

Corso di Macchine



Formazione e trattamento degli inquinanti: NOx

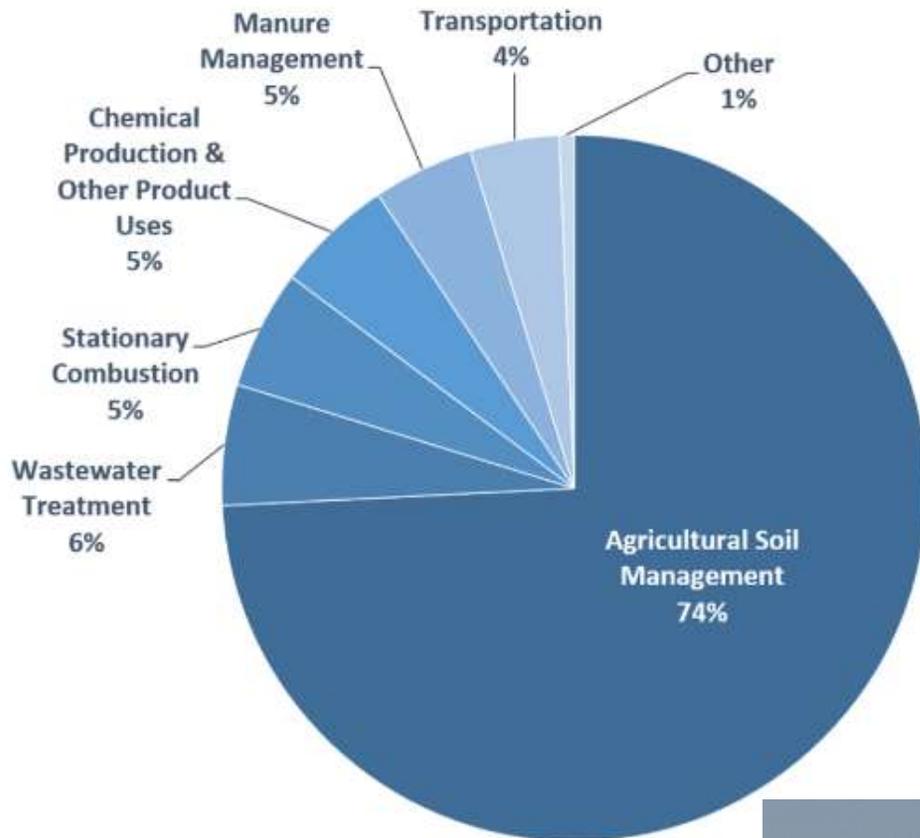
Prof. Rodolfo Taccani

Ing. Pierpaolo Sandrin

AA 2022-2023

OSSIDI DI AZOTO -- Intro

2020 U.S. Nitrous Oxide Emissions, By Source



Sono un inquinante dato dal legame diretto di N₂ e O₂ nella forma chimica di monossido di azoto (**NO**) e diossido di azoto (**NO₂**).

Generato da diverse attività umane e fenomeni naturali (fulmini)

Da [Overview of Greenhouse Gases | US EPA](#)



OSSIDI DI AZOTO -- Impatto

SIA effetto INQUINANTE LOCALE → SALUTE

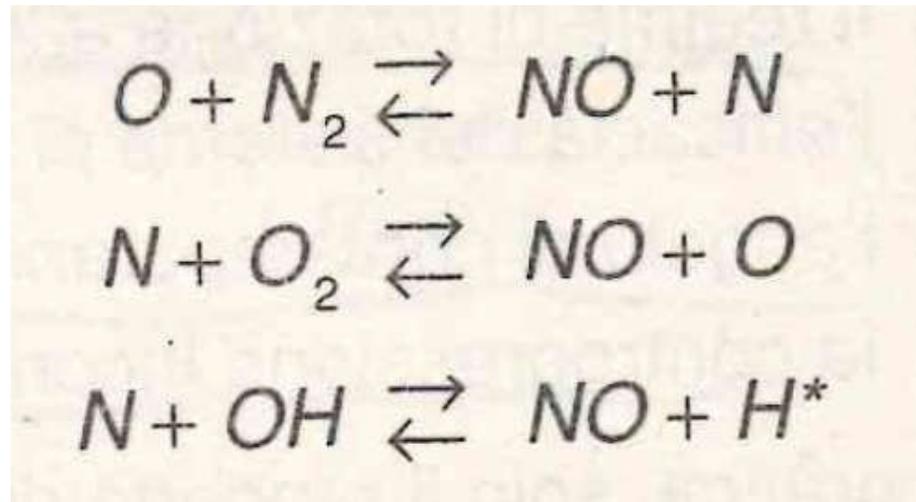
- Alterazione tissutale e **cellulare** delle vie respiratorie.
- Combinandosi con acqua → formazione di acido nitrico (**piogge acide**)
 $\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HNO}_2$
- Smog fotochimico. Energizzati da UV producono O_3 (Ozono) a basse quote. Estremamente corrosivo.

SIA effetto INQUINANTE GLOBALE → EFFETTO SERRA

Greenhouse gas	Chemical formula	Global Warming Potential, 100-year time horizon	Atmospheric Lifetime (years)
Carbon Dioxide	CO_2	1	100*
Methane	CH_4	25	12
Nitrous Oxide	NO	265	121

OSSIDI DI AZOTO – Formazione

NOX che si generano nelle macchine termiche (ICE, GT) e sono il risultato dell'interazione diretta tra O₂ e N₂, che ad **elevate temperature** (>2000K) diventa preferenziale rispetto alla reazione tra O₂ e H e C contenuti nei combustibili tradizionali.



Meccanismo di Zeldovich

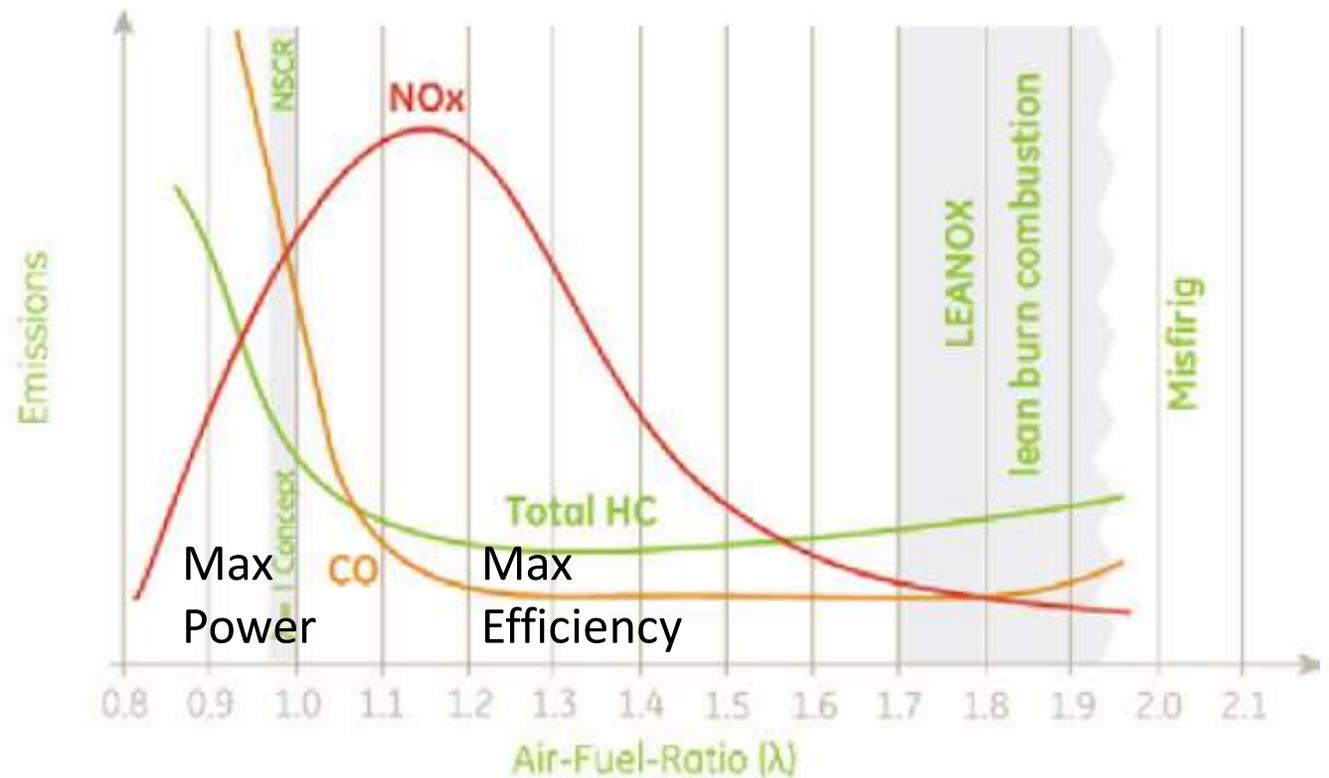
Concetto Chiave NB: si noti come siano le temperature la condizione necessaria e sufficiente per cui N₂ e O₂ si leghino (e non la combustione in sé o la presenza di combustibile).

