

Corso di Macchine



Formazione e trattamento degli inquinanti: NOx

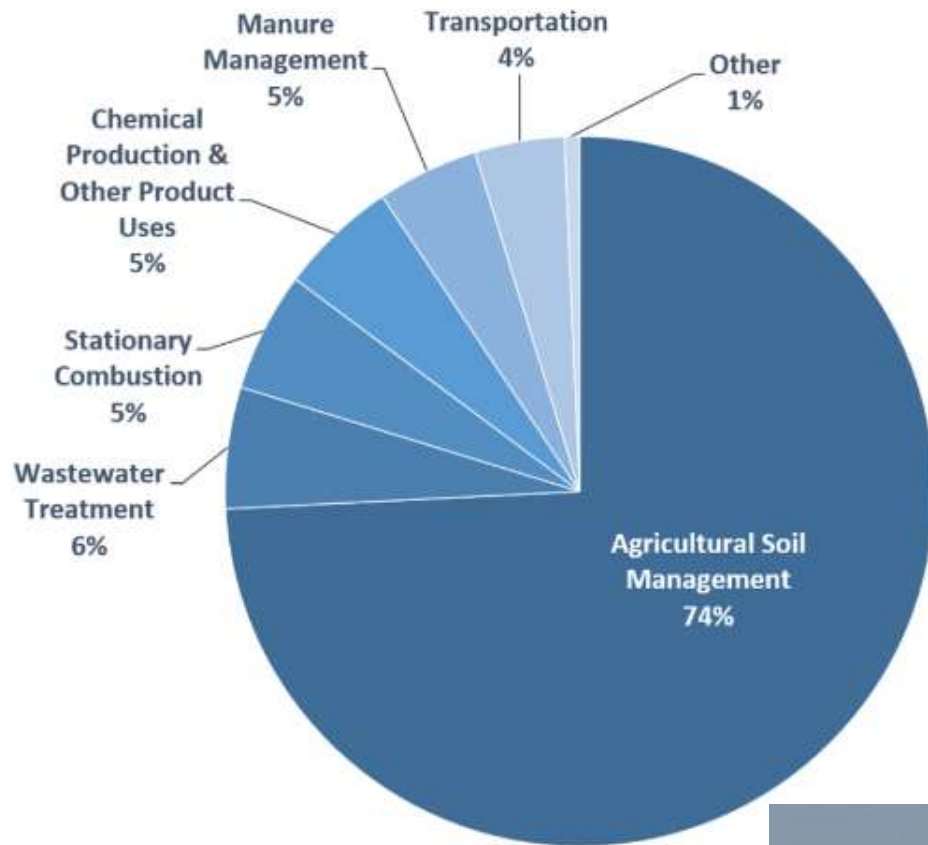
Prof. Rodolfo Taccani

Ing. Pierpaolo Sandrin

AA 2023-2024

OSSIDI DI AZOTO -- Intro

2020 U.S. Nitrous Oxide Emissions, By Source



Sono un inquinante dato dal legame diretto di N_2 e O_2 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

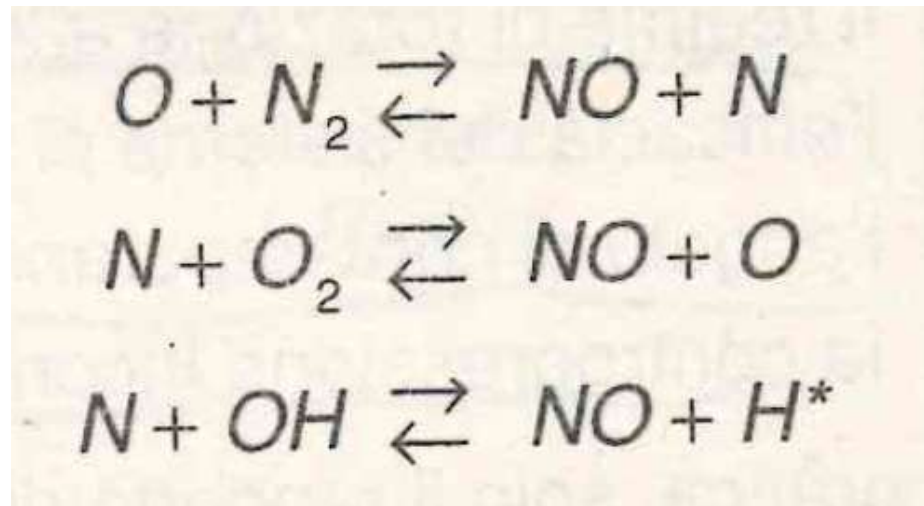
- Alterazione tissutale e **cellulare** delle vie respiratorie.
- Combinandosi con acqua → formazione di acido nitrico (**piogge acide**)
$$\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HNO}_2$$
- Smog fotochimico. Energizzati da UV producono O₃ (Ozono) a basse quote. Estremamente 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

