una menor presión y temperatura. En la figura 3.13 se aprecia como la eficiencia se ve reducida desde 37.5% sin la aplicación de EGR a 34.5% para una tasa del 30%.



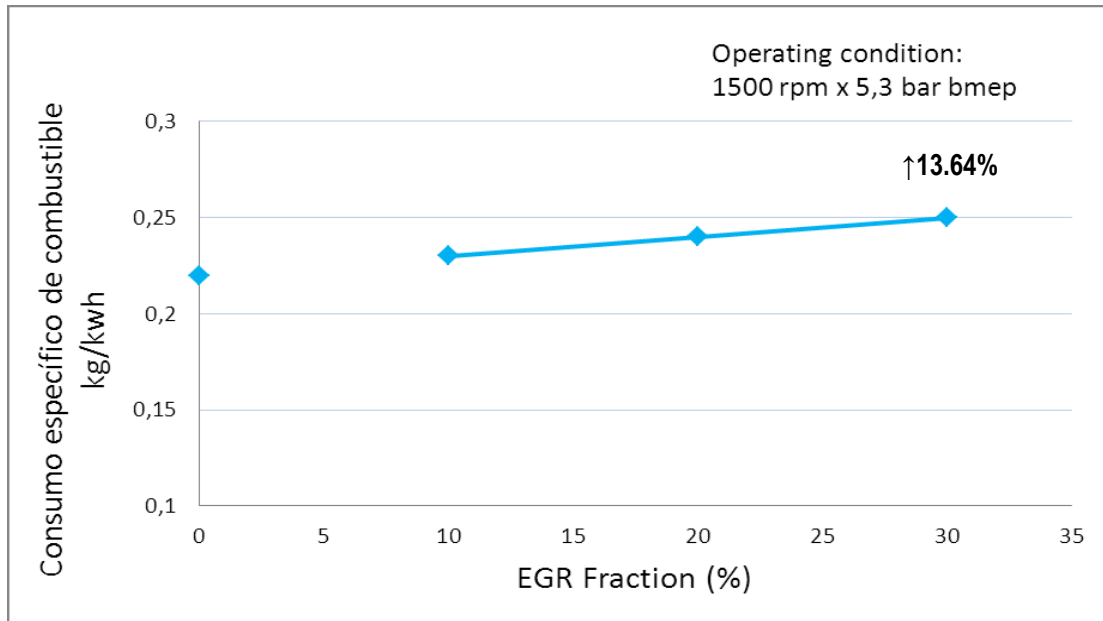
**Figura 3.13:** Eficiencia térmica en función de la tasa EGR. Fuente: *Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends*. B. Rajesh kumar a, S. Saravanan [Ref. 28]

Con una variación de la eficiencia las emisiones de NOx se ven influenciadas. En este caso los NOx se ven reducidos porque tal y como se ha comentado, la calidad de la combustión se ve agravada por una disminución de la temperatura, una menor presión, una menor velocidad de combustión y una menor presencia de oxígeno. Como punto negativo, la potencia se ve disminuida. Para alcanzar la misma potencia que sin EGR se necesita aumentar la inyección de combustible, aunque esto no es muy influyente en la formación del contaminante. Debido a que la formación de NOx a partir del combustible es mucho menor que a partir del NOx térmico.

### 3.12 Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible aumenta linealmente con el aumento de tasa EGR tal y como se aprecia en la figura 3.14. Esto es debido por una disminución de la eficiencia térmica. En la gráfica se muestra como para una tasa de EGR del 30% el consumo aumenta 0.03Kg/Kwh.

Con la inclusión de gas inerte con el sistema EGR de alta presión, disminuye la presión de entrada en el cilindro aumentando la cantidad de inquemados y disminuyendo la temperatura. Esto provoca una combustión de peor calidad con un consumo superior que sin recircular gases de escape.

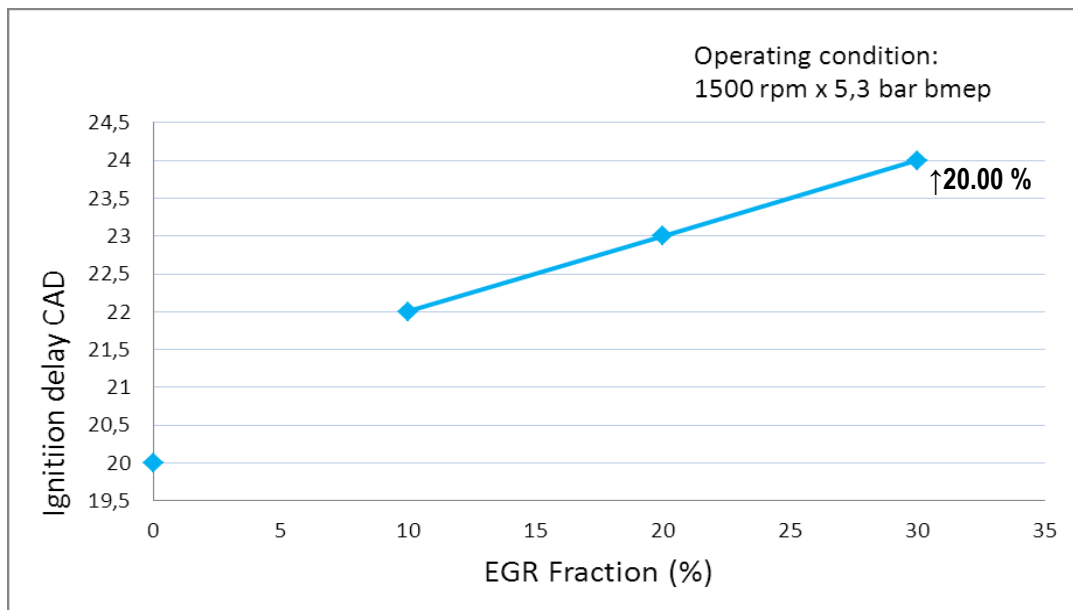


**Figura 3.14:** Consumo específico de combustible en función de la tasa EGR. Fuente: *Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends*. B. Rajesh kumar a, S. Saravanan [Ref. 28]

La repercusión del consumo específico de combustible sobre la formación de NOx afecta directamente al mecanismo de formación NO<sub>COMBUSTIBLE</sub>, aunque este mecanismo no es muy influyente sobre el NOx total, los óxidos de nitrógeno se ven aumentados teniendo en cuenta el consumo específico de combustible.

### 3.13 Tiempo de retraso

Como se ha comentado, con el uso de EGR la combustión se inicia más tarde. Esto es debido a la menor presencia de oxígeno, la inclusión de gases inertes y menores condiciones de presión al inicio de la combustión. En la figura 3.15 se aprecia como el inicio de la combustión se retrasa en 4° para una tasa de EGR del 30%.

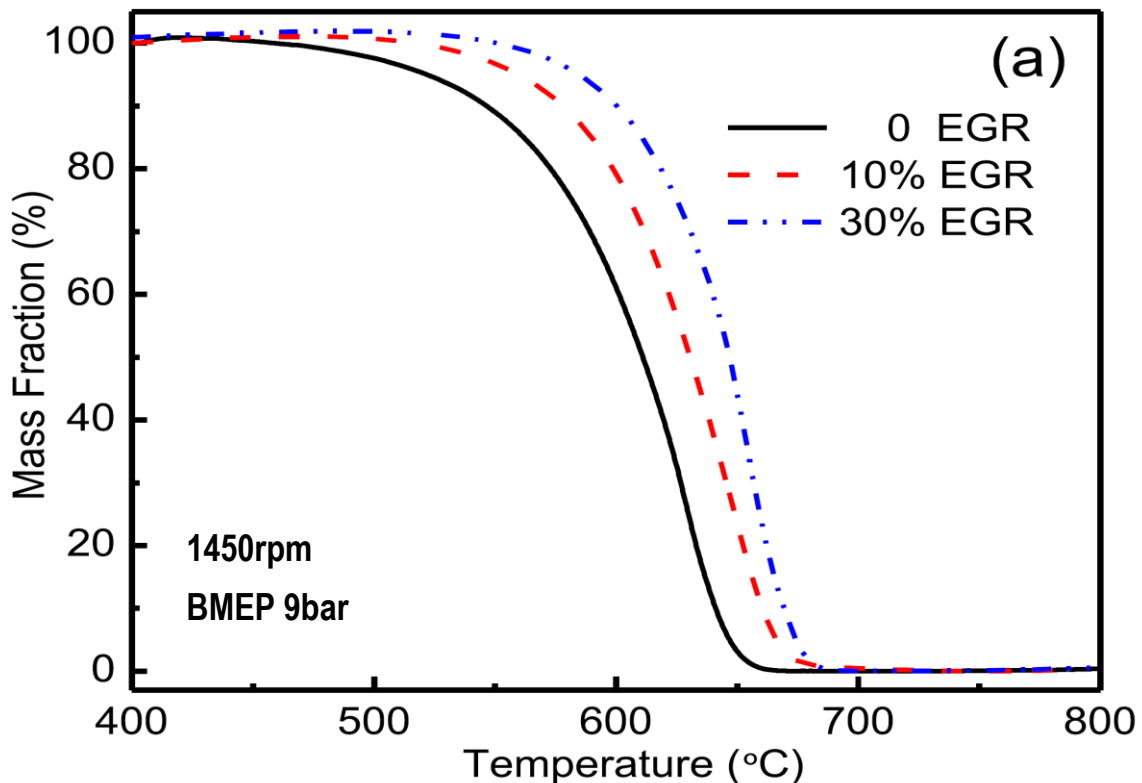


**Figura 3.15:** Tiempo de retraso en función de la tasa EGR. Fuente: *Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends*. B. Rajesh kumar, S. Saravanan [Ref. 28]

Un retraso de la ignición provoca un pico de temperatura y de presión menor y por lo tanto un decremento de emisión de NOx.

### 3.14 Fracción de masa quemada

En la figura 3.16 se muestra la fracción de masa quemada con respecto a la temperatura. Como se puede comprobar se necesita más temperatura para quemar el combustible, esto es debido a que al introducir masa inerte, la reactividad de la mezcla se ve disminuida por una reducción de O<sub>2</sub> y por una reducción de presión.



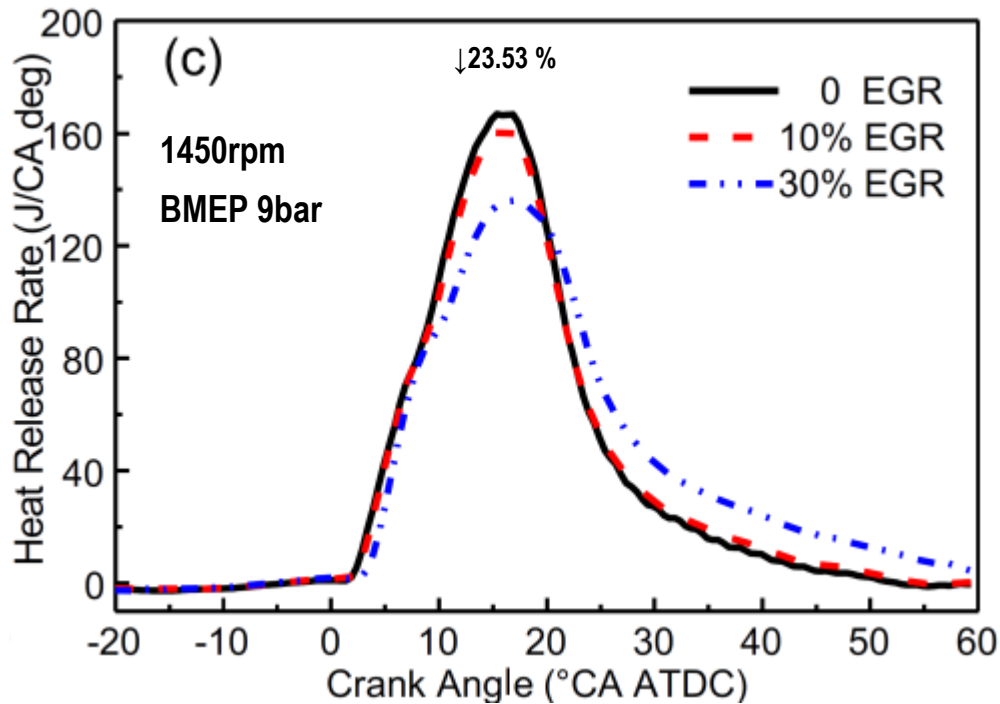
**Figura 3.16:** Fracción de masa quemada según temperatura. Fuente: *Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load.* Xinling Li, Zhen Xu, Chun Guan, Zhen Huang [Ref. 27]

En la figura 3.16 se observa como para quemarse la masa en un 100% se necesita más temperatura, pero se quema la totalidad de la misma. Como se ha comentado anteriormente, se puede ver como un retraso de la combustión. Teniendo en cuenta este parámetro no se puede determinar la influencia con respecto a la formación de NOx de forma directa.

### 3.15 Calor liberado

Como se ha comentado, con el aumento de la recirculación de gases inertes la combustión se retrasa. Esto implica un pico de presión y temperatura menor. En la figura 3.17 se observa como el pico de calor es menor y con cierto retraso, la pendiente es menos inclinada, lo que representa una velocidad de combustión más lenta y después del pico se observa un decremento más progresivo.

La cantidad de NOx se ven reducidos debido al decremento de la temperatura causado por la disminución de velocidad y el retraso de la combustión. También se observa un decremento progresivo posterior al pico de calor. Esto influye de manera positiva debido a que impide que la reacción se congele.

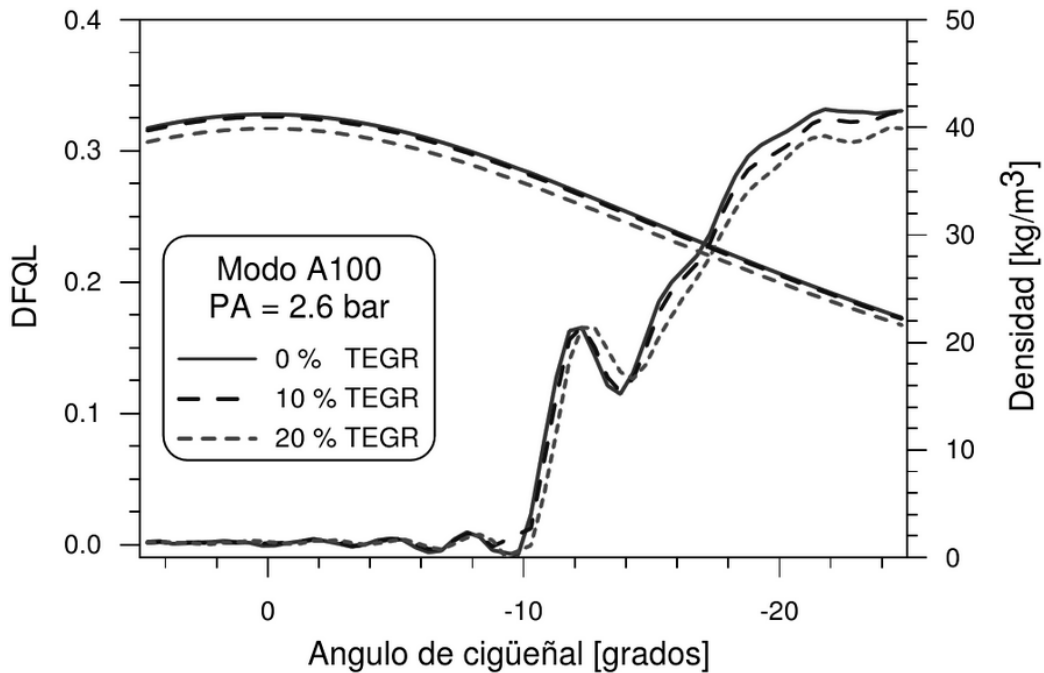


**Figura 3.17:** Calor liberado según ángulo del cigüeñal. Fuente: *Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load.* Xinling Li, Zhen Xu, Chun Guan, Zhen Huang [Ref. 27]

### 3.16 Combustión premezclada

La proporción de calor liberado en la combustión premezclada sobre la combustión total en un motor diésel sobrealimentado es aproximadamente del 15%. Este parámetro depende de la presión de inyección, presión de la cámara, retraso de la combustión y densidad de la cámara principalmente. La cantidad de combustible quemado es proporcional a la masa inyectada (mayor presión, mayor masa) e inversamente proporcional a la densidad de la cámara.

Con el aumento de tasa EGR, la densidad de la mezcla se ve disminuida, se produce un retraso de la combustión y la presión de la cámara al inicio es algo inferior. Basándose en fundamentos teóricos la proporción de combustión premezclada sobre la combustión total aumenta y sufriría un retraso. En la figura 3.18, observando la tasa de calor liberado, se aprecia cómo se produce un retraso en la combustión con el aumento de gases recirculados y la fracción de combustión premezclada sufre un aumento insignificante.



**Figura 3.18:** Combustión premezclada según ángulo del cigüeñal. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. F. Payri [Ref. 30]

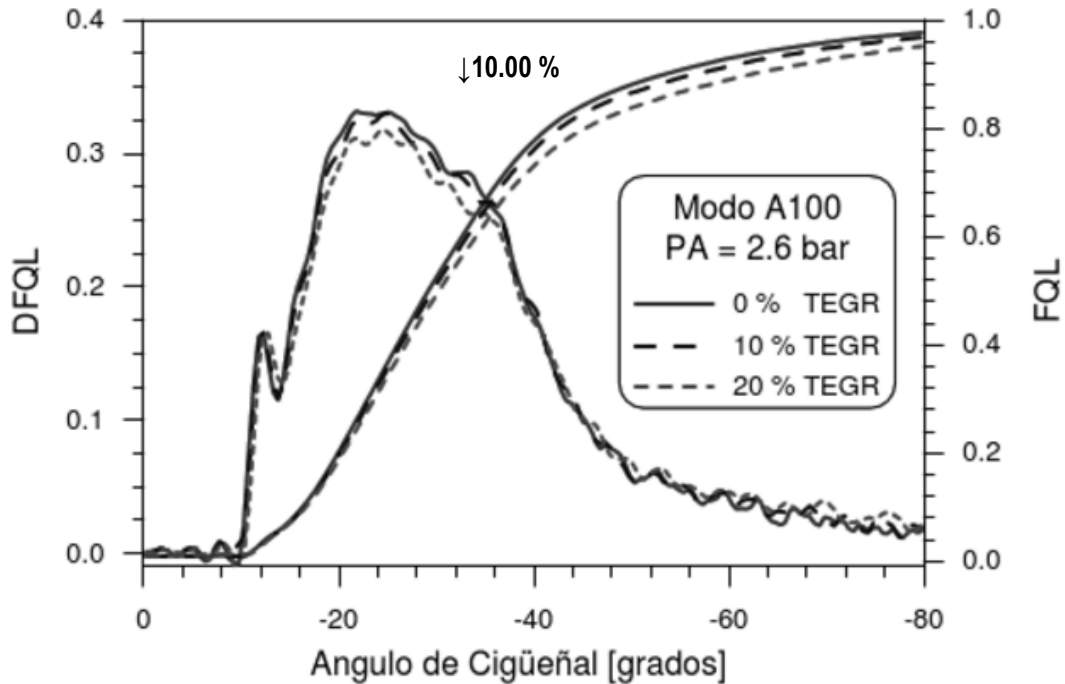
La influencia de dicho parámetro sobre la emisión de NOx es insignificante. Esto es debido a que la proporción de combustión premezclada se mantiene al margen de la variación de gases recirculados.