OSSIDI DI AZOTO – Macroscopicamente

Se NOX dipendono da temp e q.tà di aria...

...allora nei motori, NOX fortemente dipendono dalla composizione della miscela.

VALE per Otto e Diesel



Concetto chiave : « Coperta troppo corta »

- Max Prestazioni
- Max efficienza
- Minime emissioni

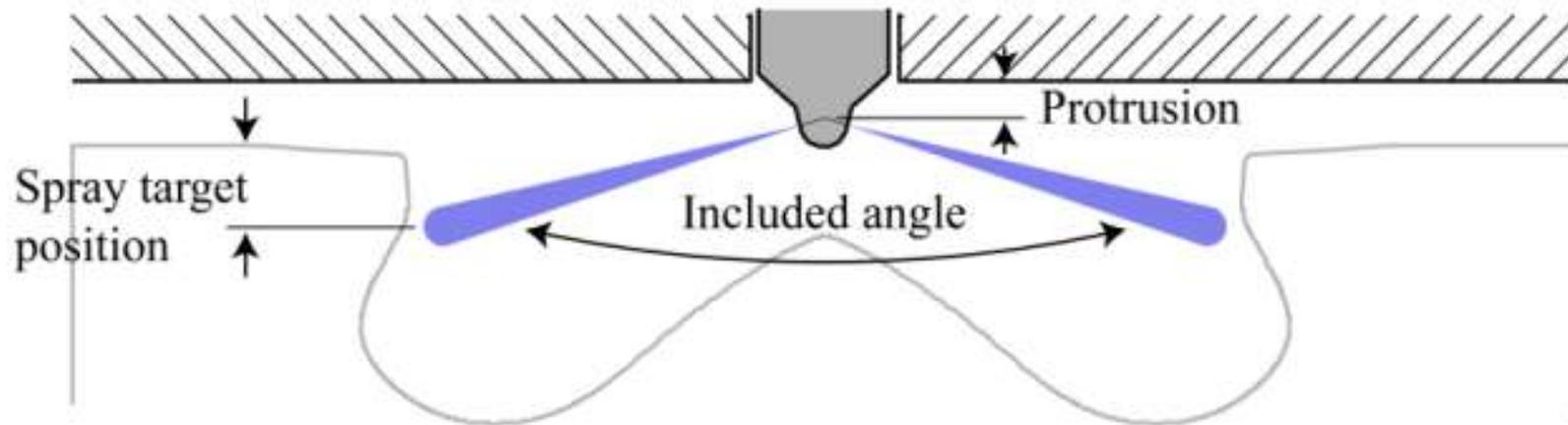
→ Sono obiettivi antitetici nella progettazione di motori

Concetto chiave :

Lambda corretto è condizione necessaria ma non sufficiente (vedi slide 6)

Immagine da «GE – Lean Burn or rich burn?»

OSSIDI DI AZOTO – Localmente



Precisazione per i **Diesel**.

Il grafico precedente vale macroscopicamente.

Nei motori Diesel (o a carica stratificata) ci sono regioni nella CC con miscela ricca confinanti con altre con miscela magra → es **interfaccia spray / carica aria**

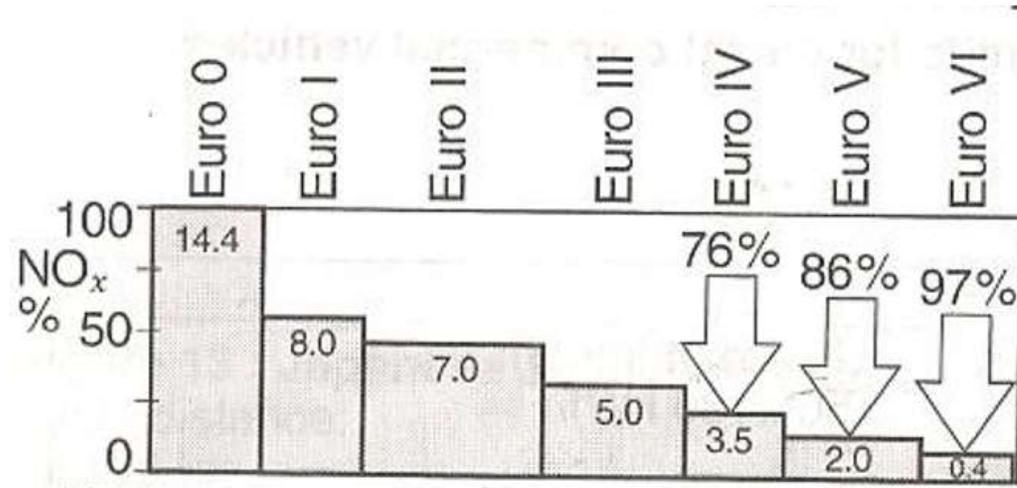
L'elevato rilascio di calore in quelle interfacce e l'elevata aria a disposizione producono quantità elevate di NO_x.

Concetto chiave: anche motori che operano con miscele GLOBALMENTE a bassa formazione di NO_x possono produrre elevati NO_x a causa di miscele LOCALMENTE sfavorevoli (mal progettati/funzionanti)

OSSIDI DI AZOTO – Quadro Normativo

Automotive (LDV Diesel)

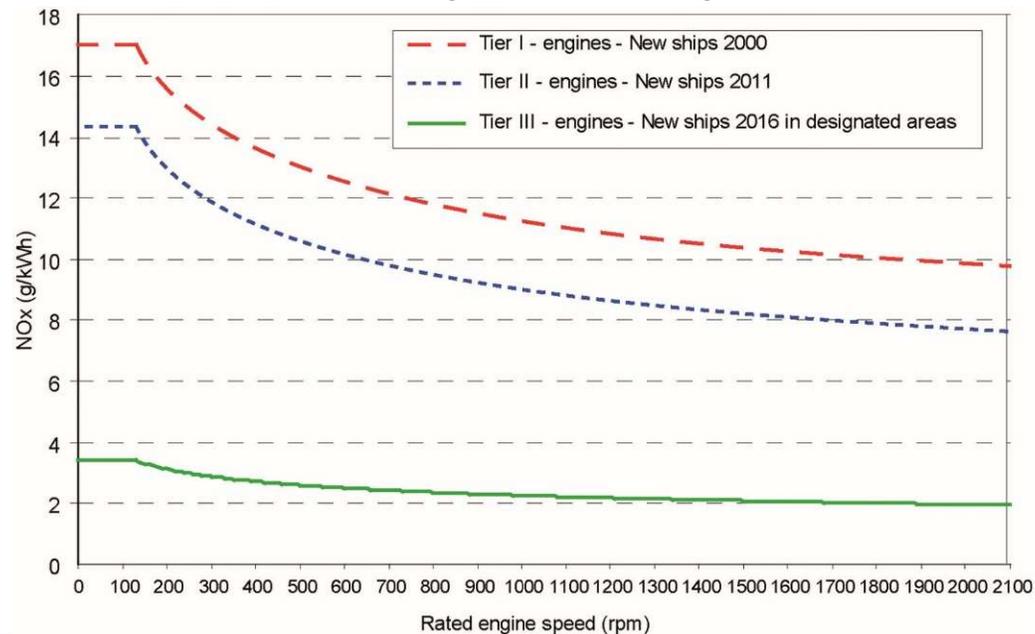
~ 0.5 g/KWh



«Bosch Automotive Handbook 9° edition»

Marine (IMO Tier III)

~ 2 g/KWh



«Wartsila.com»

OSSIDI DI AZOTO – Test Cycles

Automotive – ETC (European test cycles)