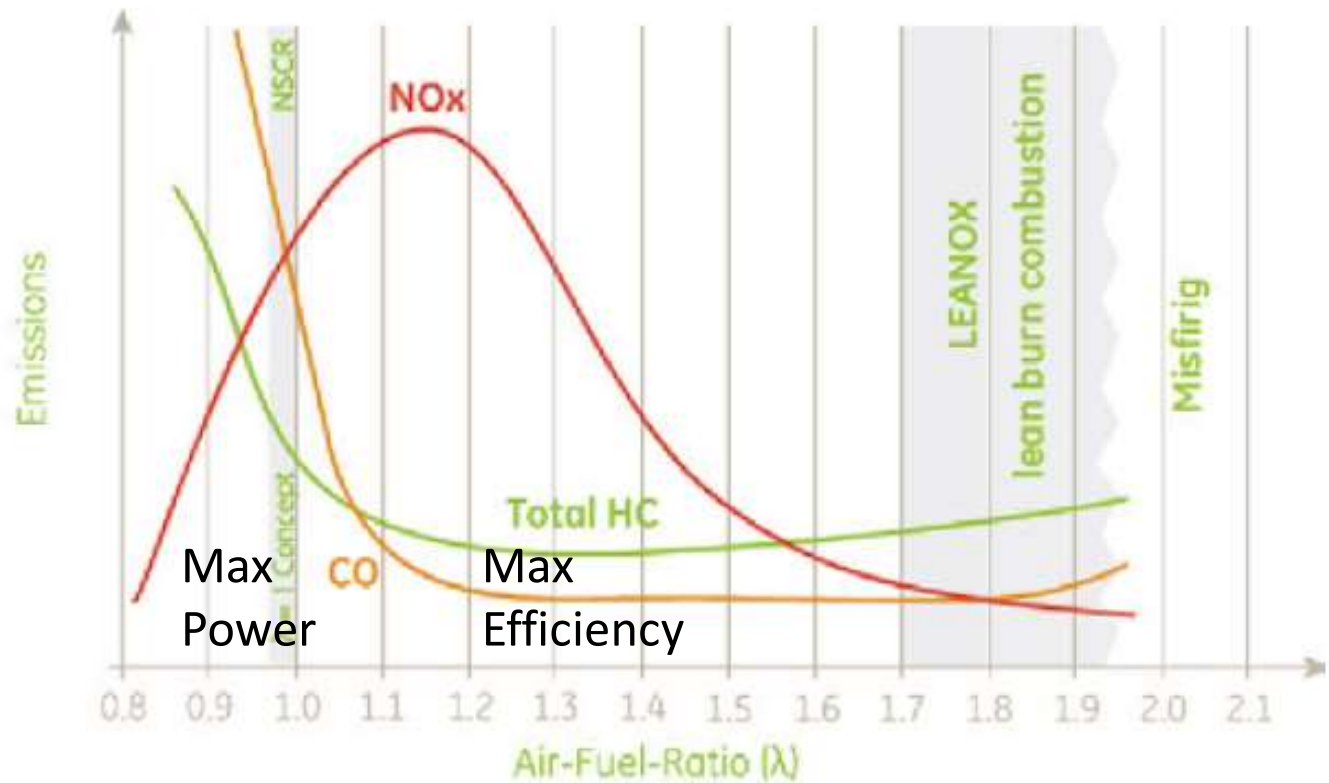
Concetto Chiave NB: si noti come siano le temperature la condizione necessaria e sufficiente per cui N₂ e O₂ si leghino (e non la combustione in sé o la presenza di combustibile).