### 3.17 Combustión por difusión

El efecto de la tasa EGR sobre la combustión por difusión se puede entender como una masa de combustible que va mezclándose con el gas circundante (aire más productos de combustión) a medida que el mismo avanza hasta encontrar un frente de llama difusiva donde existen unas condiciones estequiométricas respecto a la cantidad de oxígeno. Con el aumento de tasa se produce una disminución en la concentración de oxígeno, por lo que la masa de gases que englobada necesaria para quemar la misma cantidad de combustible debe ser mayor. Por lo tanto, el chorro de combustible tiene que recorrer una mayor distancia para alcanzar la concentración de oxígeno necesaria. Por este motivo la tasa de calor liberado es menor y por lo tanto una mayor duración del proceso de combustión con el aumento de la recirculación de gases inertes.

En la figura 3.19 se muestra el calor total liberado acumulado y su derivada. Se aprecia como la velocidad de combustión se ve reducida con el aumento de tasa EGR y por lo tanto la tasa de calor liberado se reduce en un 10% aproximadamente con una tasa del 20%.

Las emisiones de NOx se ven reducidas con la reducción de la velocidad de combustión por difusión. Esto es debido a la reducción de temperatura con la inclusión de gas recirculado.



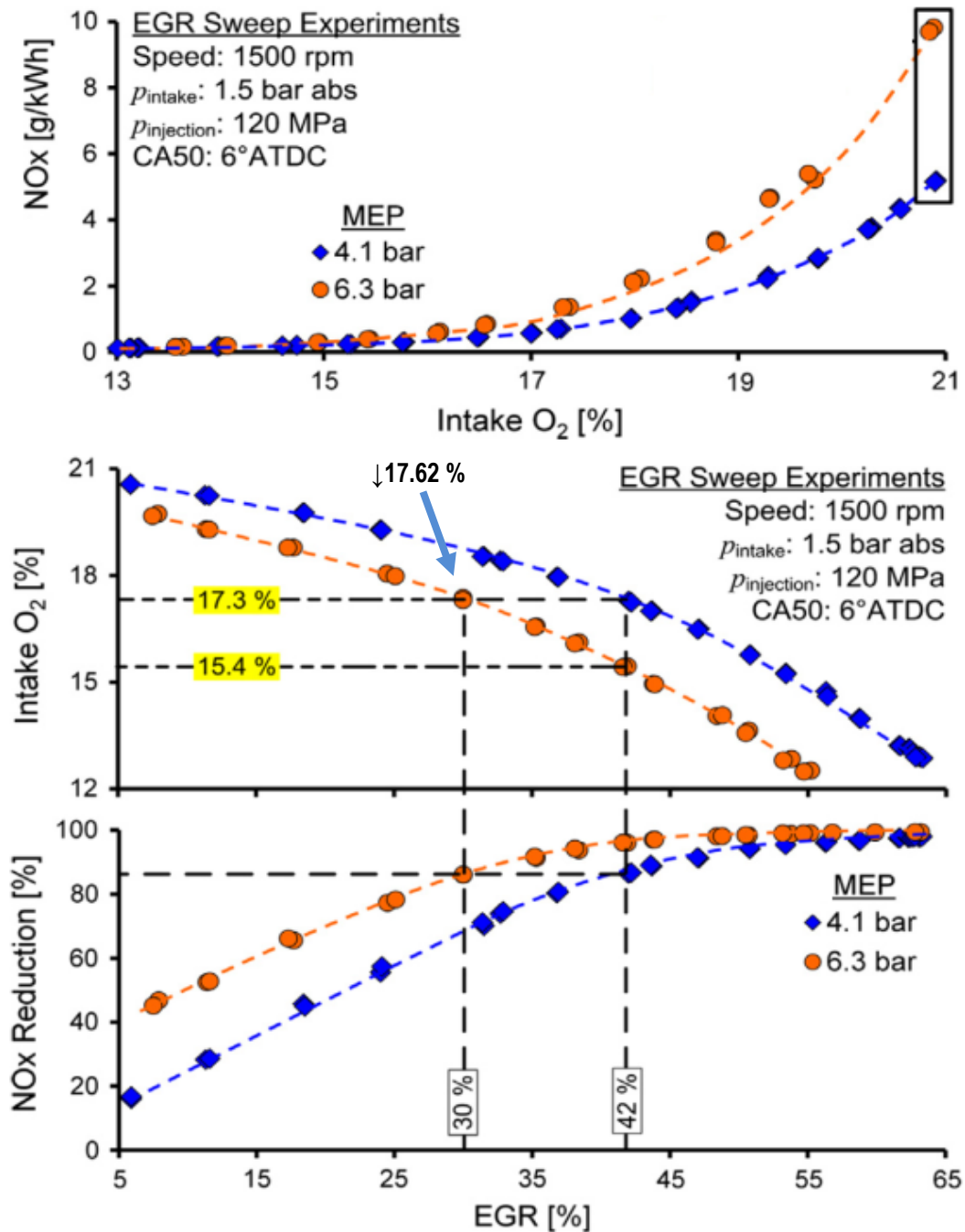
**Figura 3.19:** Combustión difusión plena carga, 1200rpm según ángulo del cigüeñal. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. F. Payri [Ref. 30]

### 3.18 Cantidad de O<sub>2</sub>

La cantidad de oxígeno en la mezcla se ve reducida con el aumento de tasa debido a la sustitución de masa fresca por masa inerte. En la figura 3.20 se observa el decremento de la cantidad de oxígeno con el aumento de la tasa según dos presiones medias efectivas. Con el uso de la EGR se intenta llegar a una mezcla estequiométrica para reducir la velocidad de la reacción y de esta manera reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> al máximo. En la figura 3.20 se aprecia cómo según las condiciones de operación la reducción máxima se produce a una distinta tasa de EGR.

Una reducción de oxígeno provoca un decremento de la emisión de NO<sub>x</sub>. La temperatura de la cámara se ve reducida debido a que al existir una mezcla con menor O<sub>2</sub> la velocidad de la reacción es más lenta. También influye en la disminución de emisiones de NO<sub>x</sub> debido a la menor cantidad de oxígeno en el frente de llama para reaccionar con el nitrógeno del aire y del combustible.





**Figura 3.20:** Proporción de oxígeno en función de la tasa EGR. Fuente: Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles Usman Asad, Ming Zheng [Ref. 31]

En la figura 3.20 se aprecia como para reducir con mayor porcentaje los NOx nos debemos aproximar al dosado estequiométrico.

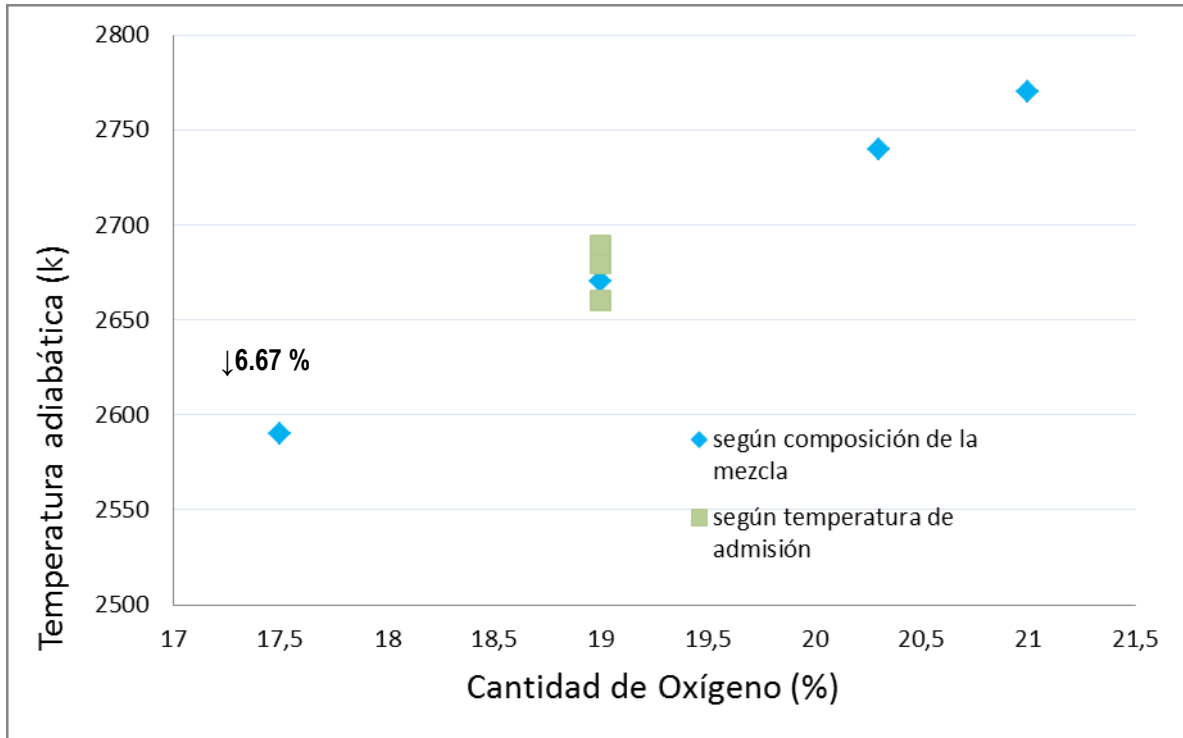
### 3.19 Temperatura adiabática de la llama

La temperatura adiabática de la llama que se alcanza en una combustión está estrechamente relacionada con la temperatura al inicio del proceso de combustión y con la composición de la mezcla. Estos parámetros se ven afectados con la sustitución de aire recirculado por aire fresco.

Como ya se ha visto anteriormente variando la tasa de EGR se modifica las características de la mezcla.

Calor específico → Se ve incrementado por la sustitución del  $N_2$  y  $O_2$  presente en el aire por gases con mayor capacidad calorífica como son el  $CO_2$  y el  $H_2O$  entre otros.

Temperatura de admisión → Se ve incrementada con el aumento de tasa de EGR, debido a que la masa de aire recirculada está a mayor temperatura, aunque este parámetro afecta en menor medida al aumento de la temperatura adiabática.



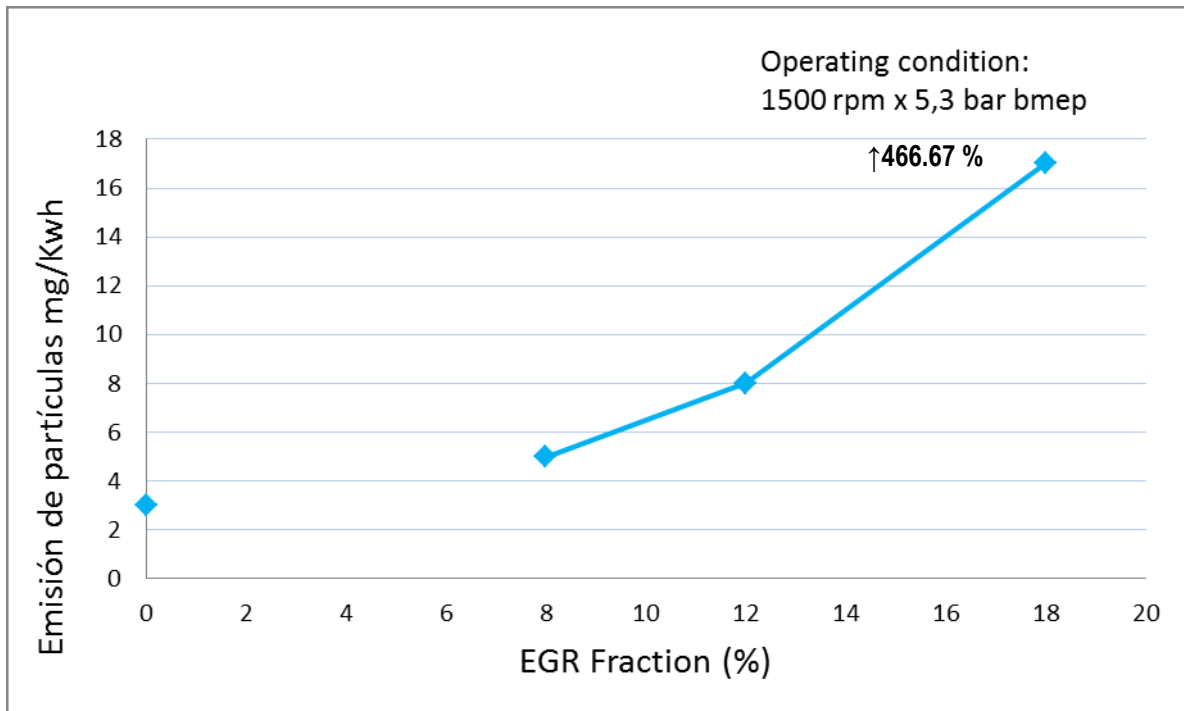
**Figura 3.21:** Gráfica modelo teórico temperatura adiabática. Fuente: Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel. Payri [Ref. 30]

En el ensayo recogido del libro nombrado se observa como varía la temperatura adiabática de la llama con la tasa de EGR, mientras que con la variación de la temperatura de admisión (780K-1020K) a una tasa de EGR 15% (19%  $O_2$ ) la disminución de temperatura no es tan significativa. Partiendo de un dosado relativo de 0.5, con la variación de la composición para una tasa de EGR del 25% se consigue una disminución de la temperatura de la llama del orden de 170°C. Mientras que con la variación de la temperatura de admisión para la misma tasa de EGR la temperatura adiabática se ve reducida unos 30°C aproximadamente.

El hecho de reducir la temperatura adiabática de la llama tiene una gran repercusión con respecto a la formación de  $NO_x$ . Debido a que afecta directamente a la formación de  $NO$  mediante el mecanismo de  $NO$  térmico, que tal y como se comentó con anterioridad es el causante del 90% de la formación de  $NO$ . Según el ensayo estudiado el autor llega a la conclusión con una reducción en la temperatura adiabática del 4.3% se reduce la formación de  $NO_x$  en un 28% con una tasa de recirculación de gases del 25%.

### 3.20 Emisión de partículas

La emisión de partículas se incrementa de una manera considerada con el empleo de EGR. La emisión de partículas llega a multiplicarse por 10. Esto es debido a que la calidad de la combustión se ve sacrificada con la inclusión de gases recirculados.



**Figura 3.22:** Emisiones de partículas en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

En la figura 3.22 se aprecia como con el aumento de gases recirculados la formación de partículas se ve alterada fuertemente.

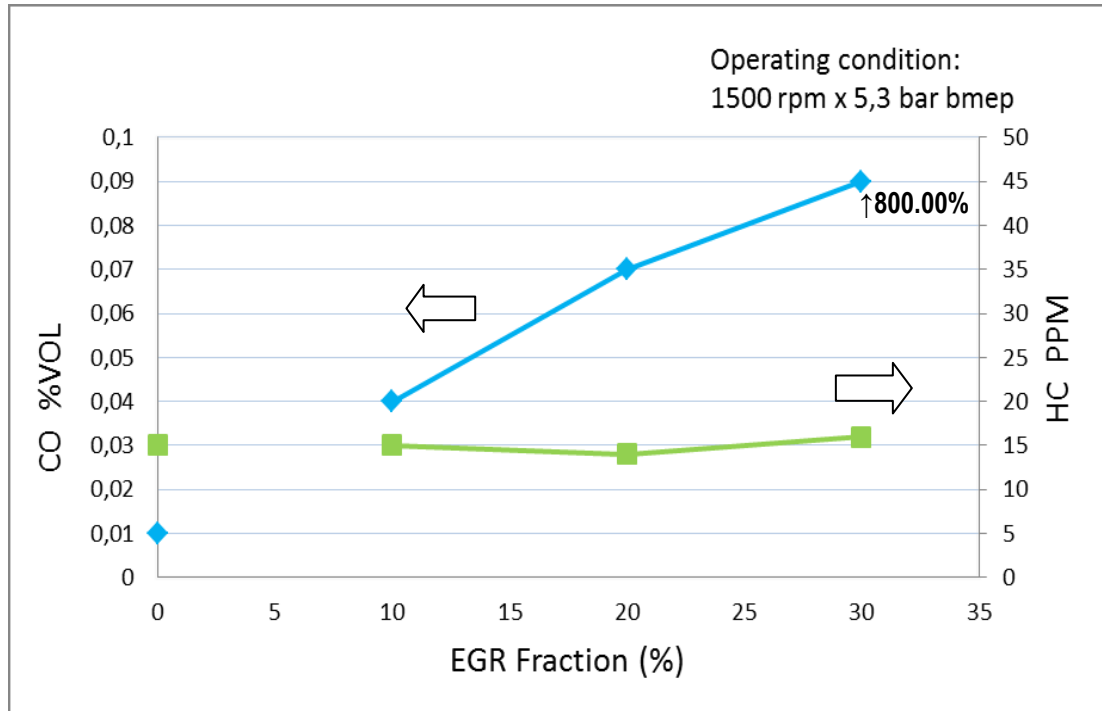
La presencia de partículas no tiene ninguna consecuencia directa sobre la emisión de NOx.

### 3.21 Emisión de HC/CO

La emisión de HC se ve aumentada con la presencia de gas recirculado en la mezcla debido a que la calidad de la combustión empeora de igual manera que el caso de las partículas. Esto se puede demostrar observando como la eficiencia térmica disminuye. En la figura 3.23 se puede ver como la emisión de HC se ve mantiene estable, esto ocurre porque como se comentó al comienzo, la temperatura inicial es un poco más alta y produce una situación opuesta.

Las emisiones de CO son aumentadas considerablemente con el aumento de gas recirculado. En este caso no es exponencial como ocurre con la emisión de partículas, sino es algo más lineal. La causa del aumento de CO es la misma que los anteriores casos, una combustión más lenta, a menor temperatura y presión y con menor presencia de oxígeno. Según la imagen 3.23 para una tasa de EGR del 30% las emisiones de CO pasan de 0.01% al 0.09%.

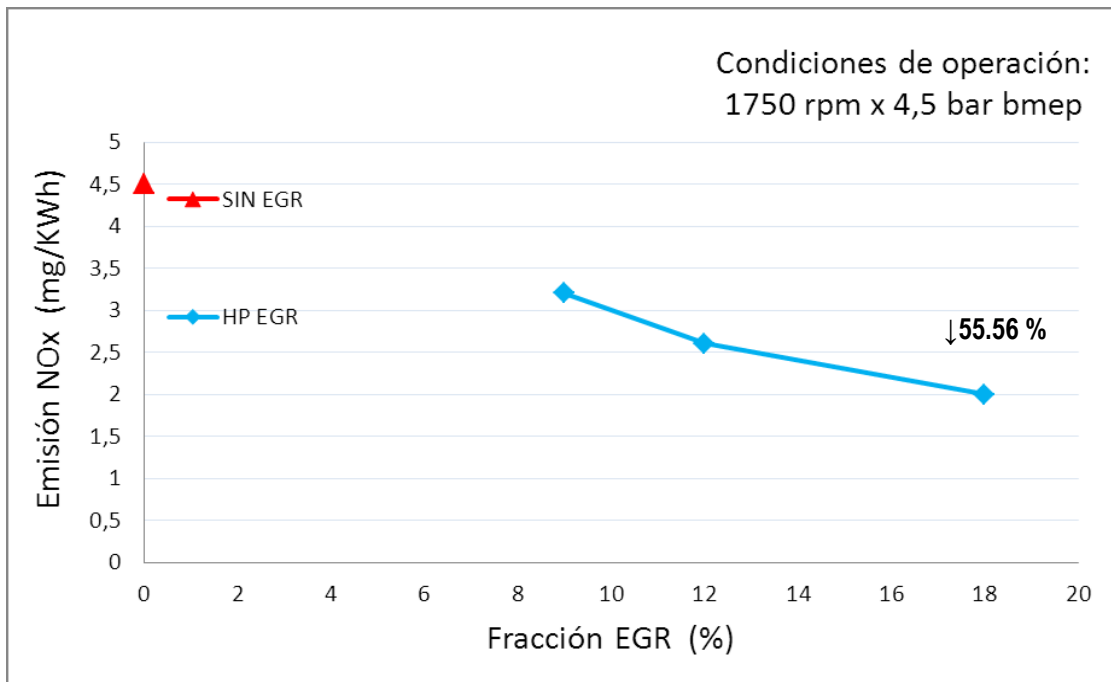
La emisión de HC/CO no tiene ninguna consecuencia negativa en la formación de NOx



**Figura 3.23:** Emisiones de HC/CO en función de la tasa EGR. Fuente: *Experimen Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends.* B. Rajesh kumar, S. Saravanan [Ref. 1]

### 3.22 Síntesis de la formación de NOx

En la figura 3.24 se muestra el resultado de todos los parametros analizados. Se observa una disminución de las emisiones de NOx a medida que aumenta la tasa de EGR, tambien se observa como la eficiencia del sistema disminuye con el aumento de tasa. Esto ocurre porque con tasas altas de EGR se produce un aumento de temperatura en los gases de entrada.