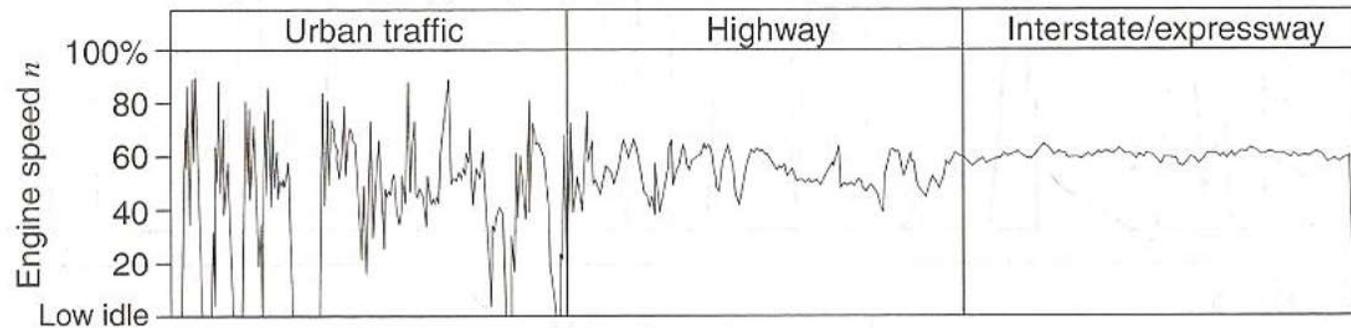


Immagine da «Bosch Automotive Handbook 9° edition»

Marine -- IMO Tier III – ISO8178

Mode number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Torque, %	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
Speed	Rated speed					Intermediate speed					Low idle
Marine application											
Type E1	0.08	0.11	-	-	-	-	0.19	0.32	-	-	0.30
Type E3, Mode #	1	2		3		4					
Power, %	100	75		50		25					
Speed, %	100	91		80		63					
Weighting factor	0.2	0.5		0.15		0.15					

Immagine da «Diesel.net»

OSSIDI DI AZOTO – Riduzione e Gestione

Strategie di riduzione e controllo

Hardware:

Layout:

- Powertrain
(es. Ibrido)
- Scarico
- EGR (HP /LP)
- ...
- ...

Componenti:

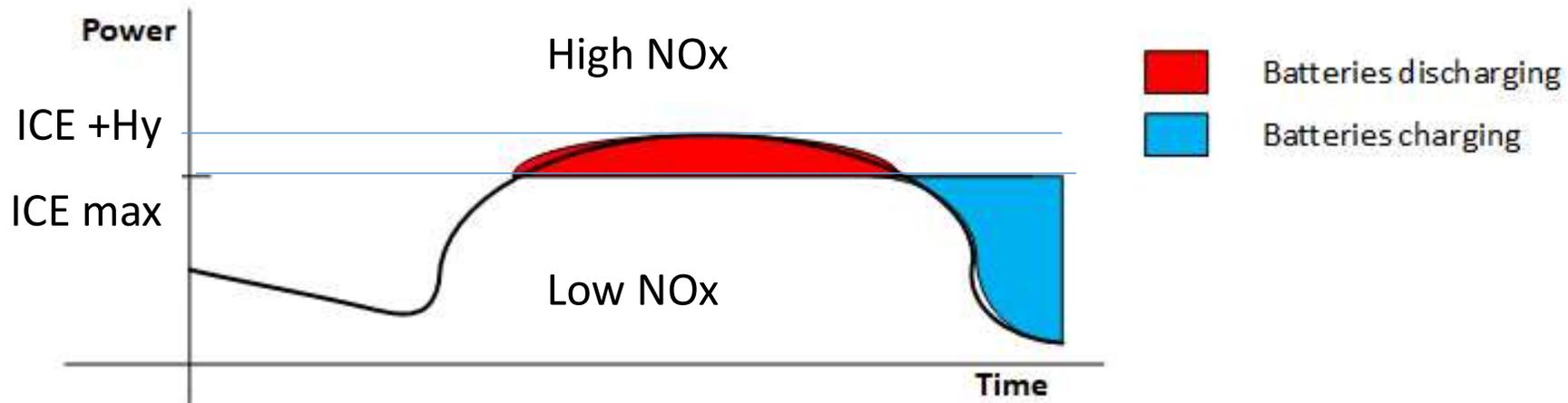
- Iniezione (DRS)
- Pistoni
(moto carica)
- camme
- attriti

Software (calibrazione):

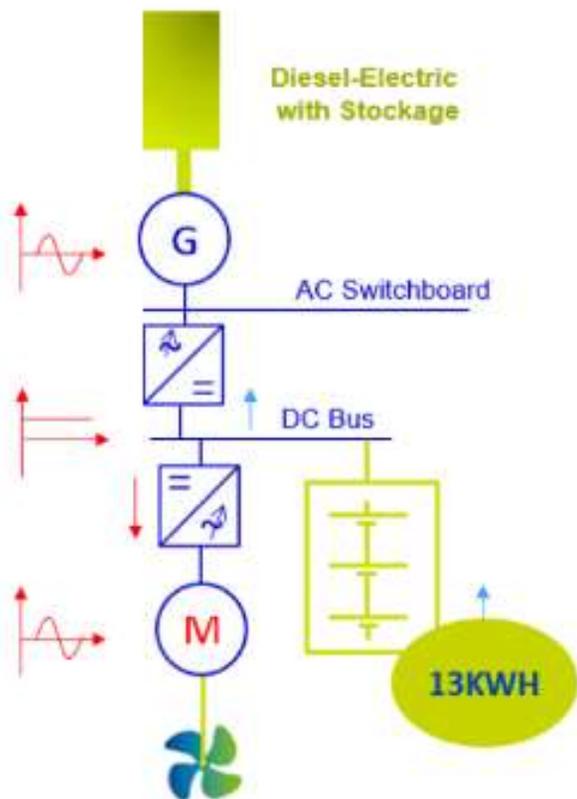
- Carico motore
- Iniezione / accensione
- % EGR
- Pressione di sovralimentazione
- Temperatura ammissione

Concetto chiave: layout,
componenti e calibrazione devono
integrarsi in una strategia
MOTIVATA di **funzionalità** e di **costo**

OSSIDI DI AZOTO – Ibrido / Riduzione carico



Consente di smussare la richiesta di carichi elevati ad esempio durante i transitori -- **Peak Shaving.**



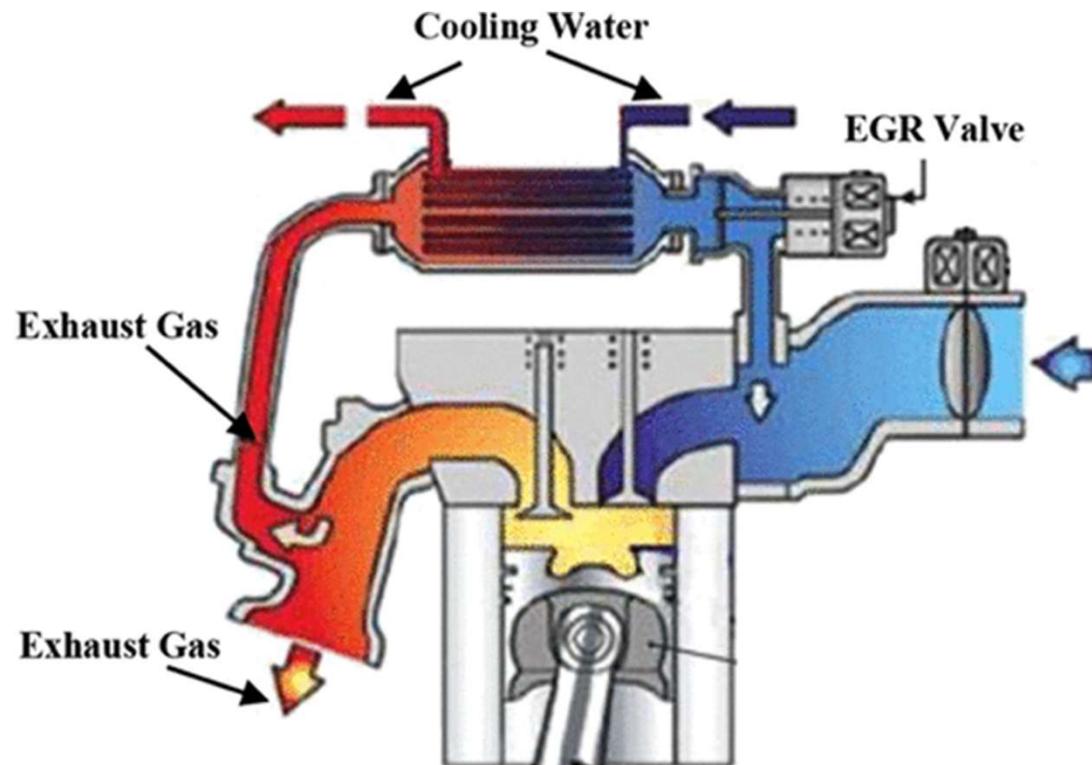
Il Peak shaving consente:

- + Riduzione del carico e quindi degli inquinanti (NOx)
- + Riduzione dell'energia necessaria (recupero energia)
- + Ottimizzazione del motore poiché avrà aree di lavoro più ristrette (DOWNSIZING)

OSSIDI DI AZOTO – EGR introduzione

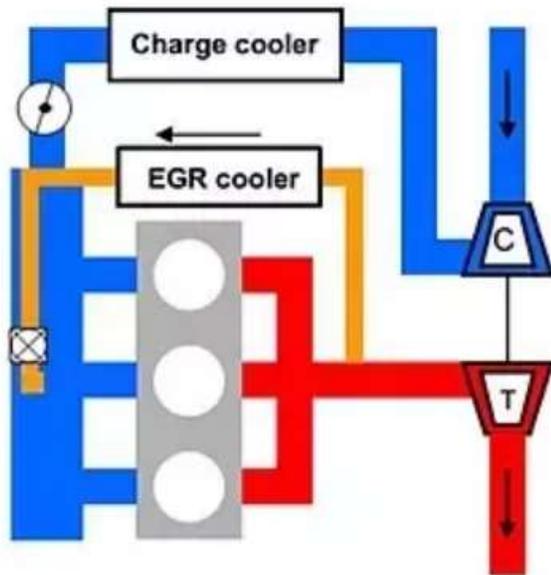
Concetto chiave: i gas di scarico (alta %CO₂ - inerte) in parte riciccolati in camera di combustione, smorzano i picchi di temperatura durante la combustione.

«Smorzatore termodinamico»



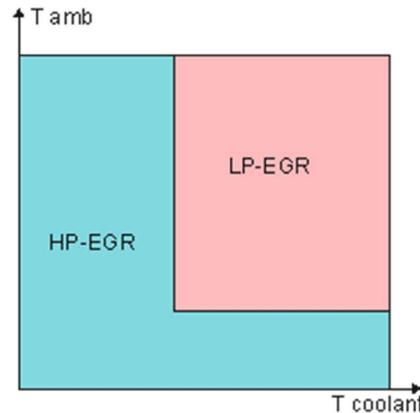
OSSIDI DI AZOTO – Tipi EGR

EGR HP (high pressure)

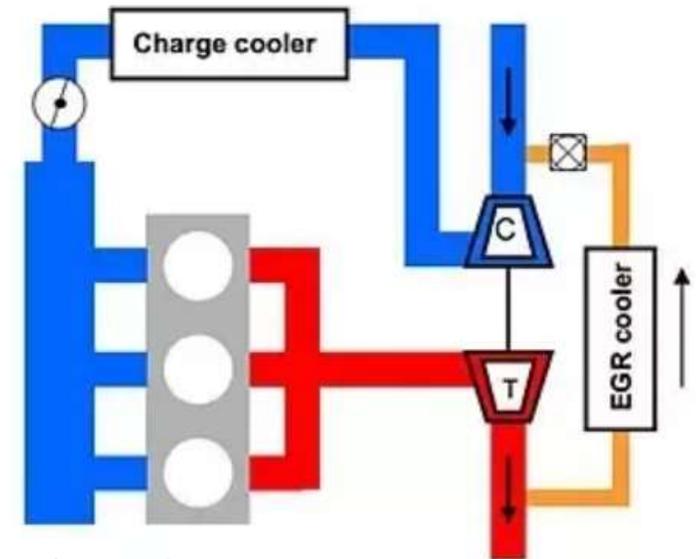


Automotive OK
Marine OK (MAN 2S)

- + affidabilità
- + semplicità
- Ristretto utilizzo (temp lim)
- Meno efficiente



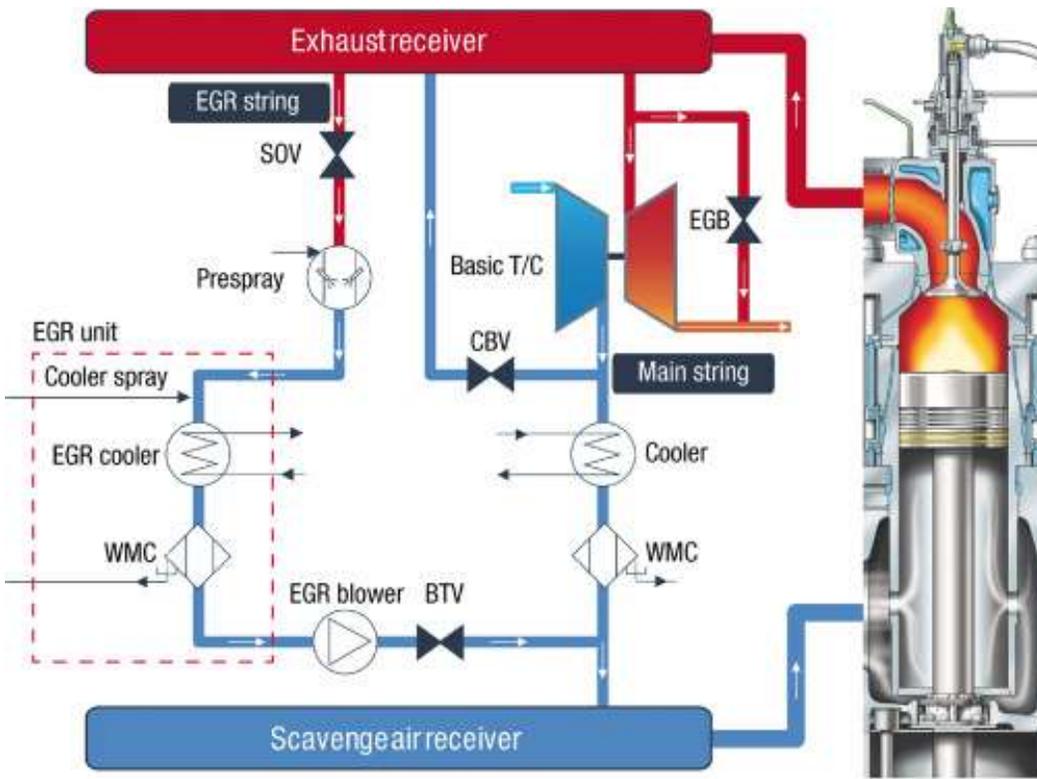
EGR LP low pressure



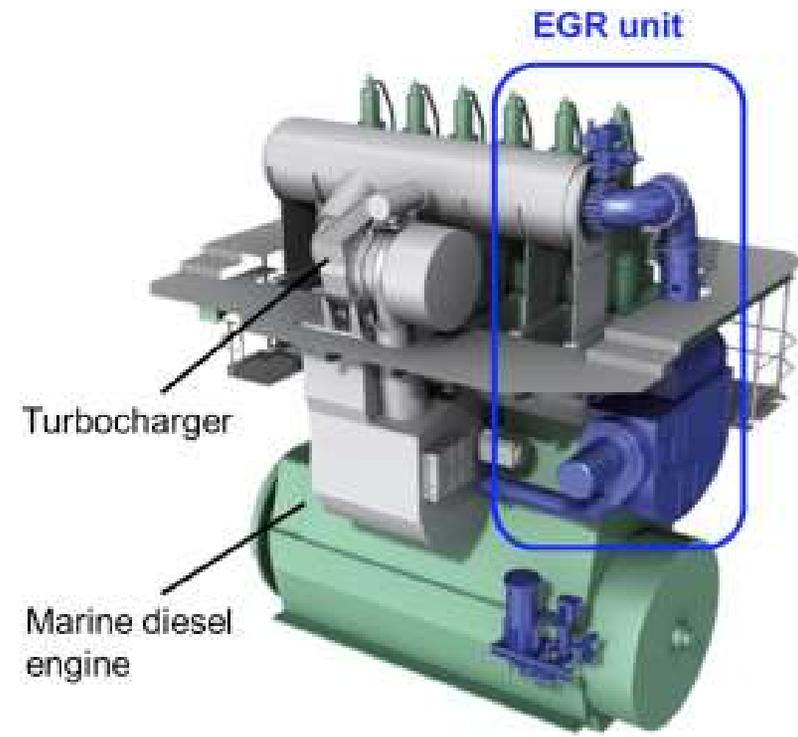
Automotive ~OK
Marine: problematico? (Mitsubishi)