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

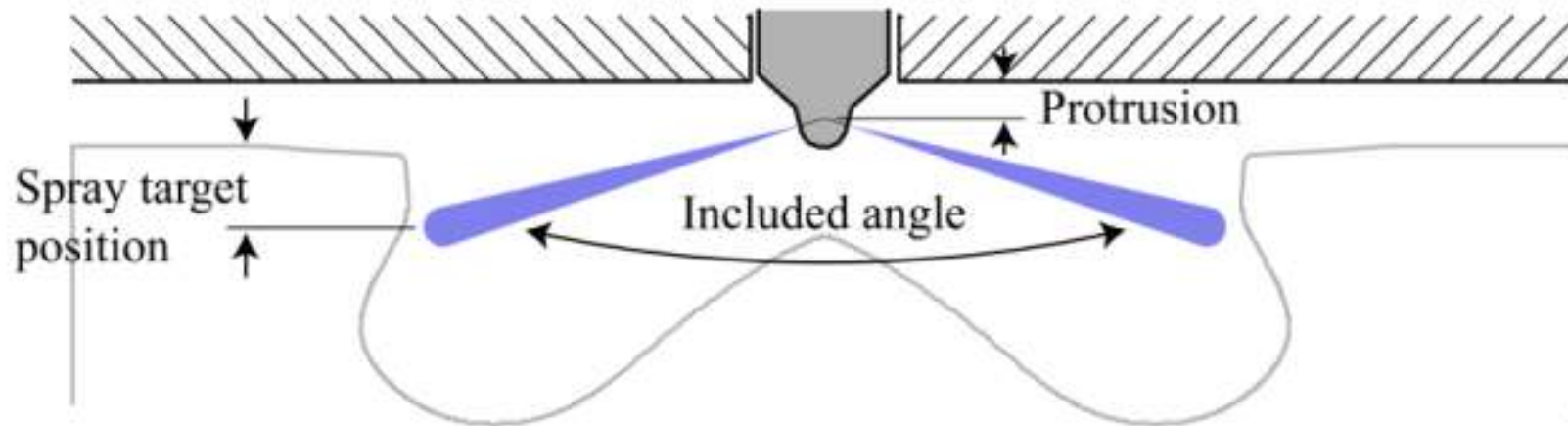
→ Sono obiettivi antitetici nella progettazione di motori

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**

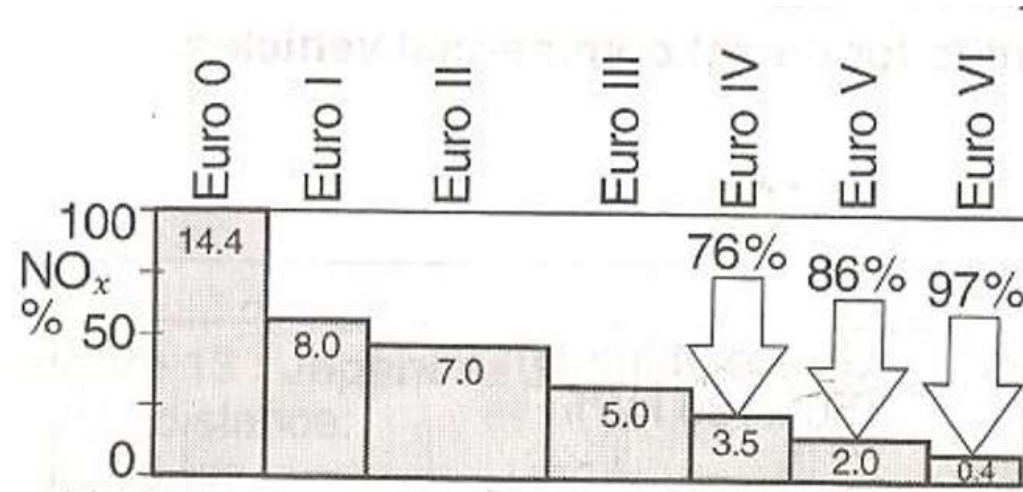
L'elevato rilascio di calore in quelle interfacce e l'elevata aria a disposizione producono quantità elevate di NO_x.