**Figura 3.24:** Emisiones de óxidos de nitrógeno en función de la tasa de EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni, Massimo Capobianco [Ref. 1]

En la Tabla 3.5 se muestra cómo afecta la tasa de EGR en los distintos parámetros de combustión estudiados y como repercuten la variación de dichos parámetros sobre la formación de NOx.

**Tabla 3.5:** Tabla resumen repercusión EGR sobre los parámetros de combustión y efectos sobre la emisión de NOx.

Parámetro	Influencia de la EGR	Influencia sobre la generación de NOx
Composición de la masa de aire	↑ ↓*	↓
Proporción aire fresco/combustible	↓ ↓28.60 %	↓
Masa admitida	↓ ↓32.80 %	↓
Calor específico de la masa en cilindro	↑ ↑2.52 %	↓
Temperatura entrada al motor	↑ ↑48.57 %	↑
Temperatura máxima	↓ ↓4,15 %	↓
Temperatura salida del motor Antes de turbina	↑ ↑8.12 %	↓
Caudal de entrada al motor	↓ ↓14.05 %	↓
Presión de entrada en turbina y Velocidad del turbocompresor	↓ ↓19.57 % y 20.00 %	↓
Presión en cilindro	↓ ↓12.2%	↓
Eficiencia térmica	↓ ↓3 %	↓
Consumo específico de combustible	↑ ↑13.64 %	↑
Tiempo de retraso	↑ ↑20.00 %	↓
Fracción de masa quemada	—	—
Calor liberado	↓ ↓23.53 %	↓
Combustión premezclada	—	—
Combustión por difusión	↓ ↓10.00 %	↓
Cantidad de O <sub>2</sub>	↓ ↓17.62 %	↓
Temperatura adiabática de la llama	↓ ↓6.67 %	↓
Emisión de partículas	↑ ↑466.67 %	—
Emisión de HC	—	—
Emisión de CO	↑ ↑800.00%	—
Emisión de NOx	↓ ↓55.56 %	↓

\*La recirculación de gases provoca el siguiente cambio en la composición de la masa

**Tabla 3.6:** Tabla componentes de la mezcla con y sin EGR

Componentes	Proporción sin EGR	Proporción con tasa del 25%
Nitrógeno	79.06%	78.3%
Oxígeno	20.94%	17.57%
Dióxido de Carbono	0%	2.22%
Agua	0%	1.92%

La influencia de la variación de los parámetros sobre la formación de NOx son basados en dos teorías de reducción por un lado la reducción de la temperatura de la llama con la recirculación de los gases de escape para conseguir una disminución de los NOx y por otro lado mediante la reducción de oxígeno en la admisión y por lo tanto en el frente de llama con la recirculación de gases inertes con la finalidad de reducir los NOx.

En el libro *“Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel”* se realiza un estudio para cuantificar la repercusión las dos teorías comentadas en la formación de NOx. Por un lado se plantean los efectos que provoca una reducción de la concentración de O<sub>2</sub> y por otro lado la reducción de la temperatura de la llama.

Para separar estos dos efectos se realizó un estudio bajo un modelo de cálculo de productos de la combustión y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Tasa de EGR 30% \_\_ Reducción oxígeno 21.6%.

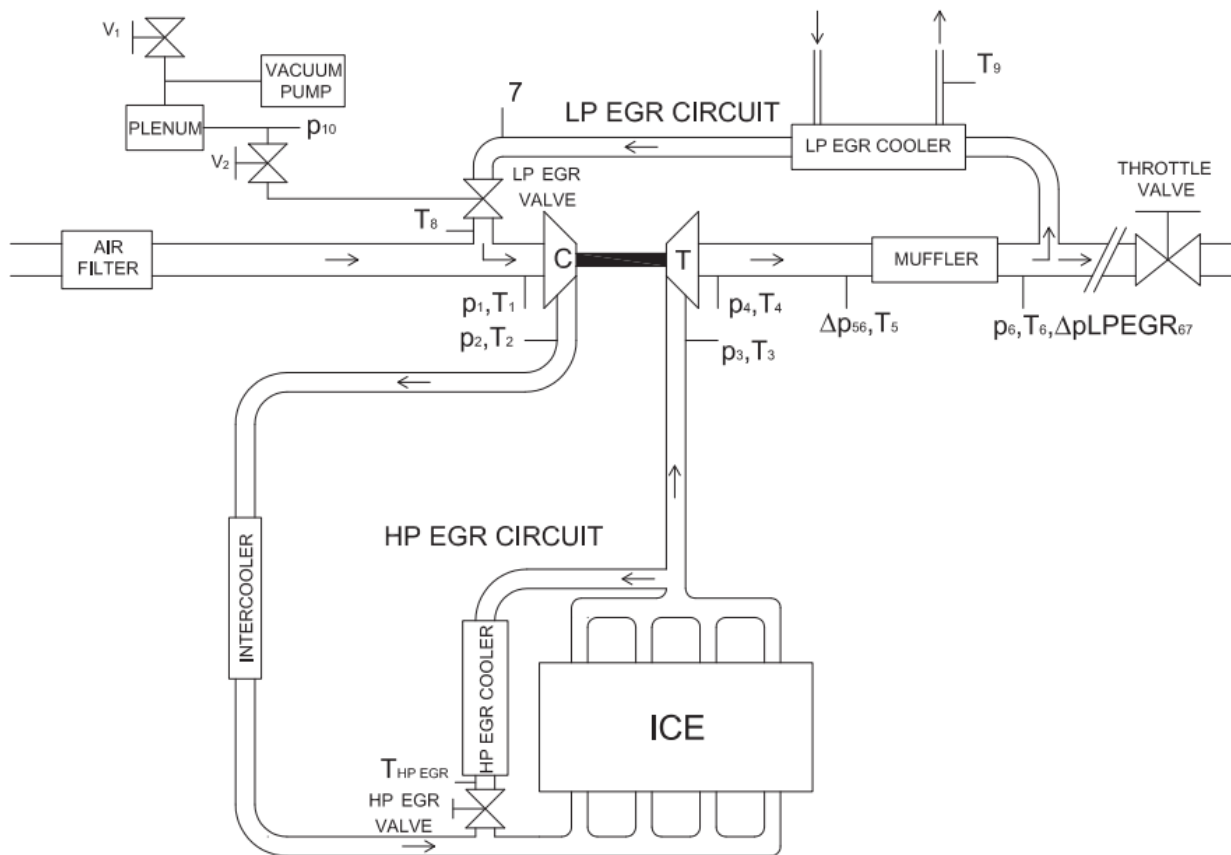
Para una tasa del 30% y solo teniendo en cuenta la teoría de reducción den la concentración de oxígeno, los NOx se ven reducidos en un 0.6%.

- Tasa de EGR 30% \_\_ Reducción temperatura de la llama en 4.3%.

Para una tasa de EGR del 30% y solo teniendo en cuenta la influencia de la temperatura en la formación de NOx, los resultados de los mismos han sido una reducción del 28%. [Ref. 30]

## 4 COMPARATIVA DE LA EGR LP Y EGR HP

En este apartado se realiza una comparación de los sistemas de recirculación de gases de escape de alta y de baja presión (HP y LP EGR) instalados en un motor diésel con el fin de analizar su influencia en el proceso de combustión, consumo de combustible y las emisiones contaminantes, principalmente las emisiones de NOx. En la figura 4.1 se puede observar las diferencias entre ambos sistemas. La principal diferencia viene determinada por el lugar de donde recircula el aire. La EGR HP introduce el gas inerte en la entrada del colector de admisión desde la salida del colector de escape mediante la diferencia de presión. Sin embargo la EGR LP recircula el gas desde aguas debajo de turbina introduciéndolo aguas arriba del compresor creando una diferencia de presión con una válvula en el conducto de escape.



**Figura 4.1:** Esquema componentes motor de encendido por compresión Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni [Ref. 1]

Se han utilizado tres experimentos para realizar la comparativa de los dos sistemas EGR.

El experimento tomado de Giorgio Zamboni y Marco Copobianco ha sido realizado en un motor de 4 cilindros de 4 tiempos con una cilindrada de 1900cm<sup>3</sup> con sistema de inyección de rail común, equipado con turbo compresor de geometría variable con intercambiador de calor de admisión y con sistemas de recirculación de gases de escape de alta y baja presión refrigerados tal y como se observa en la figura 4.1 añadida. La LP EGR refrigerada mediante un intercambiador líquido – aire y la HP EGR aire – aire. [Ref. 1]

El experimento realizado por Youngsoo Park y Choongsik Bae ha sido realizado en un motor tetra cilíndrico de 4 tiempos con una cilindrada de 2200cm<sup>3</sup> con un sistema de inyección de rail común de tercera generación de Bosch, equipado con un turbocompresor de geometría variable con accionamiento eléctrico. Los sistemas de recirculación de gases tienen la misma configuración del ensayo anterior, con la diferencia que este está equipado con filtro partículas aguas arriba de la EGR

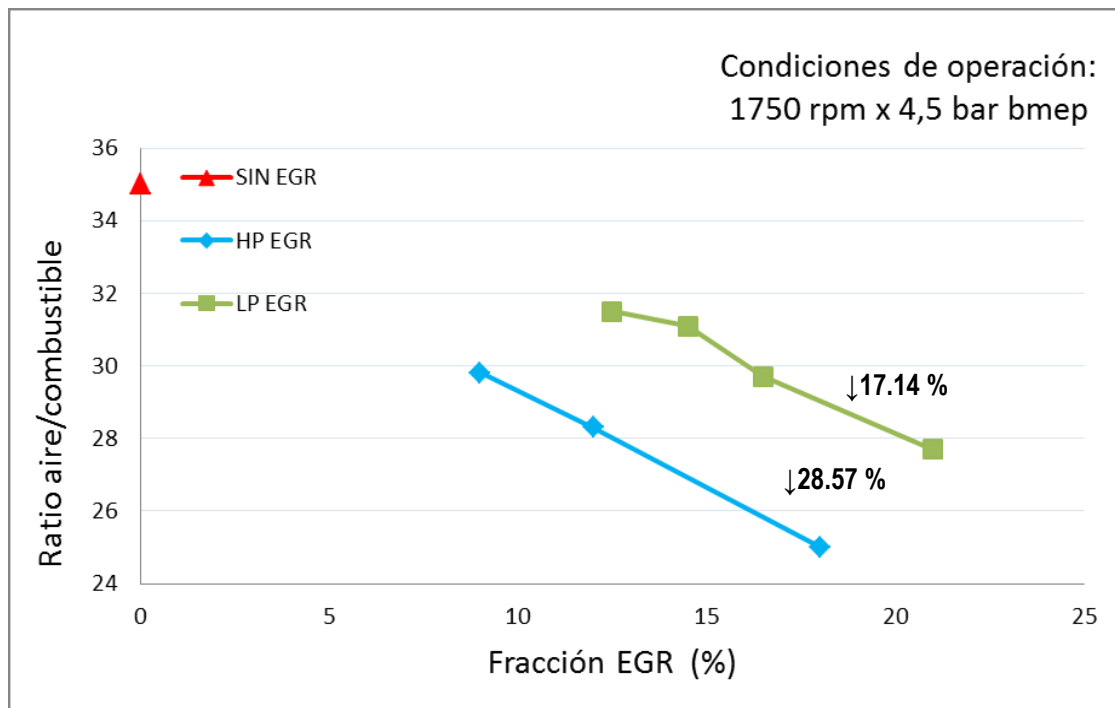
LP. Por lo tanto este ensayo no se puede comparar los dos sistemas con respecto a las partículas. [Ref. 31]

El experimento tomado de Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto y Marco Gianoglio Bernardi se ha realizado en un motor tetra cilíndrico de 4 tiempos con una cilindrada de 1956cm<sup>3</sup> con un sistema de inyección de rail común de segunda generación de Bosch. Los sistemas de recirculación tienen la misma configuración que el experimento anterior. [Ref. 29]

#### 4.1 Ratio aire/combustible

Como se comentó en el apartado 3, con la recirculación de gases de escape se consigue un menor ratio de aire/combustible. Esto ocurre debido a que el tipo de EGR utilizado es de sustitución, en el cual la masa fresca es suplida por masa inerte procedente de combustiones anteriores.

En la figura 4.2 se observa como la proporción de aire/combustible para la EGR LP es mayor que para la de alta presión. Con la EGR LP las condiciones de entrada se aproximan a las de sin EGR. Esto es debido a la configuración de la misma y su baja influencia en el circuito de entrada al motor. Los gases inertes son introducidos aguas arriba del compresor. Por lo tanto, la masa es introducida con mayor presión y una mayor densidad debido al decremento de la temperatura. Sin embargo con el aumento de tasa EGR HP el aire en turbina se ve reducido.



**Figura 4.2:** Ratio aire/combustible según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni [Ref. 1]

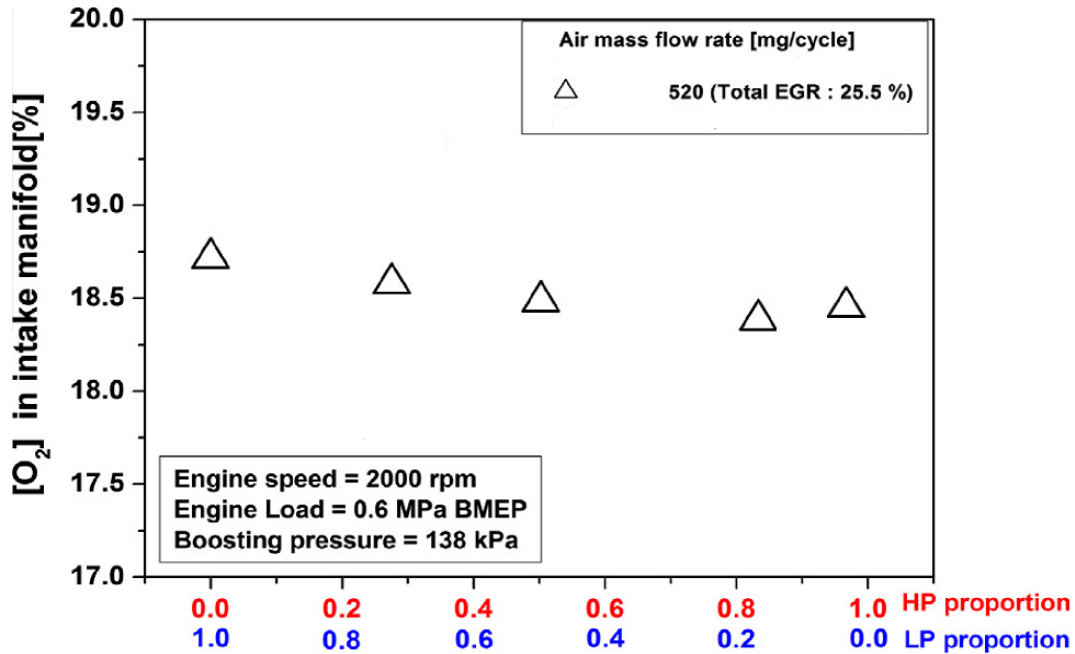
Como se observa en la figura 4.2 para una misma tasa, la relación de aire/combustible es menor para la HP EGR. Esto repercute positivamente en la emisión de NOx debido a los siguientes factores:

- La proporción de oxígeno en el frente de llama se ve reducida. Por lo tanto la oxidación del N<sub>2</sub> se ve reducida. (Mejor EGR HP)
- Una relación de aire/combustible mayor produce un decremento en la temperatura y por lo tanto una disminución de NOx. Esto tiene sentido suponiendo que la cantidad de gases recirculados con la EGR LP no se ven disminuidos. (Mejor EGR LP)

Por lo tanto la comparación de EGR según la emisión de NOx para una misma tasa de EGR, la EGR HP se ve beneficiada según este parámetro.



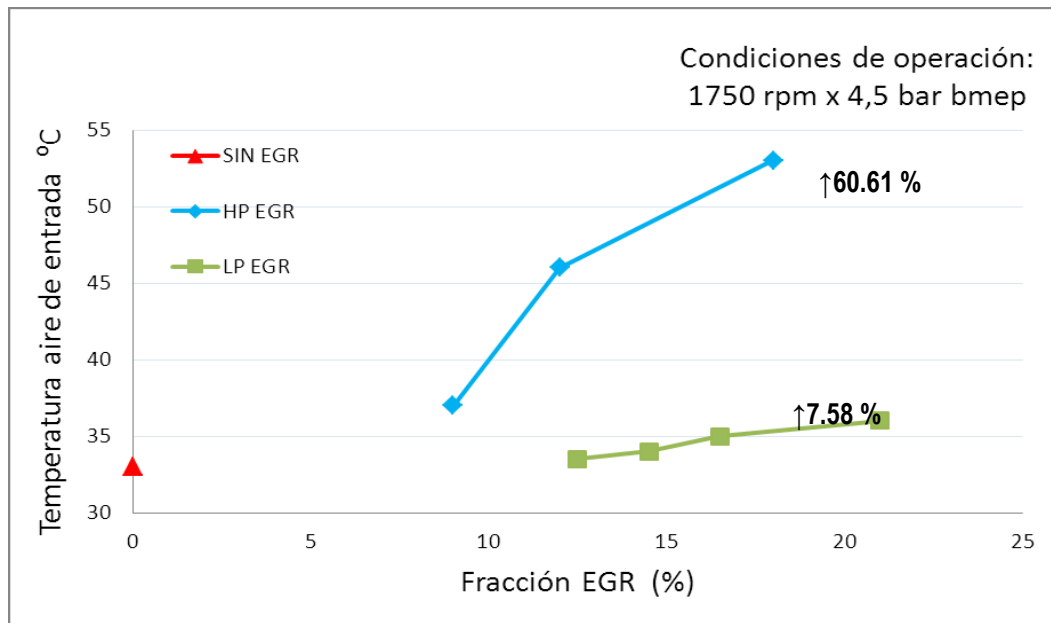
En la siguiente figura 4.3 se corrobora la reducción de oxígeno en la mezcla con la configuración de EGR de alta presión. Según la teoría de reducción de contaminante NOx, La EGR HP se ve beneficiada teniendo en cuenta este parámetro.