- + efficienza motore
- Manutenzione (compressore)
- Ampio utilizzo
- Progettazione complessa (delta p, condensa)

OSSIDI DI AZOTO – HP EGR



SOV – EGR shut-off valve CBV – Cylinder bypass valve
 BTV – Blower throttle valve EGB – Exhaust Gas bypass valve



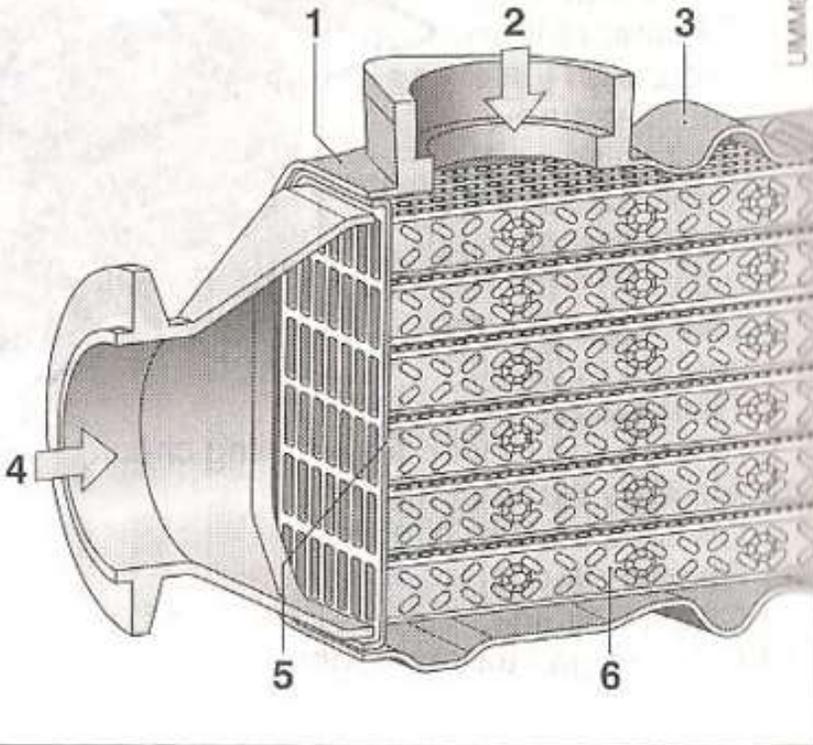
High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a Euro 6 diesel engine with lean-NOx trap: Effectiveness to reduce NOx emissions

[Experimental study on two-cylinder direct injection diesel engine for BS-III emission compliant](#)

OSSIDI DI AZOTO – EGR COOLER

Figure 9: EGR cooler

- 1 Stainless-steel housing (manufactured by internal high-pressure forming),
- 2 Coolant inlet,
- 3 Length compensation,
- 4 Exhaust-gas inlet,
- 5 Stainless-steel cooler base.
- 6 Stainless-steel winglet tubes.



Concetto chiave: lavora in condizioni durissime:

- Alte temperature
- Ambiente acido
- Rischio condense (acide)
- Vibrazioni
- Dilatazioni termiche e tenuta

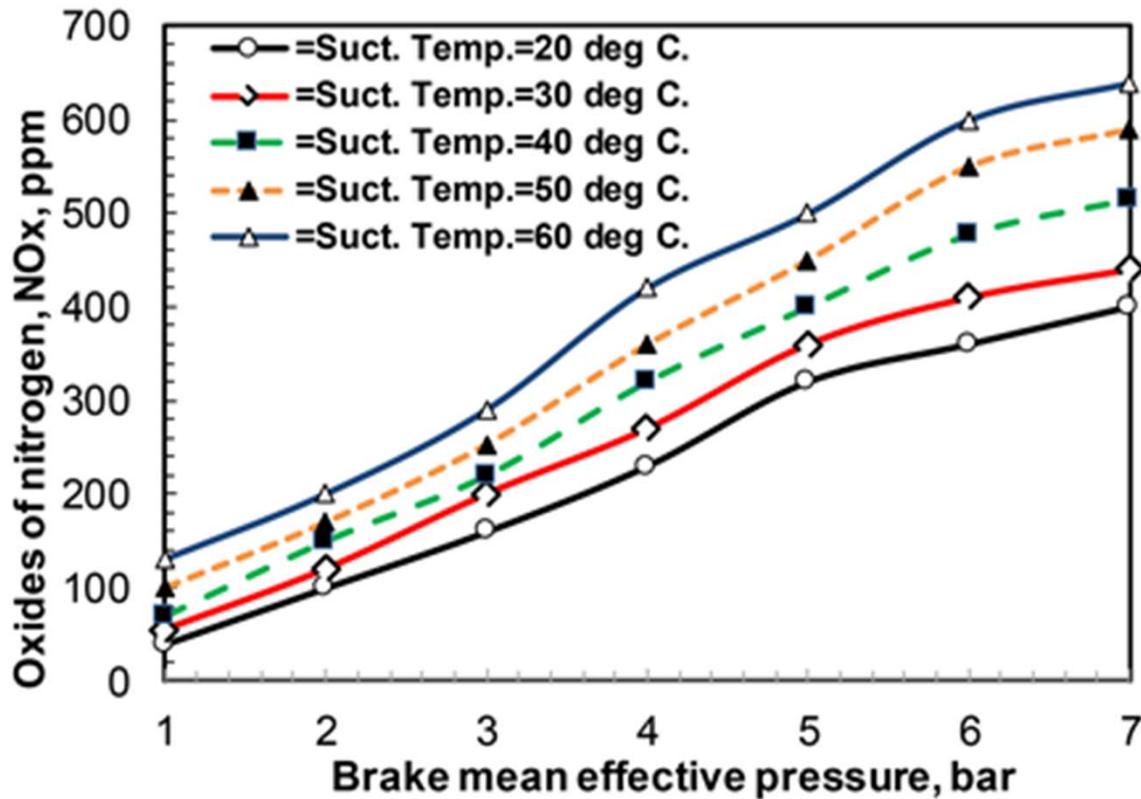
$T_{\text{gas_IN}}$

$T_{\text{Gas_OUT}}$

$T_{\text{cool_IN}}$

$T_{\text{cool_OUT}}$

OSSIDI DI AZOTO – TEMPERATURA ASPIRAZIONE



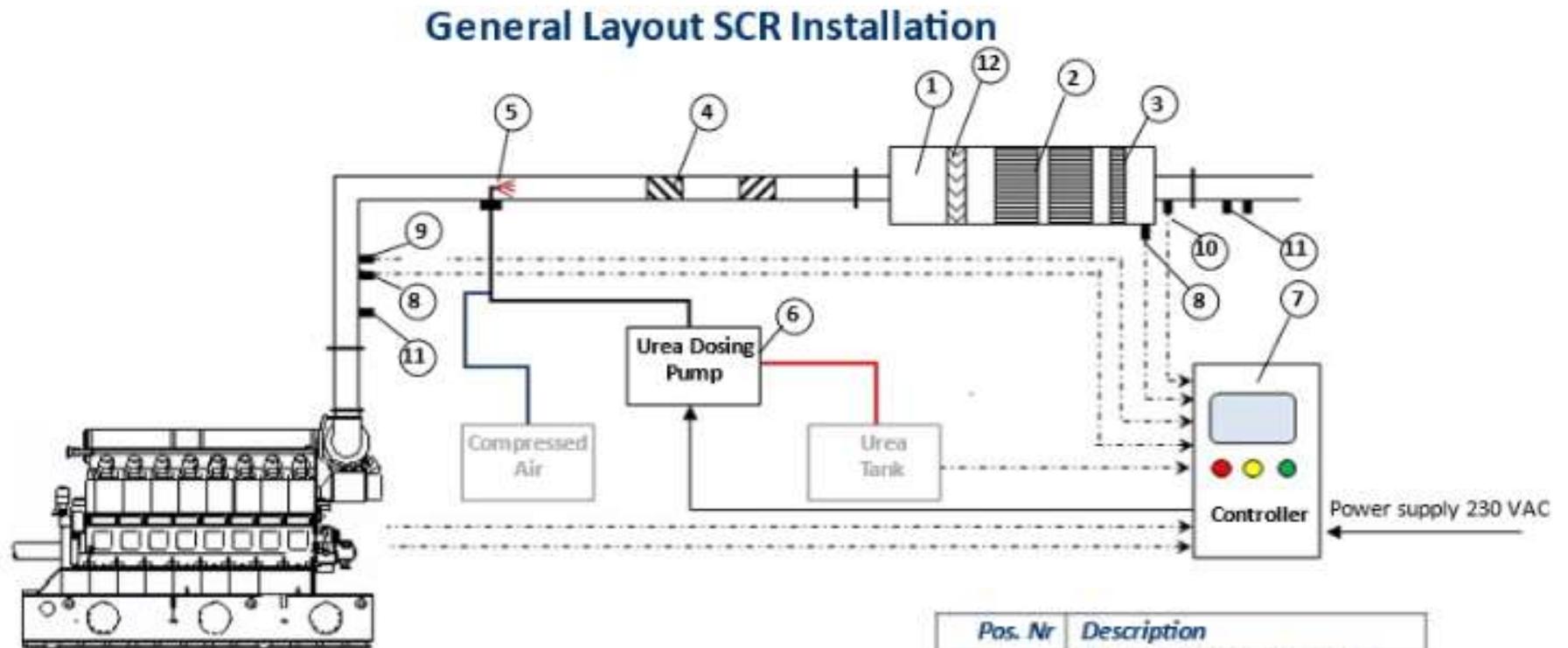
Una bassa $T_{\text{aspirazione}}$ consente:

- Maggior efficienza del motore (rendimento volumetrico)
- Minor produzione di NOx (a parità di aria)

→ Per questa ragione EGR hanno scambiatori di calore

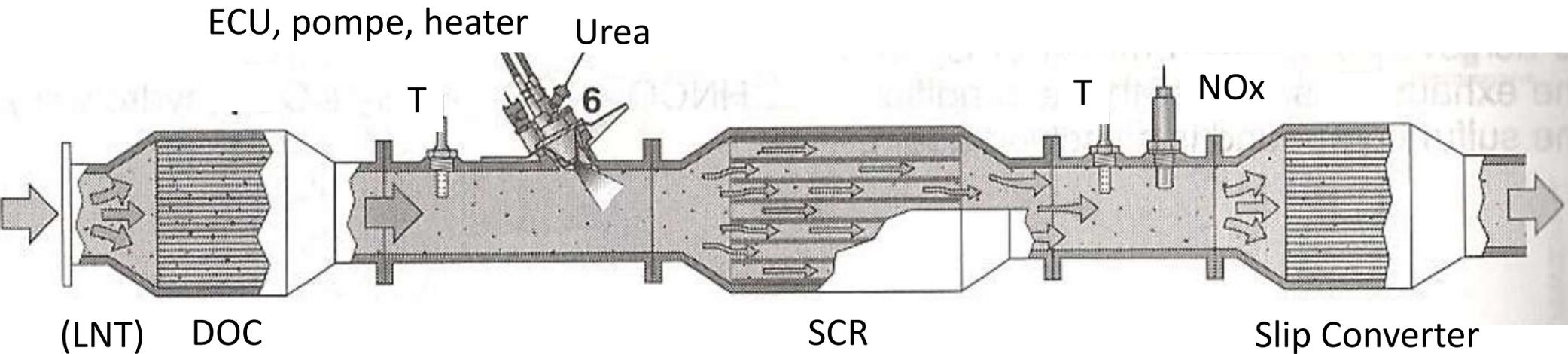
→ Per questo è giustificato lo sforzo a sfruttare LP EGR

OSSIDI di AZOTO – Sistema di scarico



<i>Pos. Nr</i>	<i>Description</i>
1	<i>Catalyst Housing /Silencer</i>
2	<i>Catalytic Element (NOx)</i>
3	<i>(Catalytic Element (Cleanup))</i>
4	<i>Mixer</i>
5	<i>Injector</i>
6	<i>Dosing Pump</i>
7	<i>Controller</i>
8	<i>Temperature sensor</i>
9	<i>Pressure sensor</i>
10	<i>NOx sensor</i>
11	<i>Plugged fittings</i>
12	<i>(Hydrolysis catalyst)</i>

OSSIDI DI AZOTO – Sistema di scarico



Automotive:

LNT/NSC → Lean Nox Trap / Nox storage catalyst

DOC → Diesel Oxidation Catalyst

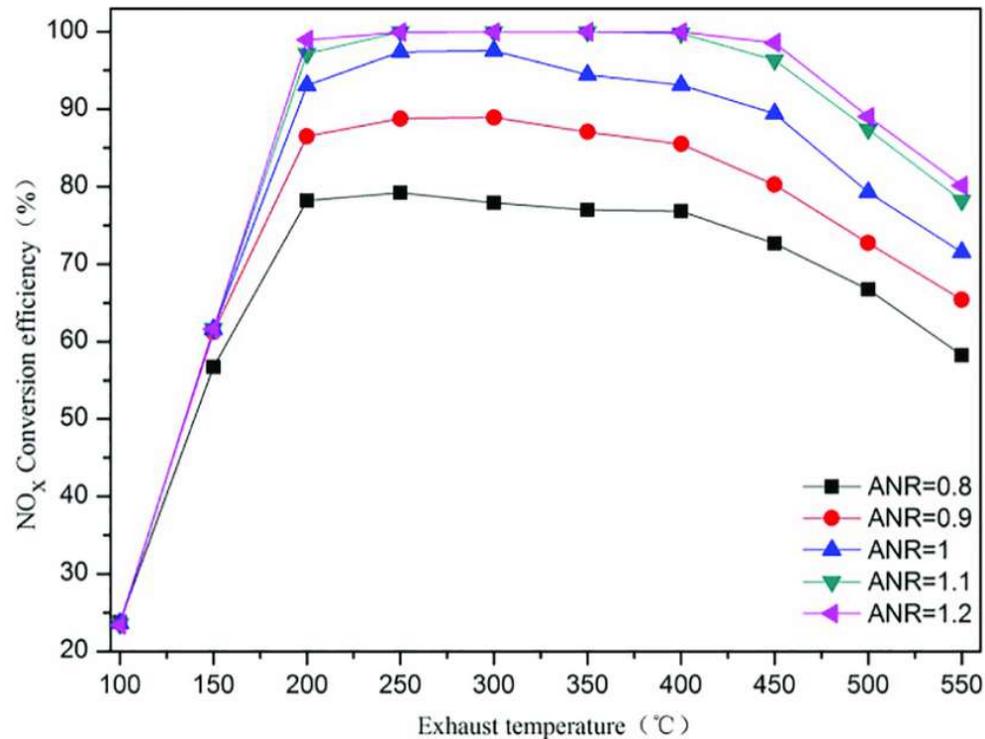
SCR → Selective Catalyst reduction



ASC / Slip Converter → serve a trattare l'eccesso di ammoniaca in prodotti inerti.



(Sistema di scarico – concetti chiave)



#1 Concetto chiave → I sistemi di scarico hanno costo paragonabile a quello del propulsore (vale per automotive, ma anche nel Marine è in crescita)