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)

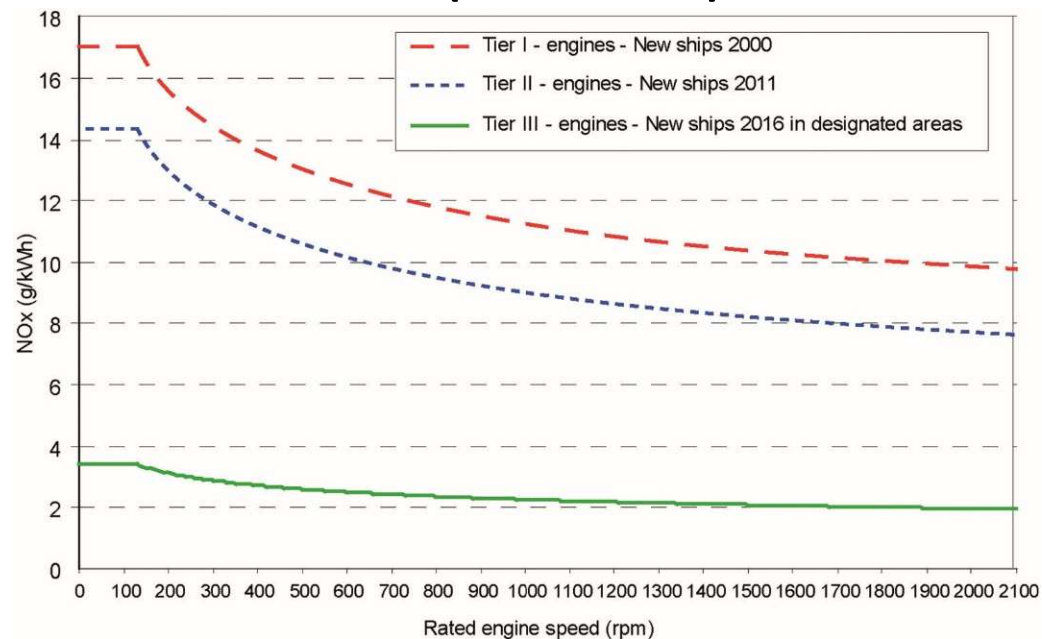
~ 0.5 g/KWh



«Bosch Automotive Handbook 9° edition»

Marine (IMO Tier III)

~ 2 g/KWh



«Wartsila.com»

OSSIDI DI AZOTO – Test Cycles

Automotive – ETC (European test cycles)

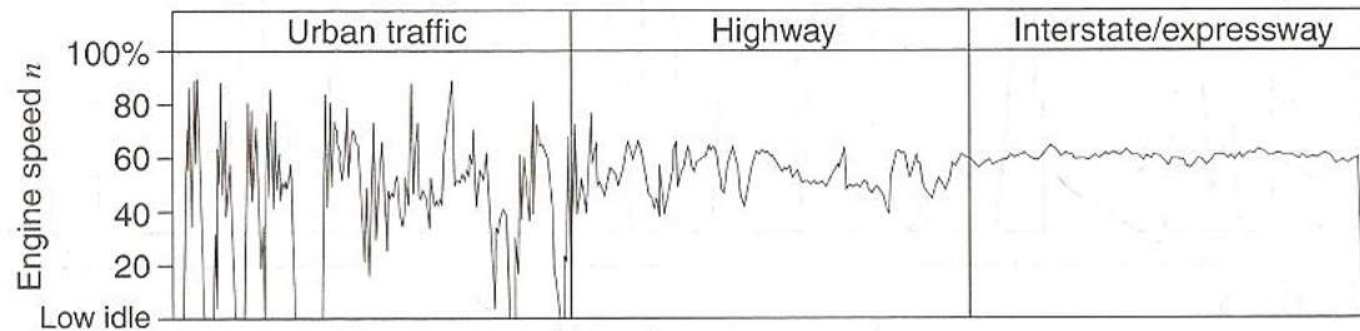


Immagine da «Bosch Automotive Handbook 9° edition»