**Figura 4.3:** Variación sobre el O<sub>2</sub> de entrada según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

## 4.2 Temperatura del aire de entrada al motor

La temperatura del aire de entrada en el motor aumenta con el uso de los dos sistemas EGR. Sin embargo con la configuración de baja presión el aumento de la temperatura es insignificante en comparación con la EGR de alta presión. Esto es debido al tipo de configuración de la EGR LP. Los gases de escape son introducidos antes del intercooler. Por lo tanto la mezcla en la admisión tiene una temperatura similar tal y como se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.4:** Temperatura del aire de entrada según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Giorgio Zamboni [Ref. 1]

Un aumento de la temperatura de entrada repercute de manera negativa sobre la formación de NOx. La variación de este parámetro afecta fuertemente en la emisión de NOx. Debido a que el mecanismo de formación del NO<sub>TÉRMICO</sub> tiene una influencia del 90% sobre el total.

En la figura 4.4 se observa como la temperatura de entrada crece con el aumento de la tasa y es mucho mayor en el caso de la EGR de alta presión, mientras con la EGR de baja presión se mantiene a una temperatura similar y estable.

Un aumento de la temperatura de entrada tiene las siguientes consecuencias:

- Se produce un incremento de temperatura proporcional al final de la carrera de compresión.

Una mayor temperatura, según la teoría NOx térmico, equivale a un aumento de formación de NOx.

- Un aumento de velocidad de la combustión y avance del inicio de la combustión.

Los NOx se ven aumentados porque un incremento de la velocidad y del avance de la combustión genera mayor presión y por lo tanto mayor temperatura.

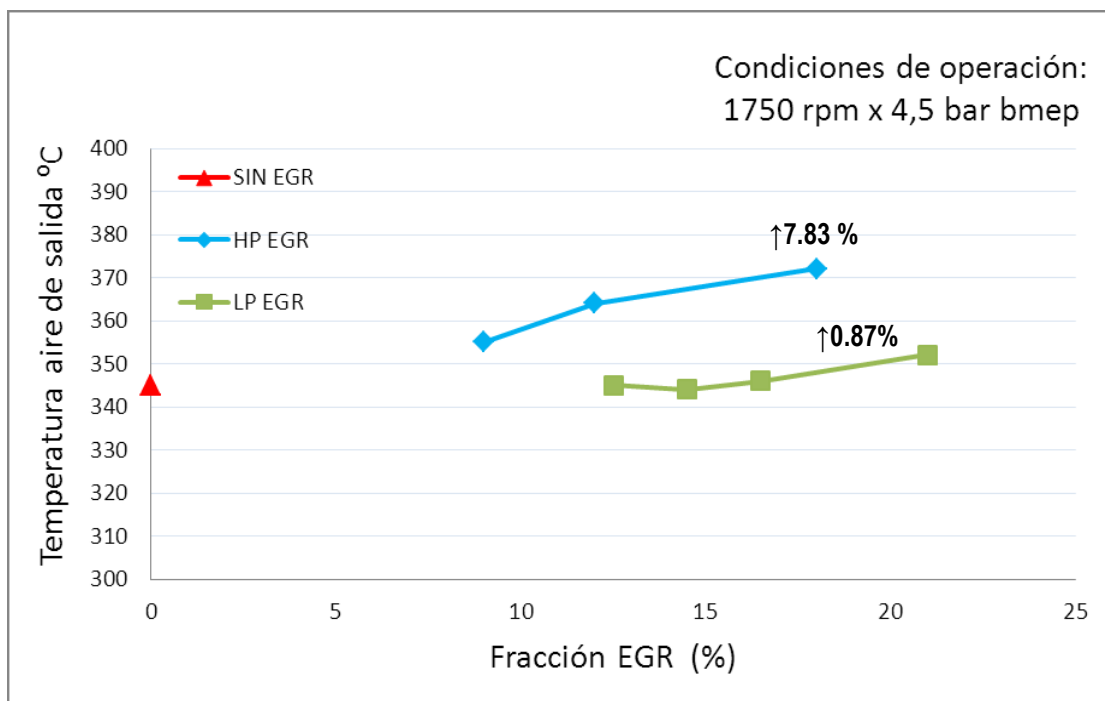
- Reducción de la masa admitida y una disminución de la capacidad volumétrica.

Corresponde a un aumento en emisiones de NOx debido a la disminución del rendimiento volumétrico y a la reducción de la mezcla.

Con el uso de LP EGR los parámetros anteriormente descritos sufren una variación insignificante con respecto a la EGR HP. Por lo tanto, el sistema de baja presión tiene un mejor comportamiento teniendo en cuenta la temperatura del aire de entrada y sobre todo una mayor disminución de NOx.

### 4.3 Temperatura del aire de entrada a turbina

La temperatura del aire de salida del motor (entrada en turbina) es superior con el uso de EGR. Esto se produce porque la sustitución de masa fresca por gases inertes ocasiona un retraso de la ignición, una velocidad de combustión inferior y por lo tanto una temperatura de salida superior.



**Figura 4.5:** Temperatura del aire de salida según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni [Ref. 1]

En la figura 4.5 se observa como la temperatura de salida es mayor para la EGR HP. Esto se produce principalmente porque con la EGR LP la temperatura de entrada es inferior, porque la presión de entrada en cilindro es mayor y la cantidad de aire recirculado es mayor. También puede preverse que el aumento de esa temperatura se debe a un retraso de la ignición y una disminución de la velocidad de combustión beneficiando en este caso a la EGR HP. Basándose en la teoría de formación de NO<sub>x</sub> mas determinante, NO<sub>TÉRMICO</sub>, teniendo en cuenta la temperatura de salida del motor la EGR de baja presión tiene un mejor comportamiento. Aunque también se puede preverse como un retraso de la temperatura de congelacion de la reacción.

#### 4.4 Temperatura aguas abajo del compresor

La temperatura aguas abajo del compresor no se ve afectada con el uso de EGR de alta presión, sin embargo con la EGR de baja presión, dicha temperatura se ve aumentada debido a la configuración de dicho dispositivo. Los gases recirculados son introducidos antes del compresor.

Un aumento de la temperatura aguas abajo del compresor no tiene ninguna consecuencia con respecto a la formación de NO<sub>x</sub>. Debido a que la mezcla debe pasar por un intercambiador. La ventaja mayor de la EGR LP con respecto a la HP.

En la figura 4.6 se observa el aumento de la temperatura comentado sin repercusión en la formación de NO<sub>x</sub>.

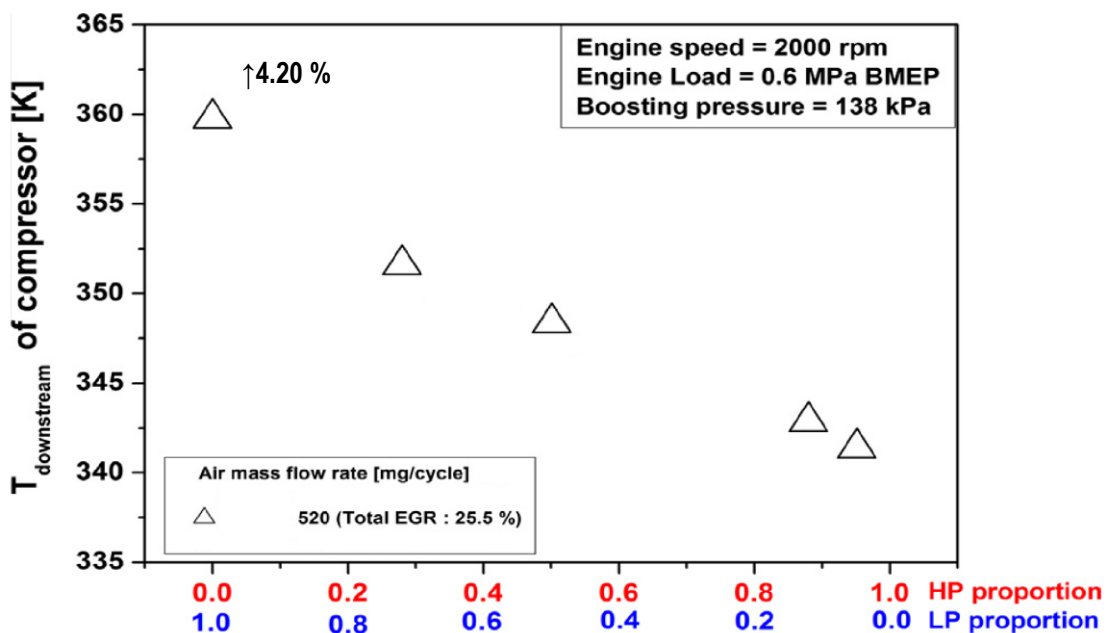
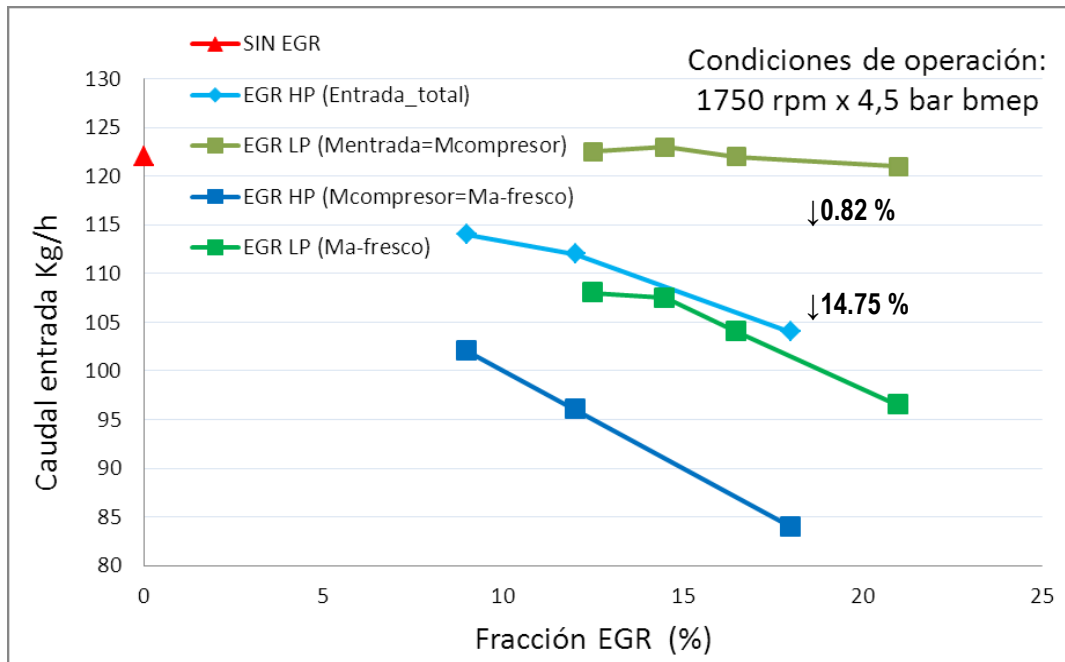


Figura 4.6: Temperatura aguas abajo del compresor según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

#### 4.5 Caudal de entrada al motor

El caudal de aire de entrada al motor es otro parámetro que sufre una variación con la incorporación del sistema de recirculación de gases de escape. A igual sección el caudal es dependiente de la presión y de la temperatura. En la figura 4.7 se observa como el caudal de entrada al motor es mucho mayor con la EGR de baja presión. Esto sucede debido a la configuración diferente que presenta cada dispositivo. Como se puede observar en la figura 4.7 la masa de entrada con la LP es la masa que pasa por el compresor, mientras que con la HP solo pasa la masa fresca.



**Figura 4.7:** Caudal del aire de entrada según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Giorgio Zamboni [Ref. 1]

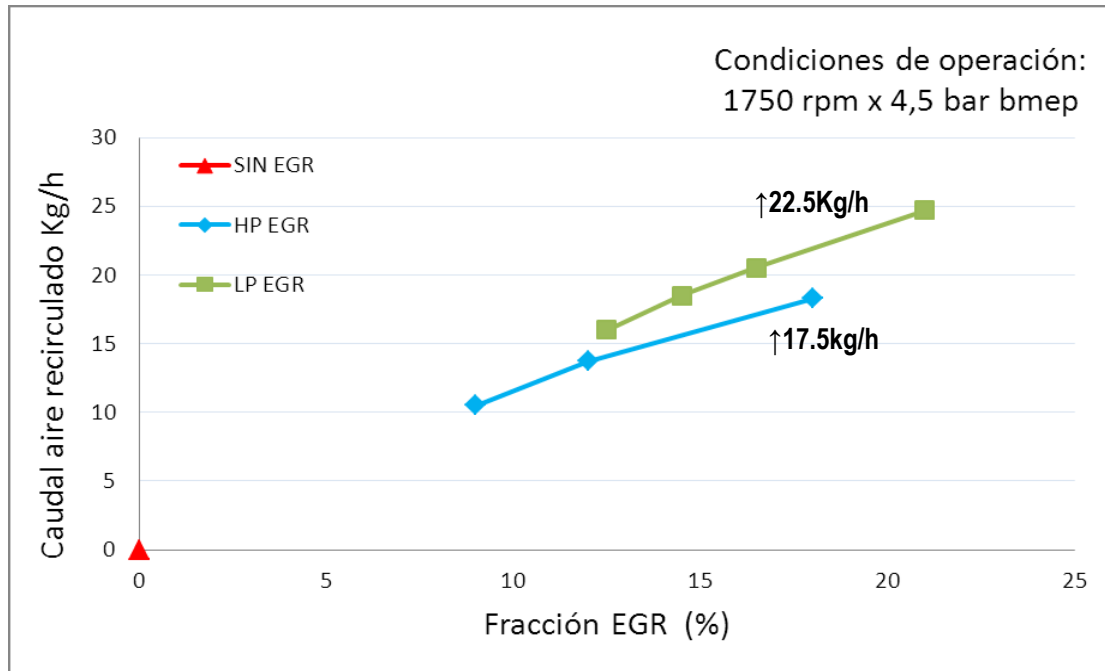
Debido a la configuración de la EGR LP, la mezcla de entrada es más homogénea y la densidad de la misma es mayor. Con respecto a la influencia de este parámetro en la formación de NOx. En el caso de la EGR de baja presión existe un incremento del caudal con respecto a la EGR de alta presión. Esto supone:

- Mayor masa inerte supone un aumento del calor calorífico, esto supone un decremento de la temperatura. Y por lo tanto una disminución de NOx.
- Mayor masa fresca, supone un aumento de O<sub>2</sub> en el frente de llama, lo que supone una mayor oxidación del N<sub>2</sub>. Sin embargo una mezcla más pobre sin disminuir la masa de gas inerte supone un decremento de la temperatura.

Con una disminución de caudal, los NOx se ven reducidos, por lo tanto las emisiones se ven reducidas con el dispositivo de alta presión porque tal y como se muestra en la figura 4.7 la cantidad de aire fresco es mayor con la EGR LP y por lo tanto la existencia de oxígeno y nitrógeno es mayor para formar óxidos de nitrógeno.

#### 4.6 Caudal de aire recirculado

El caudal de gas inerte que se introduce en el motor es mayor con la válvula de recirculación de gases de baja presión debido a la configuración de la misma. En la cual se coloca una válvula que cierra el circuito de escape del motor para crear una contrapresión para introducir el gas inerte aguas arriba del compresor. En cambio la configuración de la EGR HP, en la cual el gas inerte se introduce desde el colector de escape al de admisión por diferencia de presión, permite un menor caudal de gas recirculado.

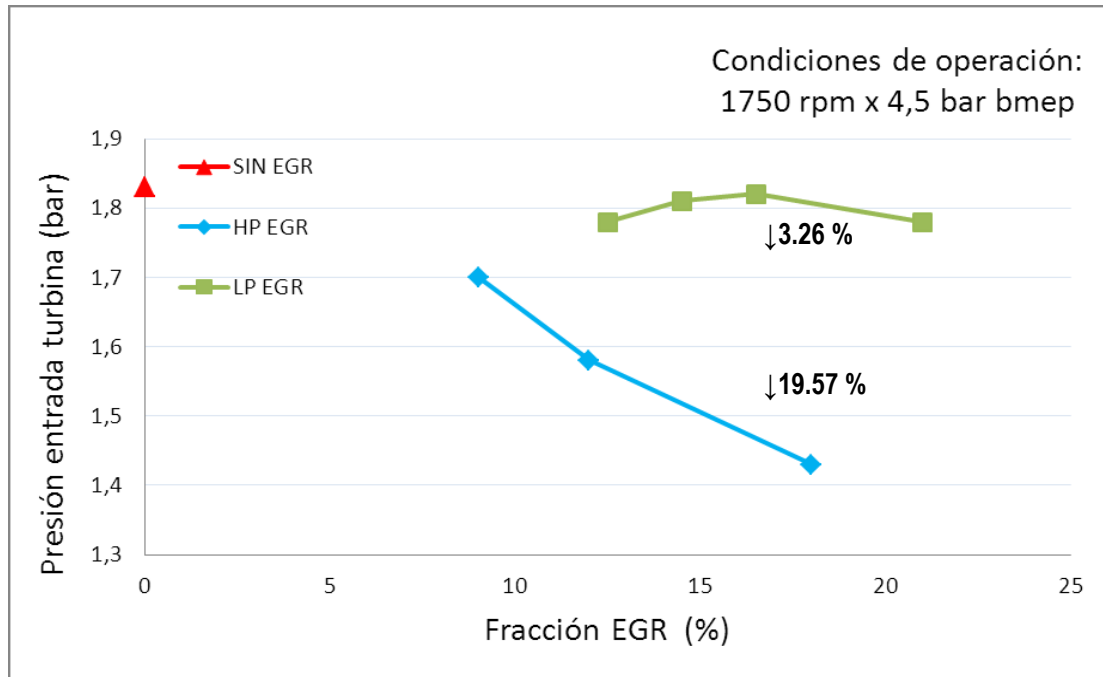


**Figura 4.8:** Caudal del aire recirculado según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine*. Giorgio Zamboni [Ref. 1]

En la figura 4.8 se verifica como el caudal de aire recirculado es mayor con la EGR LP. Según la teoría de reducción de NOx, con la EGR de baja presión se consigue una reducción de formación de NOx. Esto es debido al aumento del calor calorífico de la mezcla con la sustitución de aire fresco por gas inerte.