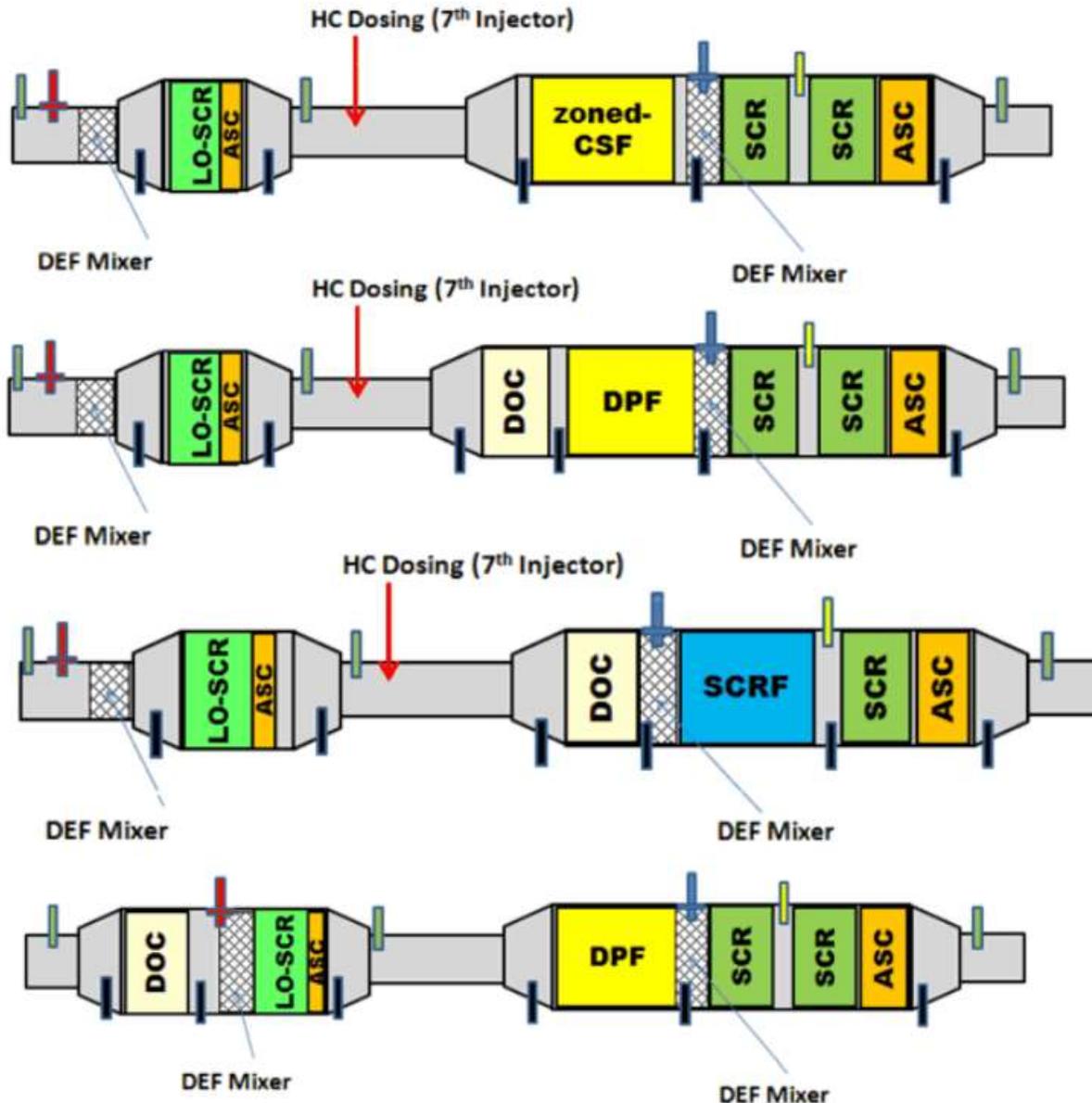
#2 Concetto chiave → efficienza è fortemente dipendente dalla temperatura di soglia (es navi ormeggiate)

#3 Concetto chiave → Efficienza è fortemente dipendente dalla stechiometria = ICE req.

Simulation of the flow field and the chemical reaction coupling of selective catalytic reduction (SCR) system using an orthogonal experiment »

(aftertreatment – Spunti Automotive...)

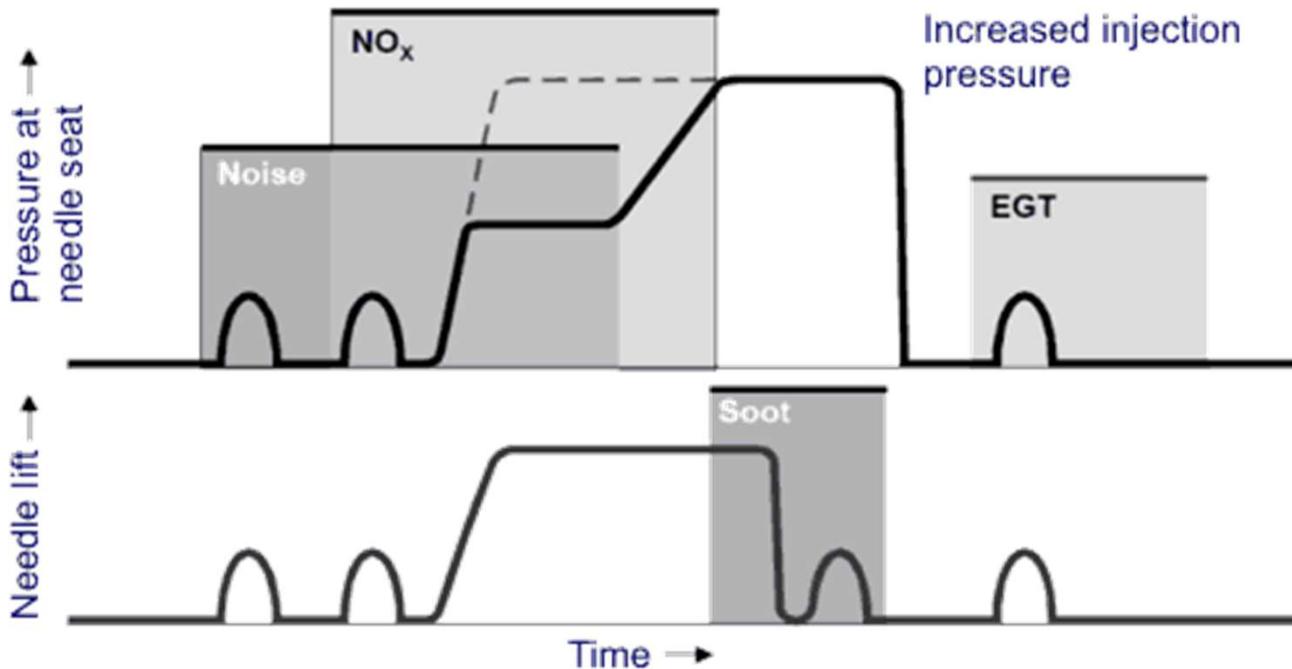
■ = NO_x Sensor ⊕ = DEF Dosing ■ = NH₃ Sensor ■ = Temp Sensor ⊕ = Heated DEF Dosing



Concetto chiave: Il tema è complesso e più configurazioni sono studiate e testate

Concetto chiave: accoppiamento motore + scarico è uno degli aspetti più difficili da progettare e SIMULARE:
-- per la forte dipendenza da carico e temperature.
-- Per la vasta area di competenze coinvolte (motoristica, chimica, costificazione e CALIBRAZIONE)

OSSIDI DI AZOTO – Strategie di iniezione



Concetto chiave: la combustione deve essere rapida ma controllata

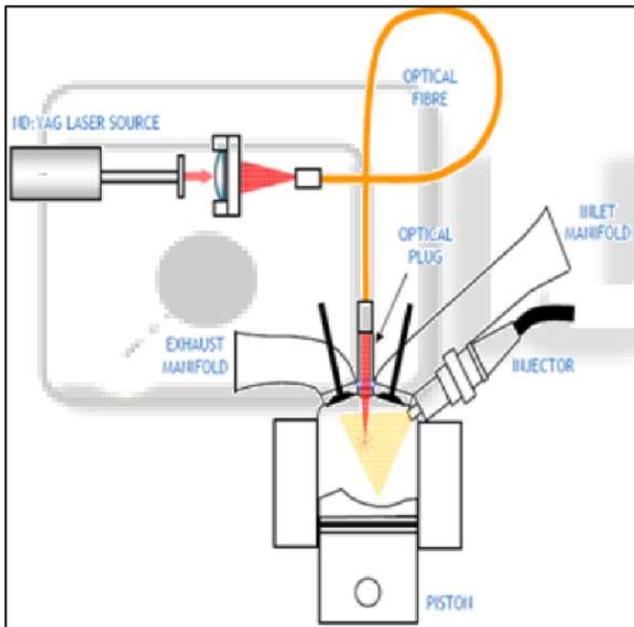
Strategie DRS

(Digital Rate Shaping):

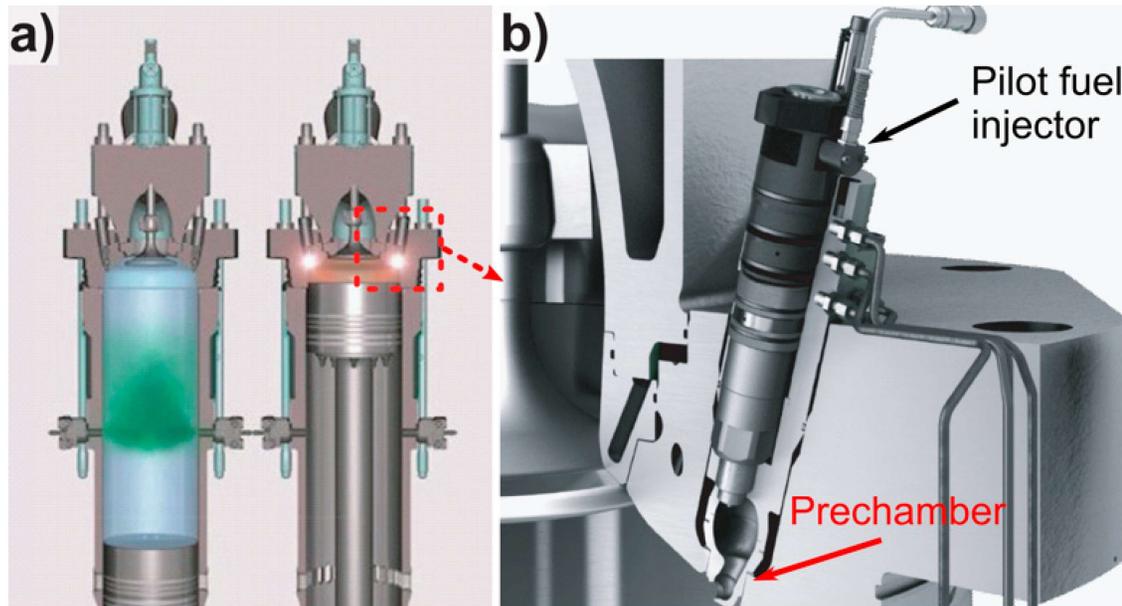
- 3 iniezione pilota per il controllo dell'avvio
- 2 iniezioni principali (main)
- 2 iniezioni «post» per la gestione della fine combustione (temperatura dei gas di scarico per warm-up e completamento delle dinamiche di combustione)