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:

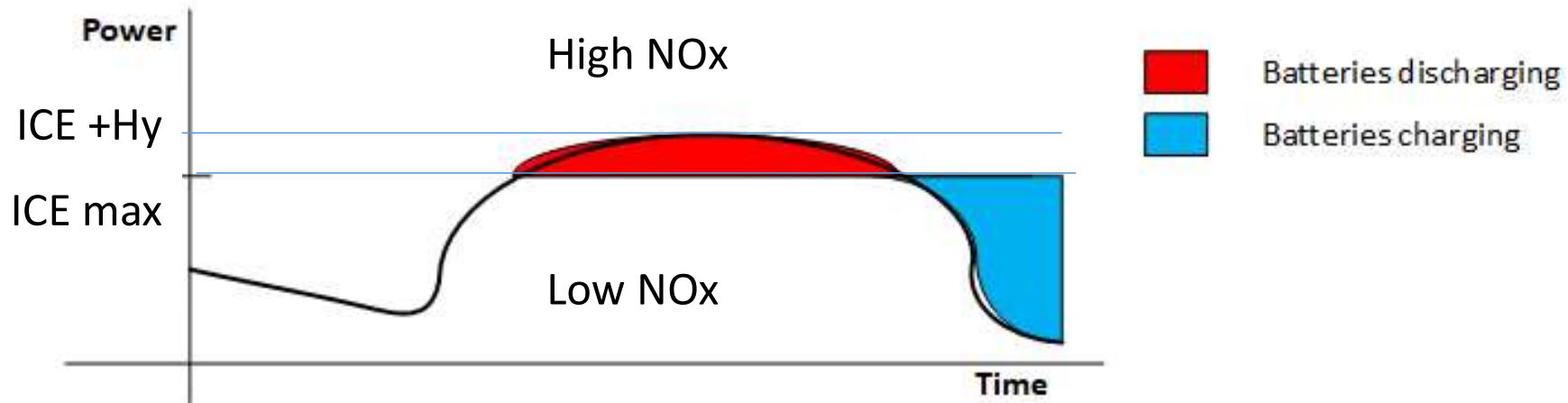
- Iniezione (DRS)
- Pistoni
(moto carica)
- camme
- attriti

Software (calibrazione):

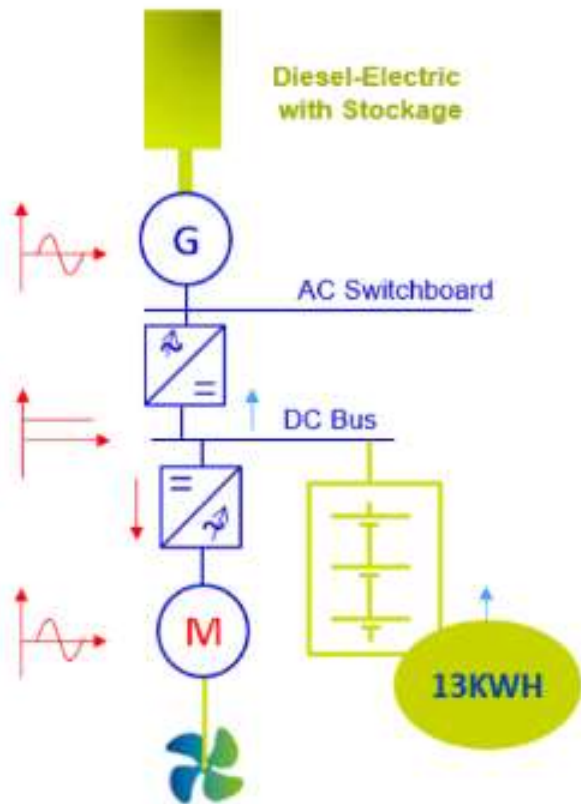
- Carico motore
- Iniezione / accensione
- % EGR
- Pressione di sovralimentazione
- Temperatura ammissione

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)