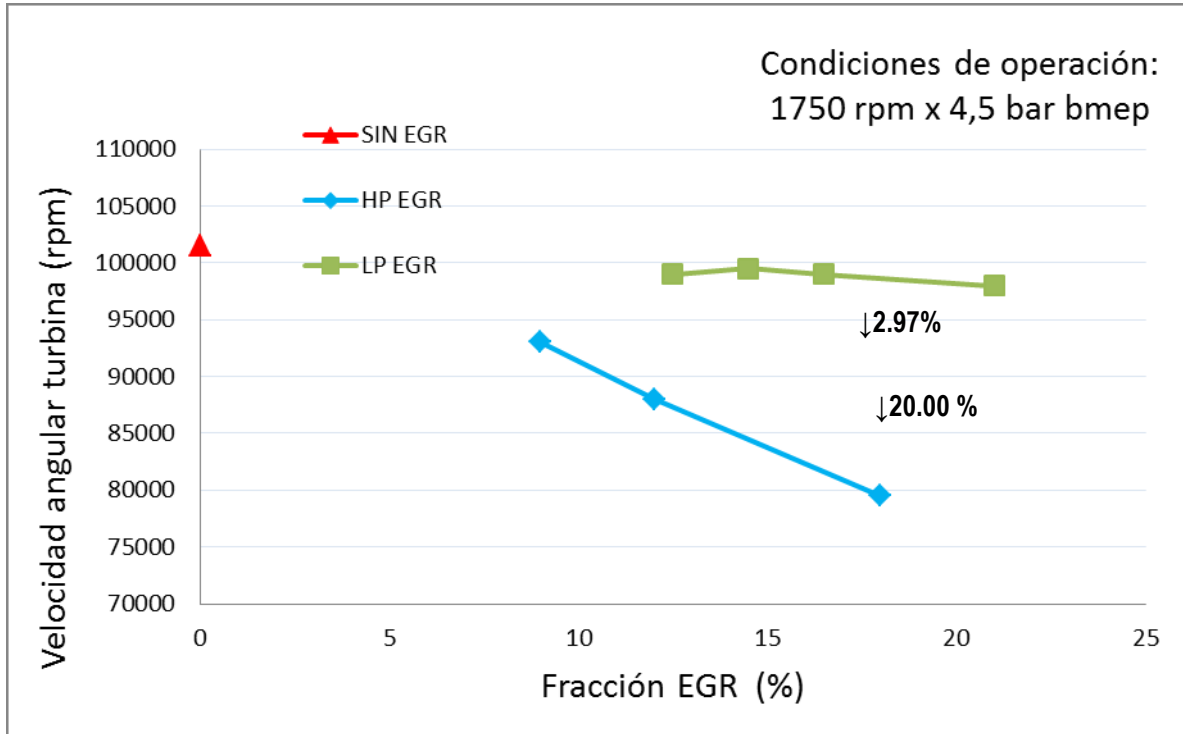
#### 4.7 Presión y velocidad angular de turbina

Con la inclusión de la EGR de baja presión se consigue una aproximación al funcionamiento del motor sin EGR. La presión de entrada en turbina (salida del motor) con EGR LP es similar a sin EGR y muy superior a la EGR HP tal y como se observa en la figura 4.8. La presión en turbina es diferente debido a la configuración de cada sistema de recirculación. Con el dispositivo de alta presión, parte del caudal es recirculado al interior del cilindro antes de turbina. Mientras que con la EGR de baja presión la configuración es igual que sin EGR (todo el aire circula por turbina) porque la recirculación se realiza aguas abajo de la turbina.



**Figura 4.9:** Presión salida del motor (entrada en turbina) según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine*. Giorgio Zamboni [Ref. 1]

Debido a la diferencia de presión comentada, la velocidad angular de la turbina se ve influenciada. Igual que el caso anterior, con la EGR LP la velocidad de la turbina se aproxima a la velocidad sin EGR. Sin embargo, con EGR HP la velocidad es inferior debido a la configuración de dicho sistema. Este hecho se corrobora en la figura 4.9.



**Figura 4.9:** Velocidad rotacional de turbina según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine*. Giorgio Zamboni [Ref. 1]

En la tabla 4.1 y 4.2 se pueden ver como la eficiencia y la potencia se mantiene estable con la EGR de baja presión, mientras que sufre un decremento con la configuración de alta presión.

**Tabla 4.1:** Variación parámetros turbocompresor a 2bar y 1500rpm alta presión Fuente: Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto, Marco Gianoglio Bernardi [Ref. 29]

		EGR rate (%)					
		0	10	20	30	40	50
Turbine	Efficiency (%)	62.8	61.0	57.2	53.6	50.8	45.0
	Power (kW)	0.685	0.617	0.54	0.464	0.389	0.323
	Mass flow rate (kg/s)	0.03	0.027	0.023	0.020	0.017	0.014
	Back press./boost press. ratio (-)	1.16	1.16	1.17	1.19	1.19	1.23
	Rack position (%)	22.2	18.9	16	13.4	11	3.5
Compressor	Efficiency (%)	52.0	51.3	50.5	49.8	49.2	48.9
	Specific work (kJ/kg)	23.25	23.54	23.5	23.46	23.4	23.94
	Mass flow rate (kg/s)	0.029	0.026	0.023	0.020	0.017	0.014

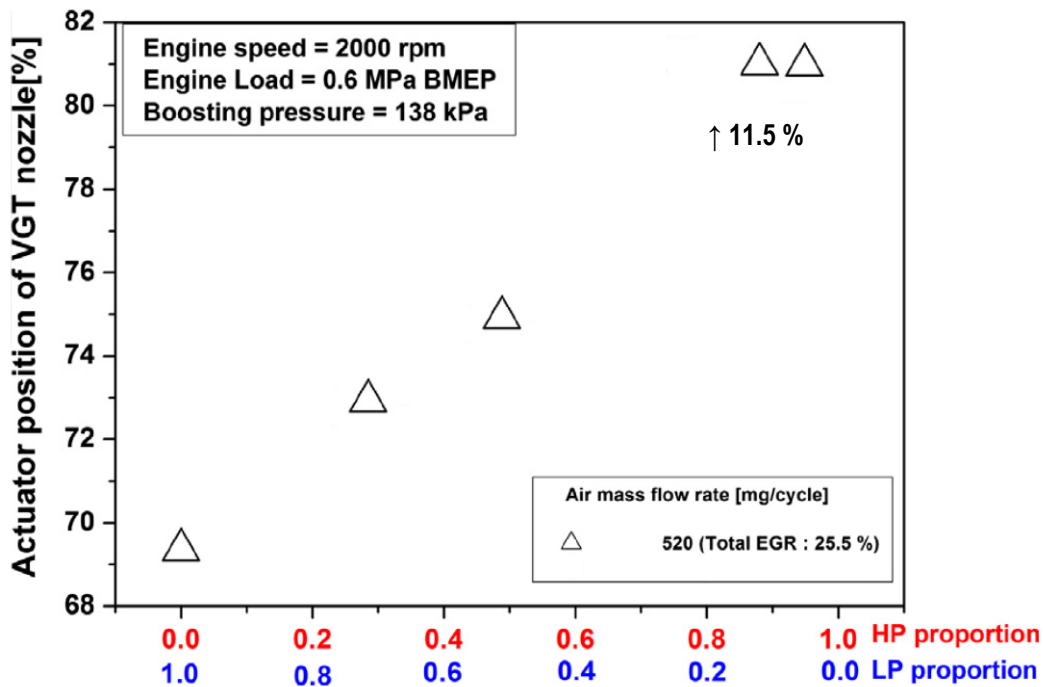
**Tabla 4.2:** Variación parámetros turbocompresor a 2bar y 1500rpm baja presión Fuente: Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto, Marco Gianoglio Bernardi [Ref. 29]

		EGR rate (%)					
		0	10	20	30	40	50
Turbine	Efficiency (%)	62.8	62.6	62.3	62.0	60.2	58.2
	Power (kW)	0.685	0.698	0.713	0.73	0.771	0.817
	Mass flow rate (kg/s)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.029
	Back press./boost press. ratio (-)	1.16	1.16	1.17	1.18	1.21	1.24
	Rack position (%)	22.2	21.8	21.2	20.4	18.9	17.6
Compressor	Efficiency (%)	52.0	52.1	52.2	52.5	53.4	54.5
	Specific work (kJ/kg)	23.25	23.74	24.31	24.93	26.45	28.1
	Mass flow rate (kg/s)	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029

La comparación de las emisiones de NOx con los dos sistemas de recirculación de gases es compleja. Porque se produce una disminución directa de las emisiones de NOx debido al decremento de la presión en cilindro y por lo consecuente la temperatura con la EGR de alta presión. Sin embargo, la disminución en la velocidad de la turbina y de la presión de salida afecta de manera indirecta a la formación de NOx. La eficiencia y la potencia de la turbina se ven reducidas con el crecimiento de la tasa de EGR HP. Esto implica un aumento de los NOx debido al aumento de consumo para subsanar ese decremento de la eficiencia. Aunque teniendo en cuenta la disminución de la presión y temperatura, los óxidos de nitrógeno se ven disminuidos con la EGR HP debido a la gran repercusión del mecanismo de formación NO<sub>TÉRMICO</sub>.

#### 4.8 Variación sobre la turbina regulable

Debido a la modificación de la velocidad de la turbina, los alabes de las misma tienen un comportamiento diferente. En el caso de la EGR de baja presión, los alabes no sufren apenas variación debido a la configuración de la misma. Sin embargo con la EGR HP, los alabes sufren una variación que suponen la saturación temprana del turbo. Por este motivo el campo motor cubiertos por el turbocompresor son menores.



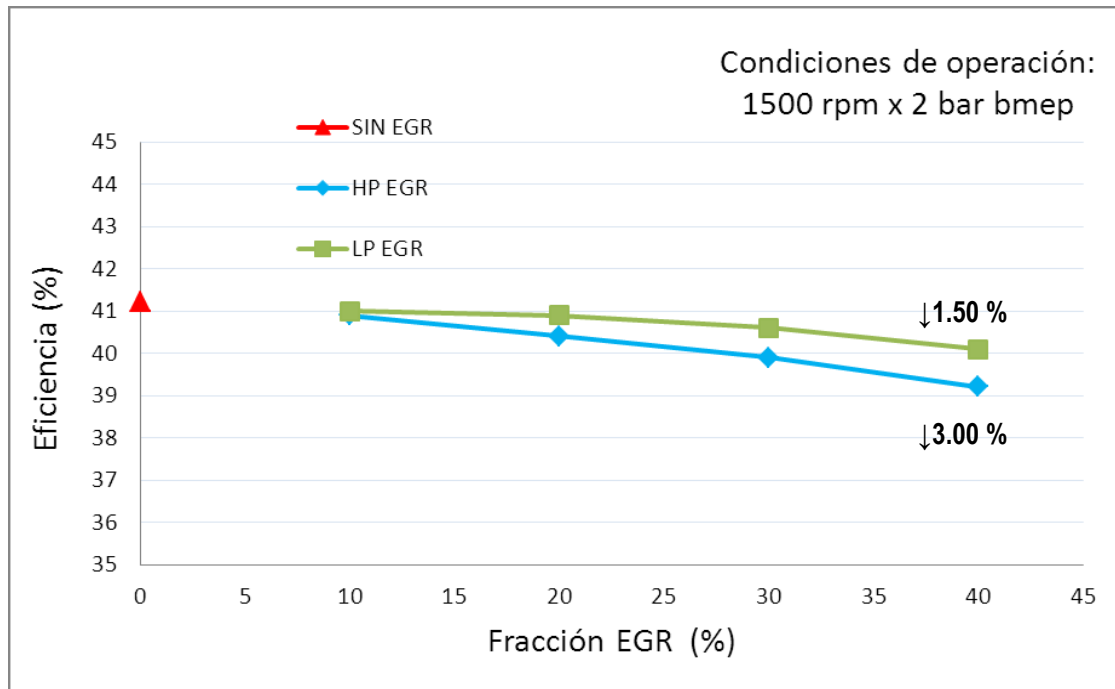
**Figura 4.10:** Variación de los álabes de la turbina según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine* Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

En la figura 4.10 se observa como los alabes sufren una variación por encima del 10% con la basculación de EGR LP a HP. Esto se traduce en un comportamiento menos eficiente en el caso de equipar el motor con EGR HP, por lo tanto un mayor consumo y menor rendimiento del motor. Teniendo solo en cuenta la formación de NOx, con el sistema de recirculación de alta presión los óxidos de nitrógeno se ven reducidos debido a que la presión será menor.

#### 4.9 Eficiencia

La eficiencia del motor se ve reducida con la inclusión de gas recirculado en el cilindro. En la figura 4.11 se observa como la eficiencia disminuye a medida que la tasa EGR va aumentando. También se aprecia una clara diferencia entre los dos sistemas estudiados. Donde la eficiencia es menor con el uso de EGR HP. Este decremento de la eficiencia es debido a la reducción de la calidad de la combustión por la inclusión de gases inertes. Por otro lado la eficiencia se ve reducida en el caso del motor equipado con EGR HP por la disminución de presión que sufre la combustión con este tipo de configuración.





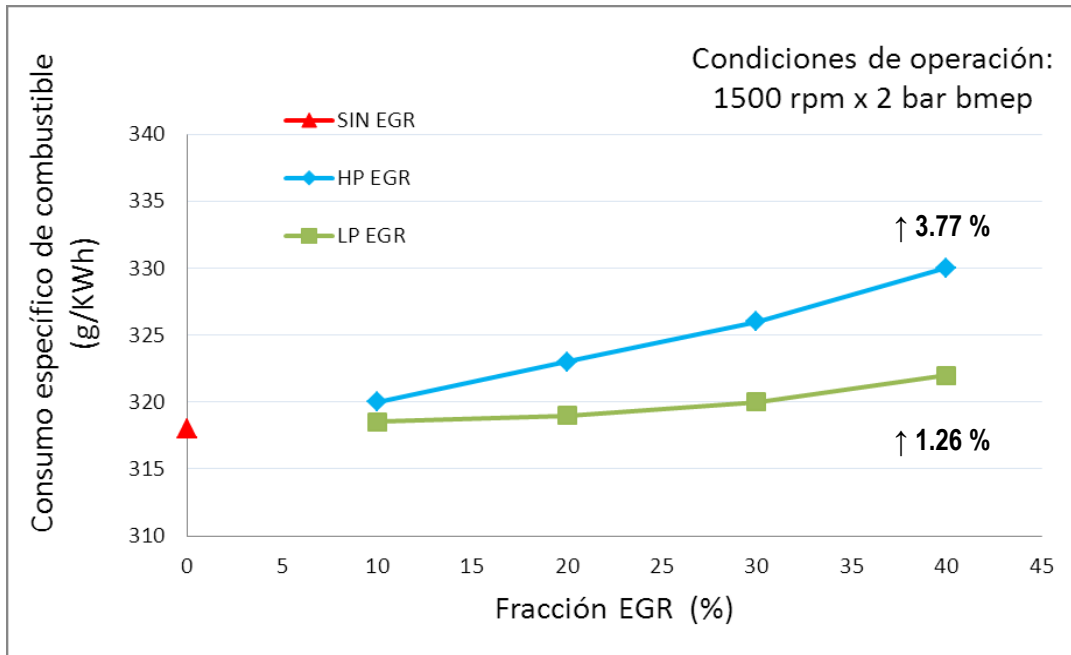
**Figura 4.11:** Eficiencia según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines* Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto, Marco Gianoglio Bernardi [Ref. 29]

Es difícil cuantificar la comparativa de los dos sistemas estudiados según la variación de este parámetro. Por un lado, los NOx se ven reducidos porque tal y como se ha comentado, la calidad de la combustión se ve agravada repercutiendo en una menor temperatura de llama y una menor emisión de NOx. Como punto negativo, la potencia se ve disminuida con el sistema de alta presión. Para alcanzar la misma potencia que con EGR LP se necesita aumentar la inyección de combustible, aunque esto no es muy influyente en la formación del contaminante. Debido a que la formación de NOx a partir del combustible es mucho menor que a partir del NOx térmico. Por lo tanto la formación de NOx teniendo en cuenta la eficiencia es menor para el dispositivo de alta presión.

#### 4.10 Consumo específico de combustible

Como se comentó en el apartado 3, el consumo de combustible se ve aumentado con la recirculación de gases. Esto es debido al deterioro de la calidad de la combustión. En este caso el consumo de combustible es mayor para el caso de equipar el motor con la EGR HP. Esto ocurre porque la presión alcanzada y la eficiencia es menor debido a la configuración de este sistema.

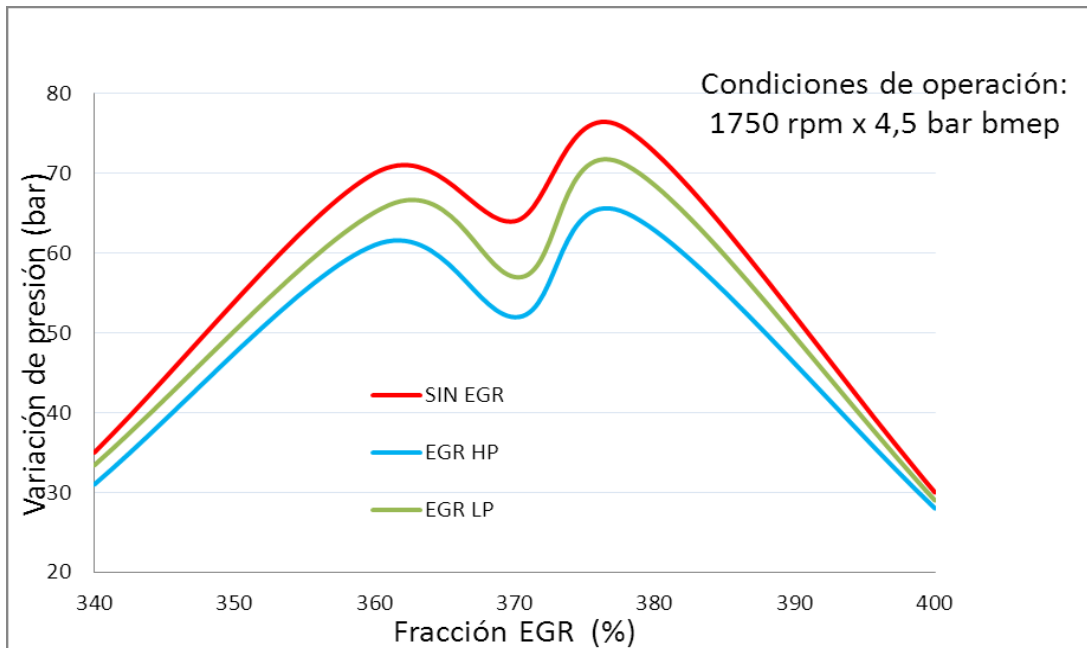
Con un aumento del consumo de combustible, incrementa la emisión de NOx. En la figura 4.12 se aprecia como el consumo de combustible es mayor para la EGR HP. Por lo tanto las emisiones de NOx aumentan con esta configuración.



**Figura 4.12:** Consumo específico de combustible según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines Federico Millo, Paolo Ferrero Giacominetto, Marco Gianoglio Bernardi [Ref. 29]

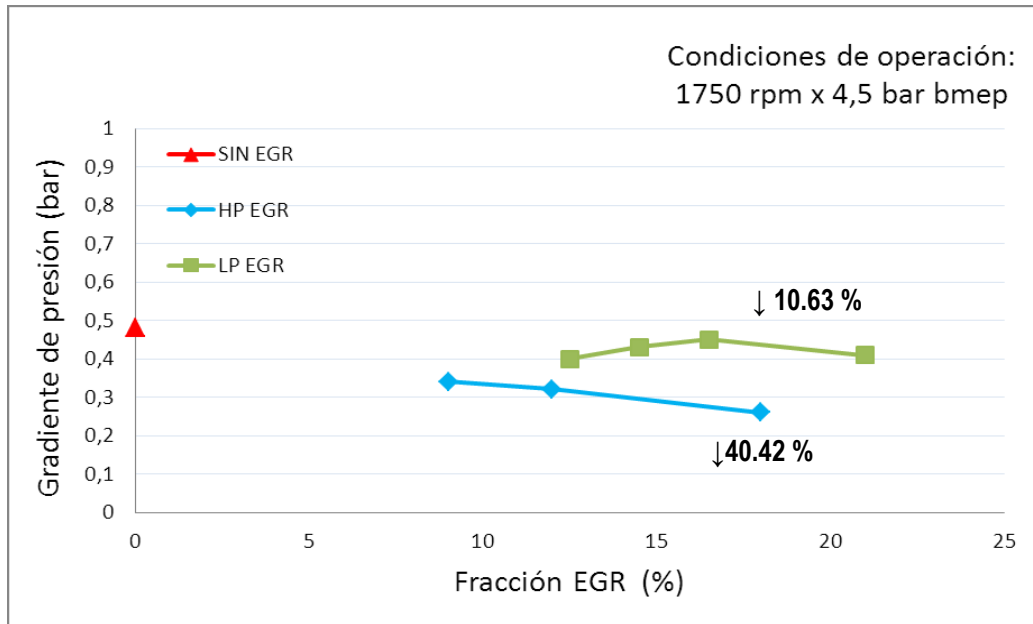
#### 4.11 Variación de la presión en cilindro

La presión en cilindro está influenciada con el uso de EGR. En la figura 4.13 se puede ver una comparativa de la presión en cilindro con el uso de EGR HP y LP y sin EGR. Sin uso de EGR la presión que se alcanza con la combustión es mayor que con el uso de EGR. Con el uso de recirculación de gases se produce un decremento de la presión al final de la carrera de compresión y por lo consiguiente en la combustión.