OSSIDI DI AZOTO – accensione comandata



Sostituzione delle candele con sistemi laser, efficaci con miscele molto magre



In alternativa una precamera (anche con diverso combustibile) può essere un modo per avere maggior controllo sul processo di combustione della camera principale

Immagine da «Application of Iron Aluminides in the Combustion Chamber of Large Bore 2-Stroke Marine Engines» 2019

Immagine da «Laser Ignition System for IC Engine - A Review» 2017

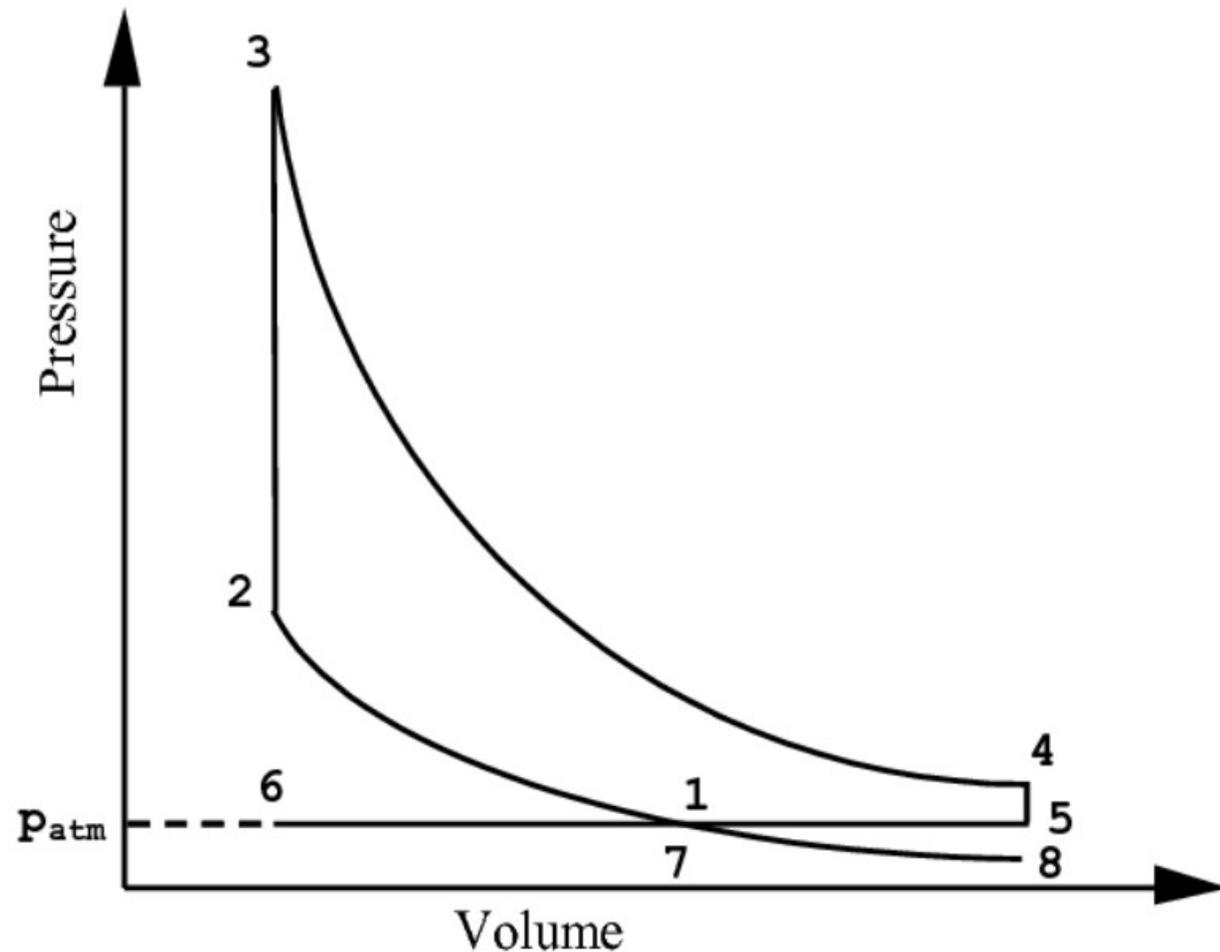
OSSIDI DI AZOTO – Fasatura / Miller

Baseline: nel motore abbiamo chiusura della valvola di aspirazione in concomitanza con PMI. (Appena dopo PMI, quando tutta la carica è nel cilindro).

Miller: la corsa di compressione viene artificialmente ridotta.

Ottengo questo in 2 modi:

- O chiudendo la valvola di aspirazione molto in anticipo (espansione in aspirazione). 6-7-8-1-2
- O chiudendo la valvola di aspirazione molto in ritardo («rifiuto della carica»). 6-7-5-1



OSSIDI DI AZOTO – NO_x e Combustibili Alternativi

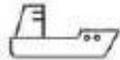
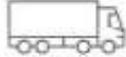
Fuel	Octane number
Hydrogen	>130
Methane	125
Ethane	108
Propane	105
Octane	100
Gasoline	95-100
Diesel	30

Concetto chiave: combustibili come metano e Idrogeno nei MCI (ICE) hanno elevato potere antidetonante (= maggiori rdc, sovralimentazione, rapidità di combustione, etc).

WARNING! Questi approcci inducono tutti ad una maggior generazione di NO_x.

OSSIDI DI AZOTO – NOx e H2

Previsioni di layout e tecnologie per motori impieganti Idrogeno

Base engine	Vehicle class	Engine size	Combustion concept	Aftertreatment	Boosting/Air control	Electrification	Advantages
Diesel		MS Engine Bore ~ 250mm	High pressure DI CI Low pressure PFI MP FL: Ultra Lean PL: Ultra Lean	None	1 or 2 stage	None	Durability Efficiency Range Cost Packaging
		HS Engine Bore ~ 180mm	Low/Mid pressure DI SI Low pressure PFI SI FL: Lean PL: Ultra Lean	SCR Particle Filter	Wastegate/ VTG	48 V	
		HD Engine Size ~13l	Mid pressure DI SI FL: stoichiometric + EGR PL: Ultra Lean	TWC (+ LNT) Particle Filter	Throttle valve / Valve timing	Mild Hybrid	
		MD Engine Size ~8l	Low pressure PFI/DI SI FL: stoichiometric (+EGR) PL: stoichiometric	TWC Particle Filter	NA / turbo charged	Serial Hybrid	
Gasoline		LCV Engine Size ~2-3l					
		PC Engine Size ~2l					
		REX Engine Size ~1l					

Concetto Chiave: gli ossidi di azoto sono il principale ostacolo in termini di emission.

Nox massimi a lambda = 1.3

Nox molto ridotti per combustioni ultra lean >> 2.2

OSSIDI DI AZOTO – Acronimi

In ordine di apparizione

MS, HS → medium speed, high speed engine

HD MD → heavy duty, medium duty

LCV → Light commercial vehicle

Rex → range extender

DI → direct injection

CI → compression ignition (Diesel cycle)

PFI → port fuel injection

FL → full load

PL → partial loads

MP → micro prechamber

SI → spark ignition

TWC → three way catalyst

VTG → variable turbine geometry

NA → naturally aspirated

Grazie dell'attenzione

Contatti:

Pierpaolo Sandrin

Pierpaolo.sandrin@areasciencepark.it