**Figura 4.13:** Variación de la presión según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Giorgio Zamboni [Ref. 1]

En la figura 4.14 se corrobora como la presión es menor con el sistema EGR HP. También se observa como la presión disminuye con el aumento de tasa EGR.

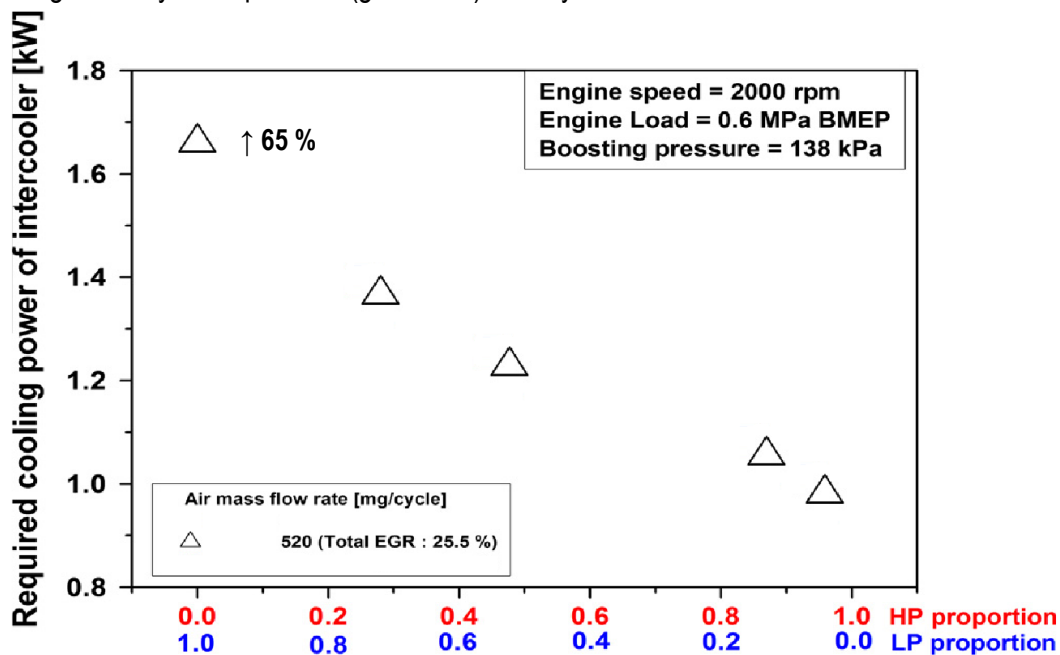


**Figura 4.14:** Gradiente de presión según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni [Ref. 1]

Con respecto a la emisión de NOx, con el uso de EGR HP se consigue una presión menor y por lo tanto una menor temperatura y menores emisiones de NOx. Aunque con el uso de EGR LP se consigue un retraso de la combustión debido a que la temperatura de la mezcla es menor. Teniendo solo en cuenta la presión, la formación de óxidos de nitrógeno se ve beneficiada con la EGR HP.

#### 4.12 Requerimientos de la potencia del intercooler

La potencia del intercambiador de calor es diferente con el uso de los diferentes tipos de sistemas estudiados, esto es debido a la configuración de cada EGR. Para la EGR HP, todo el caudal que pasa por el intercambiador es aire fresco. Sin embargo con el uso de la EGR de baja presión parte del caudal que pasa por el intercambiador es gas recirculado. Por lo tanto la potencia necesaria para enfriar un gas a mayor temperatura (gas inerte) es mayor.



**Figura 4.15:** Potencia requerida por el intercooler según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine* Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

De la misma manera ocurre con la caída de presión del intercambiador.

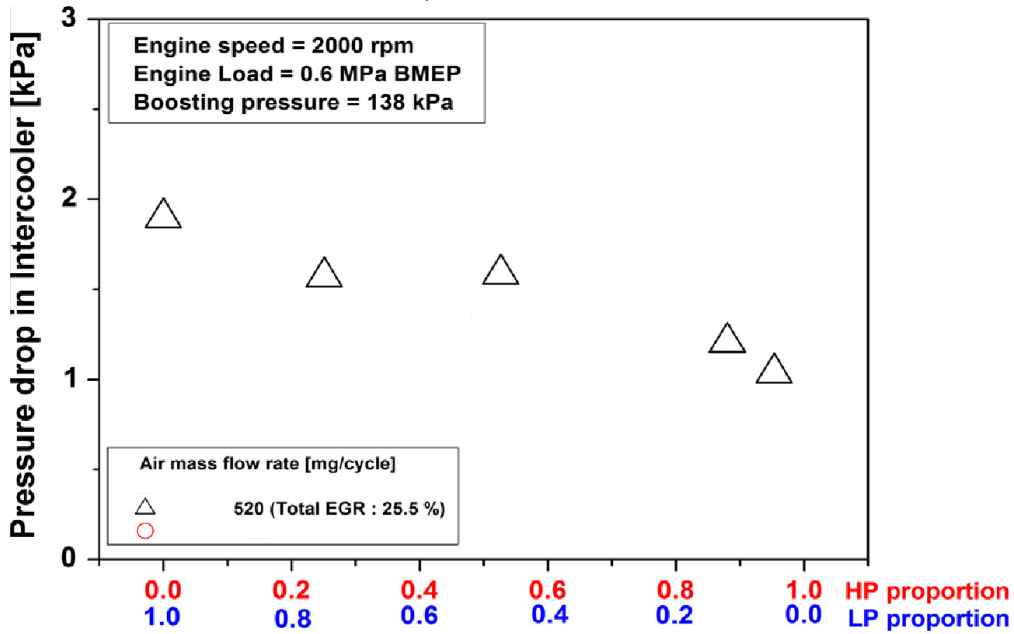


Figura 4.16: Caída de presión en intercambiador según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

La variación de este parámetro no tiene ninguna repercusión sobre la formación de NOx.

#### 4.13 Velocidad del calor liberado

En la figura 4.17 se observa como una pequeña diferencia en la velocidad del calor liberado. En primer lugar se muestra como la combustión de la pre-inyección se inicia antes debido al aumento de temperatura que sufre la mezcla con el sistema de recirculación de aire de alta presión. También se observa una ligera variación en la combustión principal, y como el pico de calor es menor para la EGR de alta presión.

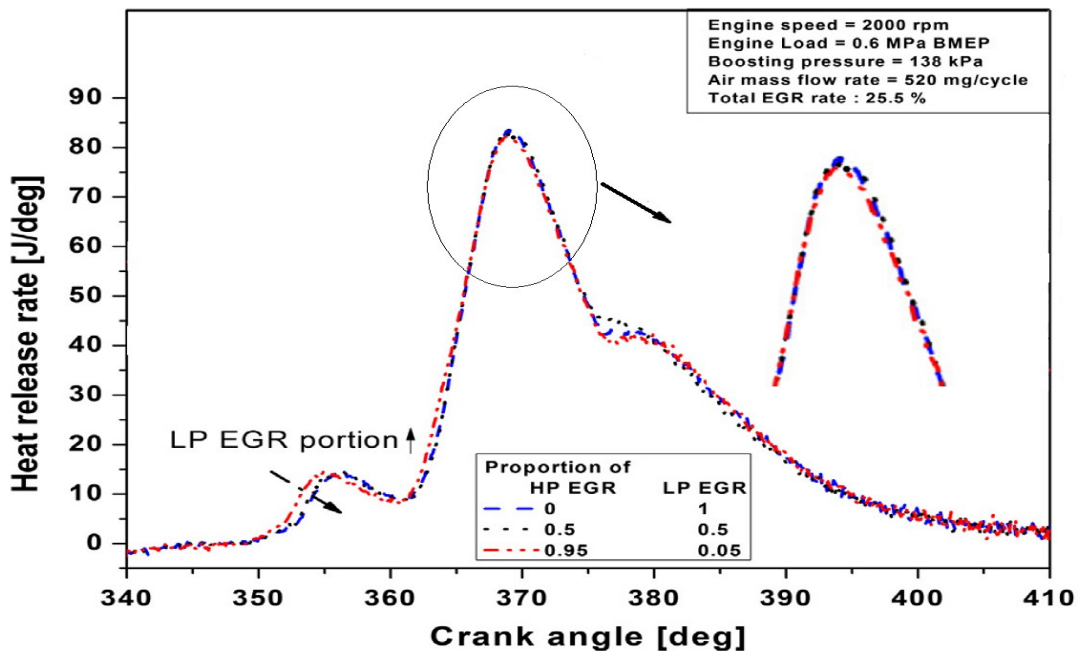


Figura 4.17: Velocidad calor liberado según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

Esta diferencia mostrada en la figura 4.17 se concluye como una ligera disminución en la emisión de NOx con el sistema de alta presión según el mecanismo de formación térmico.

#### 4.14 Fracción de masa quemada

En el Zoom de la figura 4.18 se muestra como la combustión se inicia antes con la configuración de alta presión. Esto sucede principalmente debido a una mayor temperatura de la mezcla. Este hecho es debido al adelanto de la ignición que se observó en la figura 4.17.

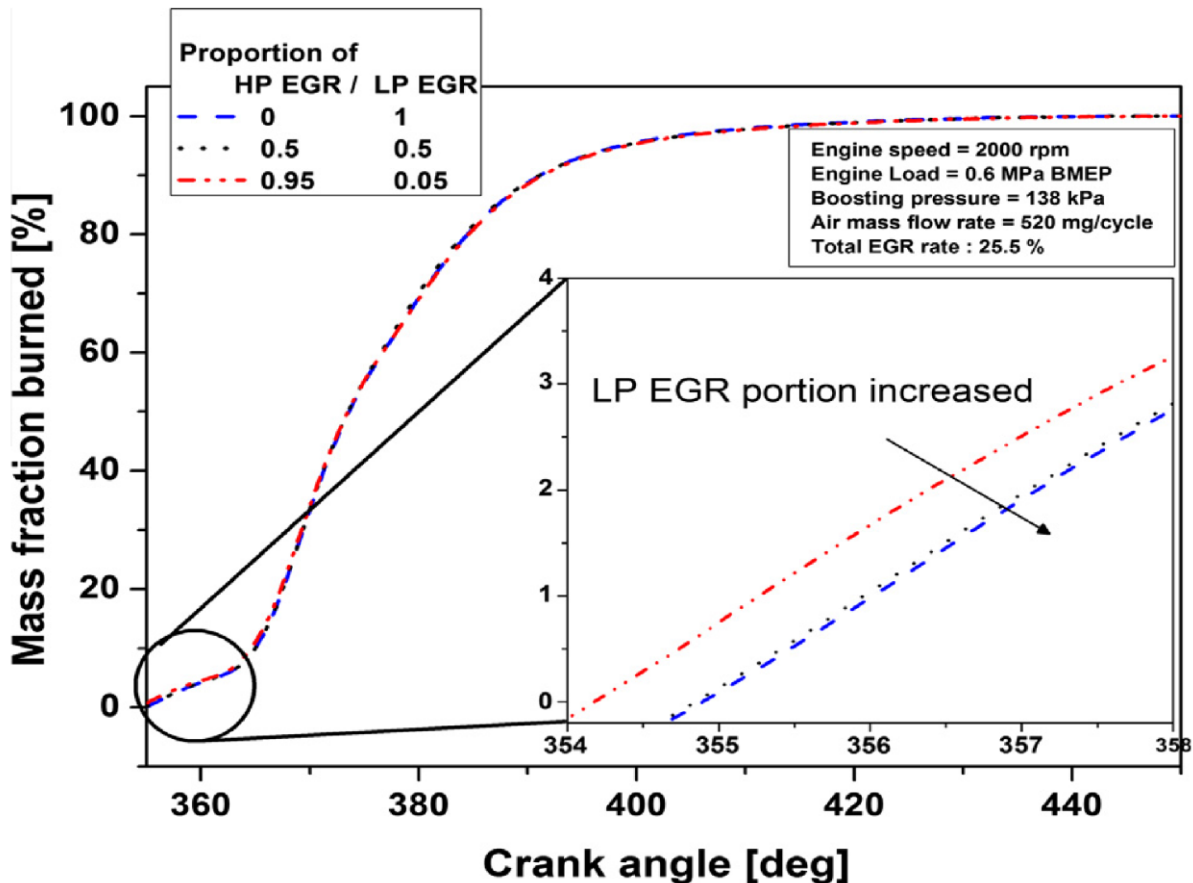


Figura 4.18: Fracción de masa quemada según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

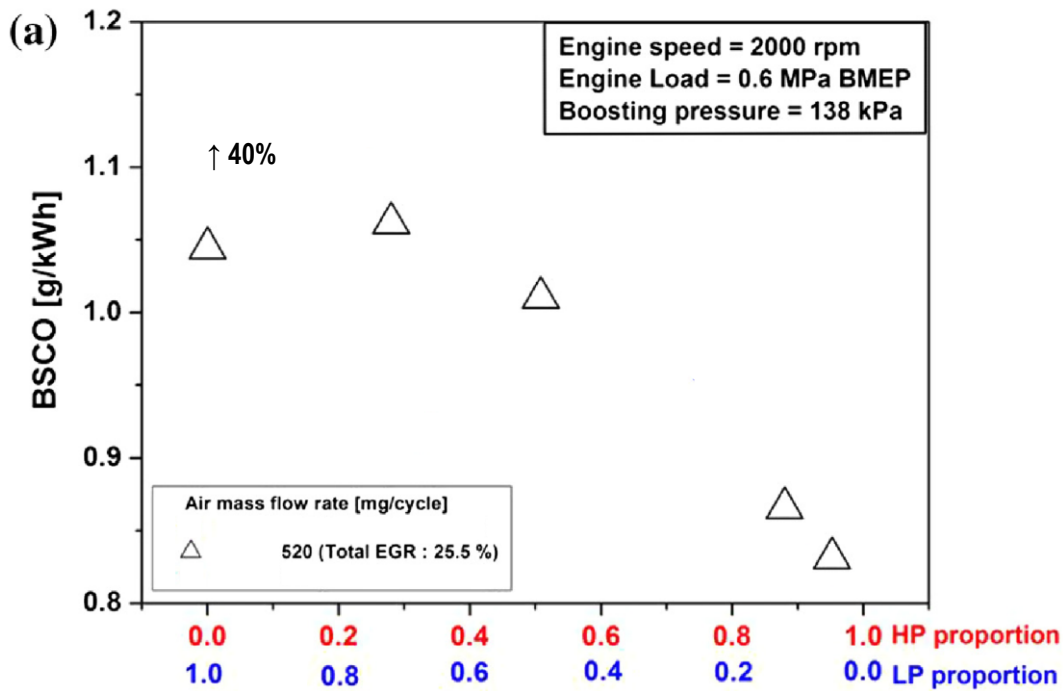
Con respecto a la emisión de NO<sub>x</sub>, un adelanto en la masa quemada se traduce como un aumento de la temperatura debido al adelanto de la ignición. También supone una menor proporción de inquemados y de partículas. Por lo tanto el sistema de recirculación de baja presión se ve beneficiado en la disminución de NO<sub>x</sub>.

#### 4.15 Emisión de CO

La emisión de CO se ve influenciada con la presencia de gas inerte en la mezcla. La formación de CO depende de la calidad de la mezcla, la temperatura y de la presión. Como se ha comentado la calidad de la combustión disminuye con la inclusión de gas recirculado. Se consigue una menor temperatura y presión que provoca un aumento de la formación de CO.

En la figura 4.19 se observa como la formación de CO aumenta con el uso de la EGR LP. Esto ocurre porque a diferencia de la EGR HP al sustituir el gas inerte por aire fresco, la temperatura se muestra invariable.

La formación de CO no afecta a las emisiones de NO<sub>x</sub>.



**Figura 4.19:** Emisión de CO según tasa de EGR y tipo de EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine* Youngsoo Park, Choongsik Bae [Ref. 31]

#### 4.16 Emisión de partículas

La formación de partículas es el principal problema ocasionado con la introducción de gas inerte en la mezcla. La emisión de partículas se ve afectada con la variación de los siguientes parámetros:

- Proporción de aire/combustible.

Una disminución de la proporción aire/combustible provoca un aumento en la formación de partículas debido a una menor concentración de  $O_2$ . En este caso la relación aire/combustible es mayor para la EGR LP, por lo tanto disminuyen las partículas con esta configuración.

- Temperatura

La emisión de partículas aumenta con una disminución de la temperatura. En este caso la temperatura aumenta con el uso del sistema de alta presión. Por lo tanto, la emisión de partículas es mayor para la EGR LP.

- Presión

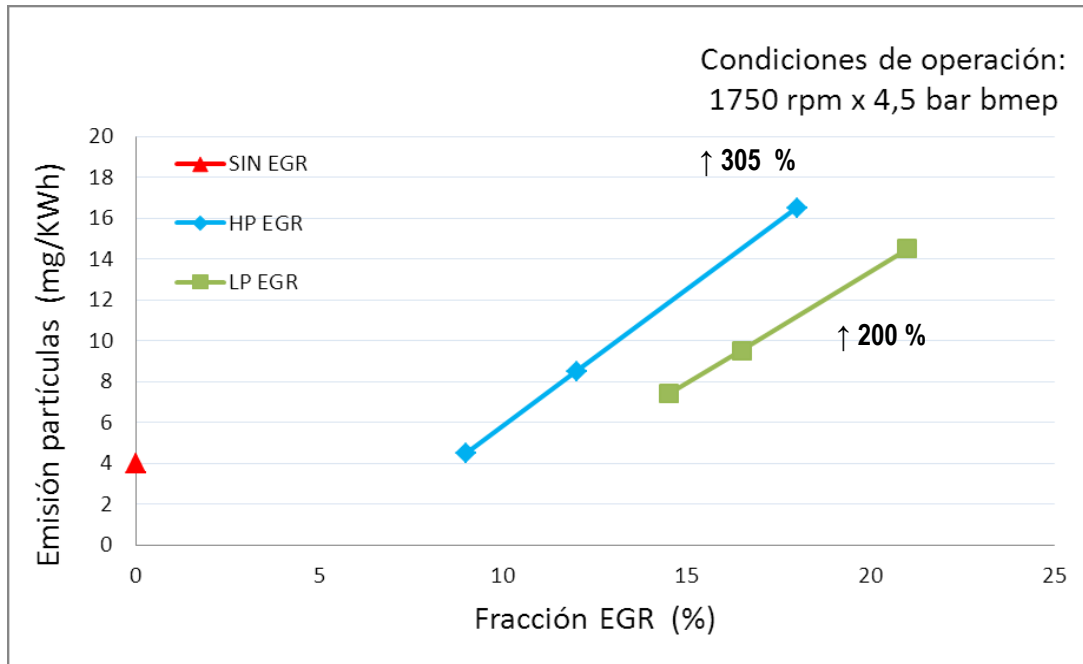
Un aumento en la presión causa una disminución en la formación de partículas. En este caso la presión aumenta con el uso de la EGR de baja presión. Por lo tanto la emisión de partículas disminuye con esta configuración.

- Homogeneidad de la mezcla

Las partículas aumentan con una menor homogeneidad de la mezcla. En este caso la mezcla es más homogénea con el uso de la EGR LP y por lo tanto una disminución de las partículas.

- Consumo y eficiencia

Un consumo mayor y una eficiencia menor provocan un aumento de partículas. En este caso, el sistema de recirculación de gases de baja presión se ve beneficiado.



**Figura 4.20:** Emisión de partículas según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni [Ref. 1]

Los dos parámetros más influyentes en la cantidad de partículas son la temperatura y la presión. Con la EGR HP la temperatura es más alta, mientras que con la EGR LP la presión es más alta que con la HP. En este caso un aumento de presión posee más influencia que la temperatura y por este motivo en la figura 3.20 se aprecia cómo la EGR LP tiene una menor emisión de partículas.

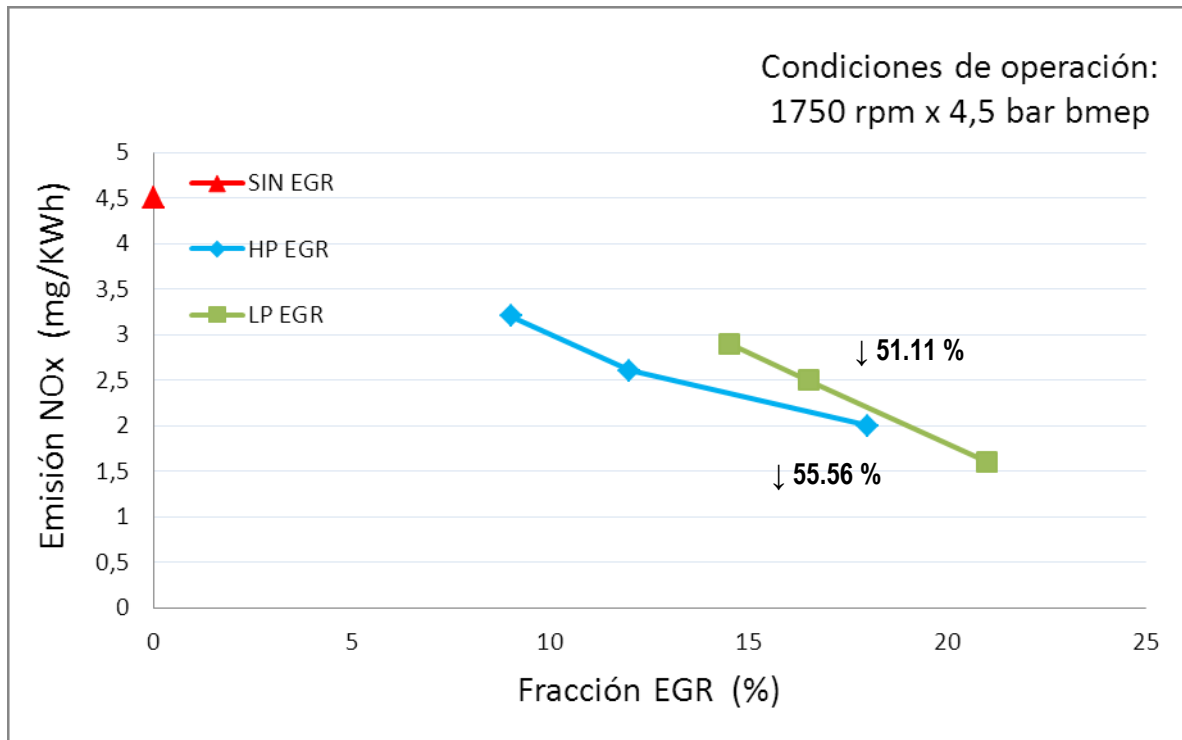
En la práctica, para tasas de EGR mayores, se produce un aumento de la temperatura de la mezcla y las emisiones de partículas se ven reducidas con el sistema de alta presión. También tiene una gran influencia con la temperatura ambiente, disparándose la emisión con la EGR LP en ambientes muy fríos.

La emisión de partículas no afecta a la formación de NOx.

#### 4.17 Síntesis de la formación de NOx

Es difícil cuantificar una comparativa de la repercusión de los dos sistemas estudiados sobre la formación de NOx.

En la figura 4.21 se observa como la formación de NOx disminuye con el aumento de tasa de recirculación de gases de escape. Se observa como para tasas de EGR bajas, las emisiones de NOx son menores para el dispositivo de alta presión. Esto es debido a que la presión es menor en el caso de la EGR HP. Sin embargo, para tasas de EGR altas, la efectividad de la EGR de alta presión disminuye debido al aumento de temperatura inicial con respecto a la EGR de baja presión.



**Figura 4.21:** Emisión de NOx según tasa de EGR, tipo de EGR y sin EGR. Fuente: *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine.* Giorgio Zamboni [Ref. 1]

La tendencia que toma en la figura 4.21 coincide con el comportamiento que sufre en condiciones de funcionamiento habituales. Debido que para grandes tasas de EGR el comportamiento del motor con la configuración de baja presión mejora las emisiones de NOx. Consecuente principalmente a la justificación en la variación de los parámetros estudiados mostrados en la tabla 4.3.

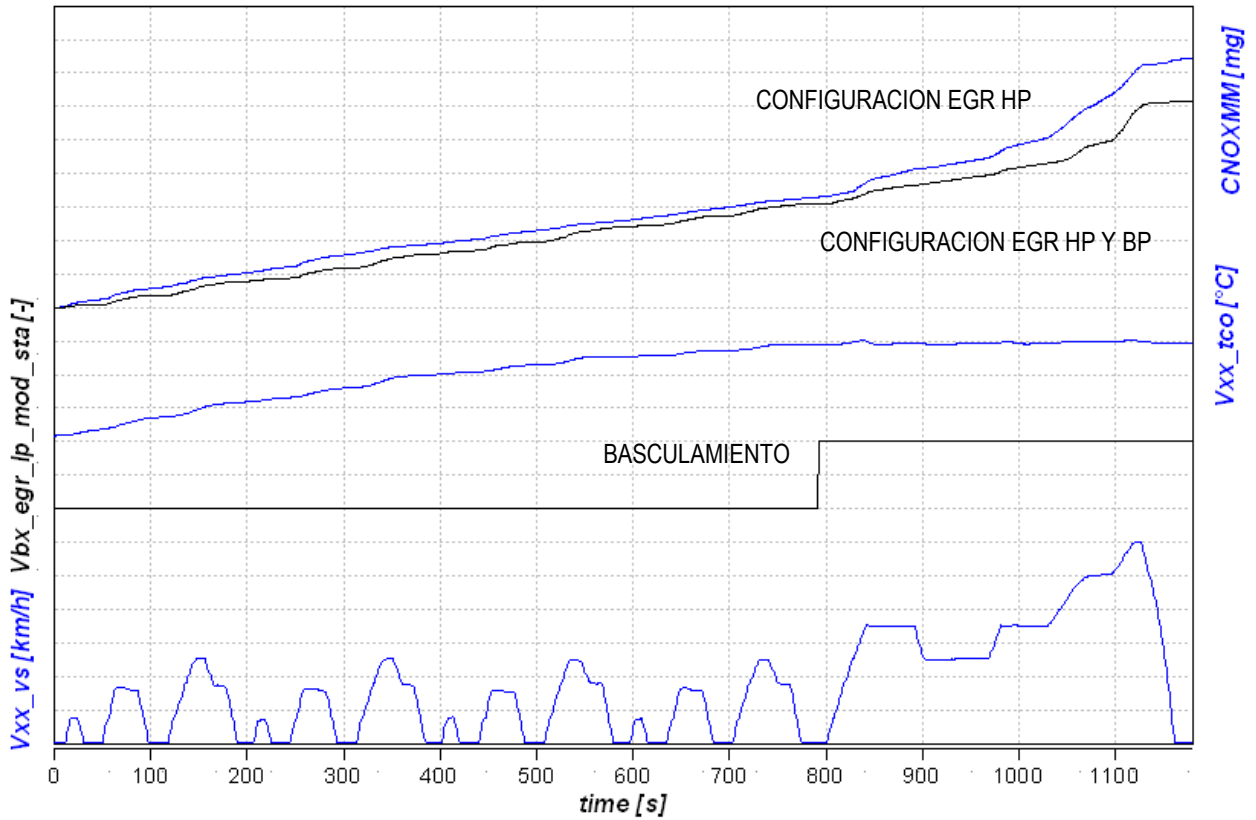


**Tabla 4.3:** Tabla resumen comparativa de EGR sobre los parámetros de combustión y efectos sobre la emisión de NOx.

Parámetro	EGR HP	EGR LP	Comparativa EGR en formación de NOx
Proporción aire fresco/combustible	↓ ↓28.57 %	↓ ↓17.14 %	Mejor HP
Temperatura entrada al motor	↑ ↑60.61 %	↑ ↑7.58 %	Mejor LP
Temperatura salida del motor Antes de turbina	↑ ↑7.83 %	↑ ↑0.87 %	Mejor LP
Temperatura aguas abajo del compresor	↑ ↑4.20 %	—	—
Caudal de entrada al motor	↓ ↓14.75 %	↓ ↓0.82 %	Mejor HP
Caudal de aire recirculado	↑ ↑17.5kg/h	↑ ↑22.5kg/h	Mejor LP
Presión y velocidad angular de turbina	↓ ↓19.57 % y 20 %	↓ ↓3.26% y 2.97%	Mejor HP
Variación sobre la turbina regulable	↑ ↑ 11.5 %	↑ Mínimo	Mejor HP
Eficiencia	↓ ↓ 2.00 %	↓ ↓ 1.20 %	Mejor HP
Consumo específico de combustible	↑ ↑ 3.77 %	↑ ↑ 1.26 %	Mejor LP
Presión en cilindro	↓ ↓ 40.42 %	↓ ↓ 10.63 %	Mejor HP
Potencia del intercambiador	↓ Mínimo	↑ ↑ 65 %	—
Calor liberado	↓ Insignificante	↓ Insignificante	Mejor HP (insignificante)
Fracción de masa quemada	↑ Insignificante	↑ Insignificante	Mejor LP
Emisión de CO	↑	↑ ↑ 40% con respecto a EGR HP	—
Emisión de partículas	↑ ↑ 305 %	↑ ↑ 200 %	—
Emisión de NOx	↓ ↓ 55.56 %	↓ ↓ 51.11 %	Mejor HP*

Se determina que la eficiencia es menor para la EGR LP debido a que en la figura 4.21 se observa como para una tasa de EGR del 18%, la reducción de NOx con la EGR HP se ve reducida en un 55.56%, mientras que con la EGR LP la reducción es del 51.11%. Aunque la reducción sea más eficaz para la EGR HP para una tasa del 18%, en la figura se ve la tendencia en emisiones de NOx con cada dispositivo y se concluye que para tasas de EGR más altas el sistema de baja presión tiene un mejor comportamiento y por lo tanto en la práctica es más eficaz, donde las tasas de funcionamiento son mayores.

Para corroborar el mejor comportamiento de la EGR LP se muestra la siguiente figura 4.22 donde se observa un ensayo de un motor con configuración HP y con configuración HP y LP en el ciclo de homologación NEDC. Con configuración HP se muestra como las emisiones de NOx aumentan cuando el motor está caliente debido a que la efectividad del dispositivo se ve reducida. Sin embargo, con el motor equipado con las dos configuraciones se produce un basculamiento a EGR LP cuando se alcanza la consigna de temperatura, de esta manera las emisiones totales de NOx se ven reducidas.



**Figura 4.22:** Emisiones de NOx acumuladas en el ciclo NEDC de un motor K9K con el uso de EGR HP y EGR HP y LP.  
Fuente: Renault España S.A. [Ref 33]

## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Generales

Tras realizar un análisis de las diferentes técnicas que existen en la actualidad sobre la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno se llega a la conclusión que para conseguir reducir las mismas sin sacrificar el comportamiento del motor es necesario una combinación de los distintos sistemas descritos en el presente trabajo.

Como técnica activa más efectiva en la emisión de óxidos de nitrógeno destaca la inyección de agua directamente en el cilindro. Debido a que con este sistema se consigue disminuir la temperatura de la llama en el momento idóneo atacando directamente en la formación de NOx sin afectar de forma considerada el comportamiento del motor, esta técnica carece de viabilidad económica en vehículos de gama media. Caso contrario ocurre con el sistema estudiado profundamente (sistema de recirculación de gases de escape), que destaca por sencillez técnica y reducido coste.

Entre las técnicas pasivas nombradas en el capítulo dos se concluye como más efectivo el sistema de reducción catalítica selectiva debido al agente reductor utilizado para eliminar a posteriori la emisión de óxidos de nitrógeno.

Tal como se ha comentado, para conseguir un compromiso entre los contaminantes emitidos y el comportamiento del motor es necesaria una combinación de ambos sistemas.

### 5.2 Específicas

A lo largo del presente trabajo fin de máster se ha llevado a cabo un análisis del proceso de recirculación de gases de escape y sus efectos sobre el funcionamiento de motores de encendido por compresión, profundizando en las repercusiones de la arquitectura del sistema de EGR empleado sobre distintos parámetros del motor, y así poder analizar la influencia en las emisiones de óxidos de nitrógeno. Para llegar a tal fin, se han estudiado técnicas experimentales recogidas de ensayos de autores especializados recogidos en la bibliografía actual.

A posteriori se ha comparado el comportamiento de sistemas de recirculación de gases de baja y alta presión analizando ensayos con condiciones de operación por las que el vehículo circula en el ciclo de homologación llegando a la siguiente conclusión:

En el capítulo 3 se concluye que la efectividad del dispositivo de alta presión en la eliminación de NOx es alta para bajas tasas de EGR, mientras que para condiciones más severas donde es necesario tasas en torno al 40% el aumento de temperatura penaliza la efectividad de la misma. También el comportamiento del motor se ve afectado notablemente a altas tasas debido a la configuración de la EGR de alta presión. Esto ocurre porque el caudal que circula por turbina se ve limitado y por lo consiguiente reduce el rendimiento del motor.

Tras realizar el capítulo 4 del presente trabajo se llega a la conclusión de que con el uso del sistema de recirculación de gases de escape de baja presión a bajas tasas de EGR el comportamiento es similar. Sin embargo, para altas tasas, la efectividad en la emisión de NOx no presenta penalizaciones debido a que el incremento de la temperatura con el aumento de la tasa es insignificante. De la misma manera ocurre con el comportamiento del motor, donde el rendimiento no se ve afectado. Debido a que con este tipo de configuración, el caudal que circula por la turbina es similar al del motor sin EGR.

Tal y como se ha comentado la pérdida de eficacia en la eliminación de formación de NOx de la EGR de alta presión es debida a la alta temperatura que se alcanza. En la actualidad el uso de la misma se limita en condiciones de operación con el motor en frío, porque debido a su configuración el motor alcanza las condiciones de operación normales en un menor tiempo.

Por último, tras analizar los parámetros presentes en el capítulo 4 se concluye como el uso del sistema de recirculación de gases de escape de baja presión es menos influyente en las condiciones de

operación del motor en el que actúan, debido a la configuración de dicho sistema consiguiendo el mejor compromiso entre efectividad en eliminación de óxidos de nitrógeno e impacto en las prestaciones del motor.

### 5.3 Principales aportaciones del autor del TFM

A lo largo del presente trabajo fin de máster se ha llevado a cabo un análisis del proceso de recirculación de gases de escape y su consecuencia sobre el funcionamiento en motores diésel para conocer los efectos de distintos sistemas de recirculación sobre la formación de óxidos de nitrógeno. Para obtener esa resolución, en primer lugar se ha realizado un estudio del estado de la arte en la disminución de NOx.

Posteriormente se han recopilado ensayos en los que estudiaban los efectos de la recirculación de gases sobre el comportamiento del motor y se ha realizado una comparativa sobre los distintos sistemas de EGR con mayor proyección futura. Para llegar a la conclusión de la mejora en formación de óxidos de nitrógeno con dicho sistema y el mejor comportamiento del sistema de recirculación de gases de baja presión en los parámetros del motor y en la eliminación de NOx.

### 5.4 Sugerencias para trabajos futuros

A partir de las conclusiones obtenidas se plantea la investigación de un sistema de recirculación de gases que pueda acometer las funciones principales de los dos sistemas estudiados sin sacrificar la sencillez técnica que caracteriza este sistema. Un sistema que sea capaz de calentar la mezcla cuando el motor no esté en condiciones óptimas de operación, tal como ocurre con el sistema de EGR de alta presión pero que a su vez sea capaz de desarrollar también las funciones del sistema de recirculación de baja presión bajando la temperatura de combustión con grandes tasas de EGR. Esto se puede conseguir con un sistema by-pass que haga circular los gases por un intercambiador de calor solo cuando una consigna de temperatura lo determine, tal y como se muestra en la figura 5.1.

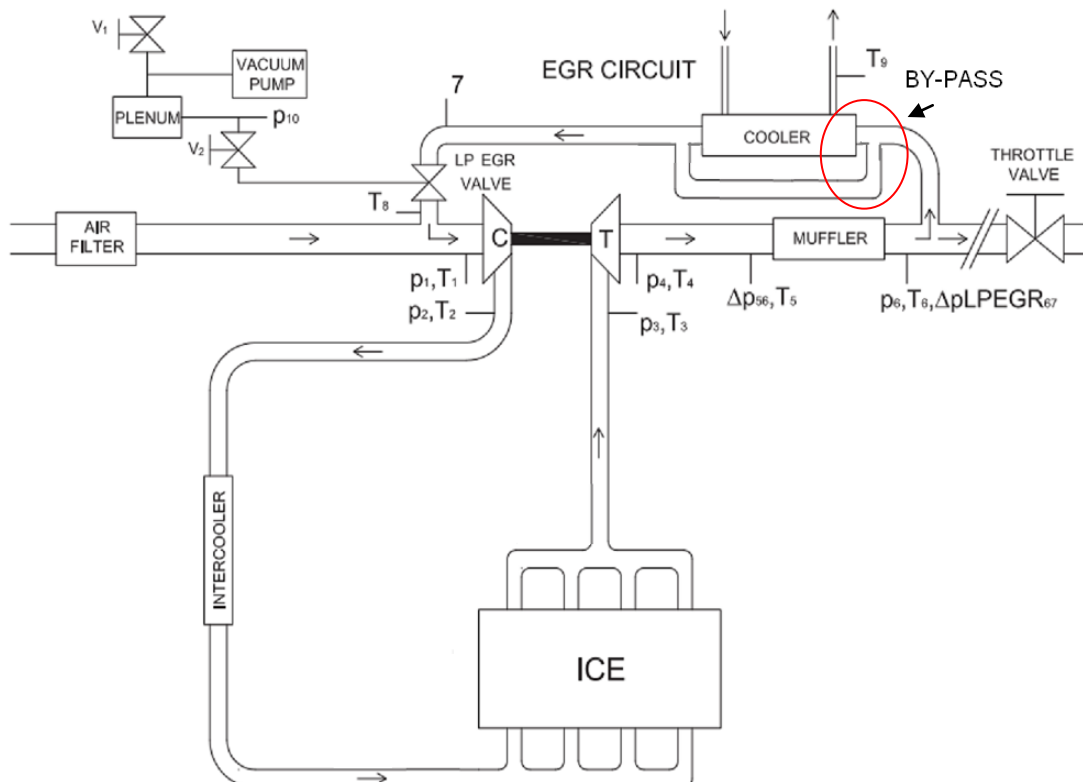


Figura 5.1: Sistema de recirculación de gases sugerido para investigaciones futuras

Como alternativa otra propuesta sería un análisis de la combinación de las distintas técnicas activas y pasivas para obtener distintos resultados en la capacidad de reducción de óxidos de nitrógeno.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### - Bibliografía principal

1. Zamboni, Giorgio; and Capobianco, Massimo. Experimental study on the effects of hp and lp EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Elsevier ed, 2012.
2. Malpartida García, Irene. *Un estudio del proceso de almacenamiento seguido de reducción, NSR, para la eliminación de NOx en fuentes móviles*. Tesis doctoral. Universidad de Málaga. 2006.
3. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Apuntes de la asignatura Motores de combustión interna alternativos. La contaminación de los MCI. Mecanismos de formación. Grado de ingeniería mecánica. Universidad de Valladolid. 2016.
4. Prieto, Ismael. *Reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno*. Tesis doctoral. Universidad de Gijón. 2010.
5. Uzcátegui Paredes, Álvaro A. *Reducción catalítica de óxidos de nitrógeno (NOx) en corrientes gaseosas*. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia. 2010.
6. Blumberg, Katherine O., Walsh, Michael P., Pera, Charlotte. Low – sulfur gasoline and diesel: the key to lower vehicle emissions, Car lines by Michael Walsh. 2003.
7. Ortega Monserrat, Manuel Pedro. *Aportación a la investigación sobre la reducción de las emisiones de nox en grupos diesel utilizados para generación de energía eléctrica*. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2014.
8. Quindimil Rengel, Adrián. *Estudios sobre la distribución de recubrimientos NSR y SCR en catalizadores monolíticos de doble capa para la eliminación de NOx*. Trabajo fin de grado. Universidad del País Vasco. 2014.
9. Pla Moreno, Benjamín. Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diésel sobrealimentados. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia. 2009.
10. Reifarh, Simon. *Efficiency and Mixing Analysis of EGR-Systems for Diesel Engines*. Tesis Doctoral. Royal Institute of Technology Stockholm. 2014.
11. Rodríguez Vidal, Carlos Gervasio; Lamas Galdo, María Isabel. Optimization of the efficiency of a biomimetic marine propulsor using CFD. 2014.
12. Göran Hellén. Center for Energy and Environmental Research and Services (CEERS) Department of Mechanical and Aerospace Engineering California State University. Emission control technologies for ocean going vessels (ogvs). Report final. 2008.
13. David Brown, Rudolf Holtbecker. "Next steps in exhaust emissions control for wärtsilä low-speed engines". Report final. 2012.
14. Mollenhauer, Klaus; Tschöke, Helmut. HANDBOOK OF DIESEL ENGINES. Springer Berlin Heidelberg ed. 2008.
15. Carrera Escobedo, José Luis; Riesco Ávila, José Manuel; Hugo Rangel, Víctor Hernández; Ramírez Barrón, Alejandro. Estudio numérico de la reducción simultánea de nox y hollín en un motor diésel. Memorias del xv congreso internacional anual de la SOMIM. 2009.
16. Genesis Engineering Inc. Non-road diesel emission reduction study. 2003.
17. Asad, Usman; Zheng, Ming. Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles. Elsevier ed. 2014.

18. Geist, Markus A.; Holtbecker, Markus A.; Chung, San Y. Marine diesel NOx reduction technique- a new Sulzer diesel ltd. Approach. SAE international. 1997.
19. Demers, Don; Walters, Gelnn. Bae systems. guide to exhaust emission control options. 2009
20. Nuzskowski, John P. The effects of fuel additives on diesel engine emissions during steady state and transient operation. Tesis doctoral. West Virginia University. 2014.
21. Mantilla León, Christian Alfredo; Tapia Romero, Juan Carlos. *Estudio de los efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un motor de encendido por compresión CRDI, mediante el uso de termografía infrarroja*. Proyecto final de carrera. Universidad politécnica de Cuenca. 2015.
22. Epling, William S.; Campbell, Larry E.; Yezerets, Aleksey; Currier, Neal W.; y Parks, James E. Overview of the Fundamental Reactions and Degradation Mechanisms of NOx Storage/Reduction Catalysts. Florida. 2007
23. Peden, Chuck. NOx Adsorber (Lean NOx Trap) Fundamentals. Pacific Northwest National Laboratory. 2007.
24. Schnitzler, Jürgen. Particulate Matter and NOx Exhaust Aftertreatment Systems. FEV.
25. Bosch. Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Anfac research. 2014.
26. Gerardo Delás Medina. Estudio de envejecimiento de un LNT (Lean NOx Trap). Trabajo final de Master. Universidad de Valladolid. 2015.
27. LI, Xinling; Xu, Zhen; Guan, Chun; Huang, Zhen. Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load. Elsevier ed. 2014
28. kumar, B. Rajesh; Saravanan, S. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends. Elsevier ed. 2015.
29. Millo, Federico; Giacominetto, Paolo Ferrero; Bernardi, Marco Gianoglio. Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines. Elsevier ed, 2012.
30. Payri, F; Desantes, J.M; (Molina, Santiago A.). *Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diésel*. Reverté ed, 2005.
31. Asad, Usman; Tjong, Jimi; Zheng, Ming. Exhaust gas recirculation – Zero dimensional modelling and characterization for transient diesel combustion control. Elsevier ed. 2014.
32. Park, Youngsoo; Bae, Choongsik. Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine. Elsevier ed, 2014.
33. Renault S.A. Archivos internos sobre contaminantes. 2015.

- Bibliografía adicional

- Angamarca Panamito, Jairo Alfredo; Soto Ocampo, César Ricardo. *Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustión, de un motor de encendido por compresión CRDI Hyundai Santa Fé 2.0, mediante el análisis de vibraciones*. Proyecto final de carrera. Universidad politécnica de Cuenca. 2015.
- Añón García, David. *Aplicación de un modelo de diagnóstico de la combustión para la detección de la dispersión de egr en un motor diésel EURO5*. Trabajo final de grado. Universidad politécnica de Valencia. 2014.
- Asad, Usman; Tjong, Jimi; Zheng, Ming. Exhaust gas recirculation – Zero dimensional modelling and characterization for transient diesel combustion control. Elsevier ed. 2014.
- Aswani, D.; Van Nieuwstadt, M. J.; Cook, J. A.; Grizzle, J. W. Control oriented modeling of a diesel active lean NOx catalyst aftertreatment System. ASME journal. 2003.
- Cabrera López, Pedro. *Aplicación de la medida de NOx para el control de motores diésel sobrealimentados*. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia. 2013.
- Maiboom, Alain; Tauzia, Xavier; Shah, Samiur Rahman; Hétet, Jean-François. Experimental Study of an LP EGR System on an Automotive Diesel Engine, compared to HP EGR with respect to PM and NOx Emissions and Specific Fuel Consumption. Elsevier ed. 2009.
- Maiboom, Alain; Tauzia, Xavier; Hétet, Jean-François. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine. Elsevier ed. 2008.
- Maiboom, Alain; Tauzia, Xavier; Hétet, Jean-François. Influence of EGR unequal distribution from cylinder to cylinder on NOx–PM trade-off of a HSDI automotive Diesel engine. Elsevier ed. 2009.
- Kökkülünk, Górkem; Parlak, Adnan; Ayhan, Vezir; Cesur, Idris; Gonca, Güven; Boru, Baris. Theoretical and experimental investigation of steam injected diesel engine with EGR. Elsevier ed. 2014.
- Li, Yaopeng; Jia, Ming; Chang, Yachao; Fan, Weiwei; Xie, Maozhao; Wangb, Tianyou. Evaluation of the necessity of exhaust gas recirculation employment for a methanol/diesel reactivity controlled compression ignition engine operated at medium loads. Elsevier ed. 2015.
- Roy, Sumit; Banerjee, Rahul; Bose, Probir Kumar. Performance and exhaust emissions prediction of a CRDI assisted single cylinder diesel engine coupled with EGR using artificial neural network. Elsevier. 2014.
- Soler, José Antonio. *Investigación específica sobre sistemas de EGR y Sobrealimentación en MCIA*. Trabajo fin de máster. Universidad politécnica de Valencia. 2010.
- Verschaeren, Roel; Schaepe Dryver, Wouter; Serruys, Thomas; Bastiaen, Marc; Vervaeke, Lieven; Verhelst, Sebastian. Experimental study of NOx reduction on a medium speed heavy duty diesel engine by the application of EGR (exhaust gas recirculation) and Miller timing. Elsevier ed. 2014.
- Wang, Junmin. Air fraction estimation for multiple combustion mode diesel engines with dual-loop EGR systems. Elsevier ed. 2008.
- Zamboni, Giorgio; Copobianco, Massimo. Influence of high and low pressure EGR and VGT control on in-cylinder pressure diagrams and rate of heat release in an automotive turbocharged diesel engine. Elsevier ed. 2013.

- Bibliografía de páginas WEB

1. Vehículos matriculados según carburante en España durante 1994 y 2012. [www.ine.es](http://www.ine.es)
2. DidacForner. La química de los motores diésel, consulta de la composición de los gases de escape en un motor diésel en [www.didacforner.net](http://www.didacforner.net), página web consultada entre Septiembre 2015 y Febrero 2016.
3. CienciaMotor. Consulta sobre las propiedades de los gases de escape de motores diésel en la página web [www.cienciamotor.blogspot.fr/](http://www.cienciamotor.blogspot.fr/) consultada entre Octubre 2015 y Febrero 2016.
4. NA. Normativa europea de regulación de emisiones. Tabla de [www.eadic.com](http://www.eadic.com), página web consultada entre Septiembre 2015 y Febrero 2016.
5. NA. Ciclo de homologación europeo, imagen obtenida de [www.fiafoundation.org](http://www.fiafoundation.org), página web consultada entre Septiembre 2015 y Febrero 2016.
6. NSW EPA. Reducing Emissions from Non road Diesel Engines. Archivo obtenido en la web [www.epa.nsw.gov.au](http://www.epa.nsw.gov.au) consultada entre Septiembre 2015 y Febrero 2016.
7. Coleman, Dave. Consulta sobre la tecnología SKYACTIV – D de Mazda en la página web [www.cargroup.org](http://www.cargroup.org) consultada entre Octubre 2015 y Febrero 2016.
8. EPA Air Pollution Control Cost Manual. Manual for reciprocating internal combustion engines consultado en la página web [www.colorado.gov/](http://www.colorado.gov/) entre Octubre 2015 y Febrero 2016.
9. NA. Integrated Pollution Prevention and Control. European Commission. Documento recogido en [www.eippcb.jrc.ec.europa.eu](http://www.eippcb.jrc.ec.europa.eu) entre Octubre 2015 y Febrero 2016
10. NA. State of the art (SOTA). Manual for reciprocating internal combustion engines. Documento recogido en [www.colorado.gov](http://www.colorado.gov) entre Octubre 2015 y Febrero 2016.
11. NA. Esquema de un motor equipado con sistemas de recirculación de alta y baja presión. Consultado en la página [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com) entre Octubre 2015 y Febrero 2016.



- Bibliografía completa en orden alfabético

- Angamarca Panamito, Jairo Alfredo; Soto Ocampo, César Ricardo. Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustión, de un motor de encendido por compresión CRDI Hyundai Santa Fé 2.0, mediante el análisis de vibraciones. Proyecto final de carrera. Universidad politécnica de Cuenca. 2015.
- Añón García, David. Aplicación de un modelo de diagnóstico de la combustión para la detección de la dispersión de egr en un motor diésel EURO5. Trabajo final de grado. Universidad politécnica de Valencia. 2014.
- Asad, Usman; Tjong, Jimi; Zheng, Ming. Exhaust gas recirculation – Zero dimensional modelling and characterization for transient diesel combustion control. Elsevier ed. 2014.
- Asad, Usman; Zheng, Ming. Exhaust gas recirculation for advanced diesel combustion cycles. Elsevier ed. 2014.
- Aswani, D.; Van Nieuwstadt, M. J.; Cook, J. A.; Grizzle, J. W. Control oriented modeling of a diesel active lean NOx catalyst aftertreatment System. ASME journal. 2003.
- Blumberg, Katherine O., Walsh, Michael P., Pera, Charlotte. Low – sulfur gasoline and diesel: the key to lower vehicle emissions, Car lines by Michael Walsh. 2003.
- Bosch. Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Anfac research. 2014.
- Cabrera López, Pedro. Aplicación de la medida de NOx para el control de motores diésel sobrealimentados. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia. 2013.
- Carrera Escobedo, José Luis; Riesco Ávila, José Manuel; Hugo Rangel, Víctor Hernández; Ramírez Barrón, Alejandro. Estudio numérico de la reducción simultánea de nox y hollín en un motor diésel. Memorias del xv congreso internacional anual de la SOMIM. 2009.
- David Brown, Rudolf Holtbecker. “Next steps in exhaust emissions control for wärtsilä low-speed engines”. Report final. 2012.
- Demers, Don; Walters, Geln. Bae systems. guide to exhaust emission control options. 2009
- Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Apuntes de la asignatura Motores de combustión interna alternativos. La contaminación de los MCI. Mecanismos de formación. Grado de ingeniería mecánica. Universidad de Valladolid. 2016.
- Epling, William S.; Campbell, Larry E.; Yezerets, Aleksey; Currier, Neal W.; y Parks, James E. Overview of the Fundamental Reactions and Degradation Mechanisms of NOx Storage/Reduction Catalysts. Florida. 2007
- Geist, Markus A.; Holtbecker, Markus A.; Chung, San Y. Marine diesel NOx reduction technique- a new Sulzer diesel ltd. Approach. SAE international. 1997.
- Genesis Engineering Inc. Non-road diesel emission reduction study. 2003.
- Gerardo Delás Medina. Estudio de envejecimiento de un LNT (Lean NOx Trap). Trabajo final de Master. Universidad de Valladolid. 2015.
- Göran Hellén. Center for Energy and Environmental Research and Services (CEERS) Department of Mechanical and Aerospace Engineering California State University. Emission control technologies for ocean going vessels (ogvs). Report final. 2008.
- Kökkülünk, Górkem; Parlak, Adnan; Ayhan, Vezir; Cesur, Idris; Gonca, Güven; Boru, Baris. Theoretical and experimental investigation of steam injected diesel engine with EGR. Elsevier ed. 2014.

- kumar, B. Rajesh; Saravanan, S. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends. Elsevier ed. 2015.
- Li, Xinling; Xu, Zhen; Guan, Chun; Huang, Zhen. Impact of exhaust gas recirculation (EGR) on soot reactivity from a diesel engine operating at high load. Elsevier ed. 2014
- Li, Yaopeng; Jia, Ming; Chang, Yachao; Fan, Weiwei; Xie, Maozhao; Wangb, Tianyou. Evaluation of the necessity of exhaust gas recirculation employment for a methanol/diesel reactivity controlled compression ignition engine operated at medium loads. Elsevier ed. 2015.
- Maiboom, Alain; Tauzia, Xavier; Shah, Samiur Rahman; Hétet, Jean-François. Experimental Study of an LP EGR System on an Automotive Diesel Engine, compared to HP EGR with respect to PM and NOx Emissions and Specific Fuel Consumption. Elsevier ed. 2009.
- Maiboom, Alain; Tauzia, Xavier; Hétet, Jean-François. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine. Elsevier ed. 2008.
- Maiboom, Alain; Tauzia, Xavier; Hétet, Jean-François. Influence of EGR unequal distribution from cylinder to cylinder on NOx–PM trade-off of a HSDI automotive Diesel engine. Elsevier ed. 2009.
- Malpartida García, Irene. Un estudio del proceso de almacenamiento seguido de reducción, NSR, para la eliminación de NOx en fuentes móviles. Tesis doctoral. Universidad de Málaga. 2006.
- Mantilla León, Christian Alfredo; Tapia Romero, Juan Carlos. Estudio de los efectos de la apertura de la válvula EGR en la combustión de un motor de encendido por compresión CRDI, mediante el uso de termografía infrarroja. Proyecto final de carrera. Universidad politécnica de Cuenca. 2015.
- Millo, Federico; Giacominetto, Paolo Ferrero; Bernardi, Marco Gianoglio. Analysis of different exhaust gas recirculation architectures for passenger car Diesel engines. Elsevier ed, 2012.
- Mollenhauer, Klaus; Tschöke, Helmut. HANDBOOK OF DIESEL ENGINES. Springer Berlin Heidelberg ed. 2008.
- Nuzskowski, John P. The effects of fuel additives on diesel engine emissions during steady state and transient operation. Tesis doctoral. West Virginia University. 2014.
- Ortega Monserrat, Manuel Pedro. Aportación a la investigación sobre la reducción de las emisiones de nox en grupos diesel utilizados para generación de energía eléctrica. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2014.
- Park, Youngsoo; Bae, Choongsik. Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine. Elsevier ed, 2014.
- Payri, F; Desantes, J.M; (Molina, Santiago A.). Influencia de los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diésel. Reverté ed, 2005.
- Peden, Chuck. NOx Adsorber (Lean NOx Trap) Fundamentals. Pacific Northwest National Laboratory. 2007.
- Pla Moreno, Benjamín. Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diésel sobrealimentados. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia. 2009.

- Prieto, Ismael. Reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno. Tesis doctoral. Universidad de Gijón. 2010.
- Quindimil Rengel, Adrián. Estudios sobre la distribución de recubrimientos NSR y SCR en catalizadores monolíticos de doble capa para la eliminación de NOx. Trabajo fin de grado. Universidad del País Vasco. 2014.
- Reifarth, Simon. Efficiency and Mixing Analysis of EGR-Systems for Diesel Engines. Tesis Doctoral. Royal Institute of Technology Stockholm. 2014.
- Renault S.A. Archivos internos sobre contaminantes. 2015.
- Rodríguez Vidal, Carlos Gervasio; Lamas Galdo, María Isabel. Optimization of the efficiency of a biomimetic marine propulsor using CFD. 2014.
- Roy, Sumit; Banerjee, Rahul; Bose, Probir Kumar. Performance and exhaust emissions prediction of a CRDI assisted single cylinder diesel engine coupled with EGR using artificial neural network. Elsevier. 2014.
- Schnitzler, Jürgen. Particulate Matter and NOx Exhaust Aftertreatment Systems. FEV.
- Soler, José Antonio. Investigación específica sobre sistemas de EGR y Sobrealimentación en MCIA. Trabajo fin de máster. Universidad politécnica de Valencia. 2010.
- Uzcátegui Paredes, Álvaro A. Reducción catalítica de óxidos de nitrógeno (NOx) en corrientes gaseosas. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia. 2010.
- Verschaeren, Roel; Schaepdryver, Wouter; Serruys, Thomas; Bastiaen, Marc; Vervaeke, Lieven; Verhelst, Sebastian. Experimental study of NOx reduction on a medium speed heavy duty diesel engine by the application of EGR (exhaust gas recirculation) and Miller timing. Elsevier ed. 2014.
- Wang, Junmin. Air fraction estimation for multiple combustion mode diesel engines with dual-loop EGR systems. Elsevier ed. 2008.
- Zamboni, Giorgio; and Capobianco, Massimo. Experimental study on the effects of hp and lp EGR in an automotive turbocharged diesel engine. Elsevier ed, 2012.
- Zamboni, Giorgio; Copobianco, Massimo. Influence of high and low pressure EGR and VGT control on in-cylinder pressure diagrams and rate of heat release in an automotive turbocharged diesel engine. Elsevier ed. 2013.