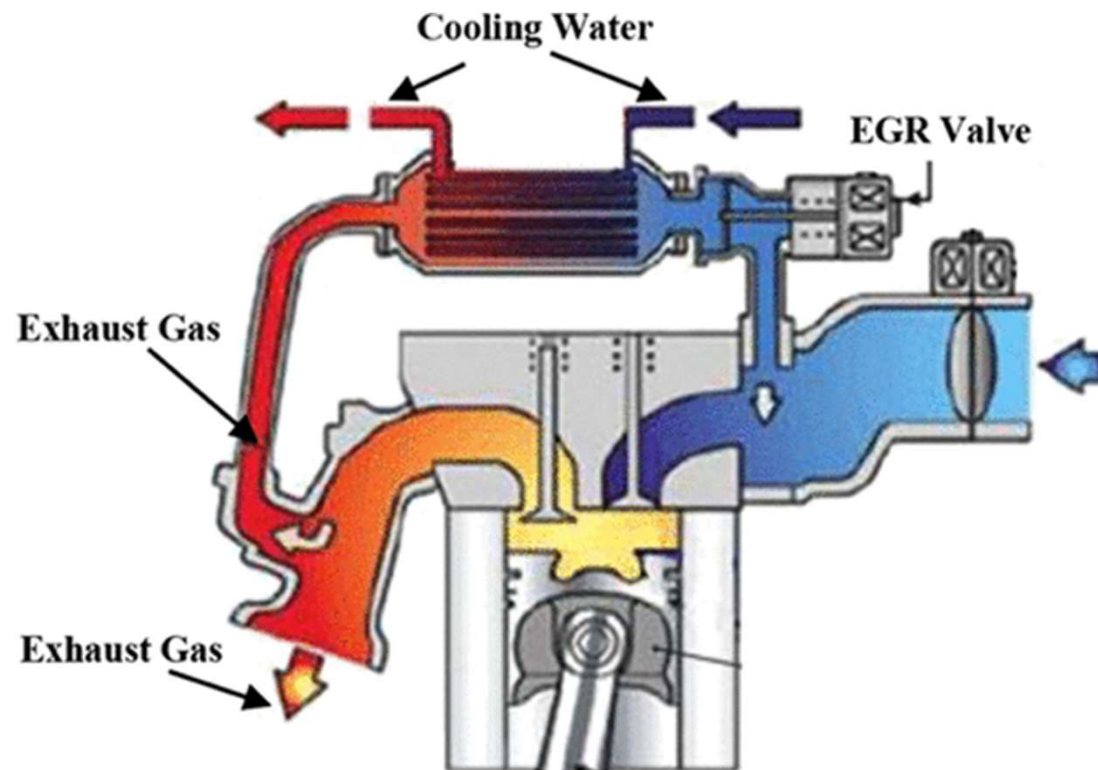
- + Ottimizzazione del motore poiché avrà aree di lavoro più ristrette (DOWNSIZING)

Immagine da «<https://swzmaritime.nl>» e Barillec Marine

OSSIDI DI AZOTO – EGR introduzione

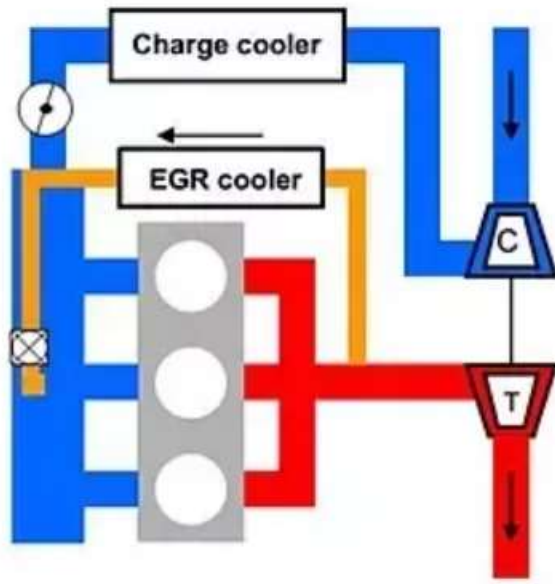
Concetto chiave: i gas di scarico (alta %CO₂ - inerte) in parte ricircolati in camera di combustione, smorzano i picchi di temperatura durante la combustione.

«Smorzatore termodinamico»



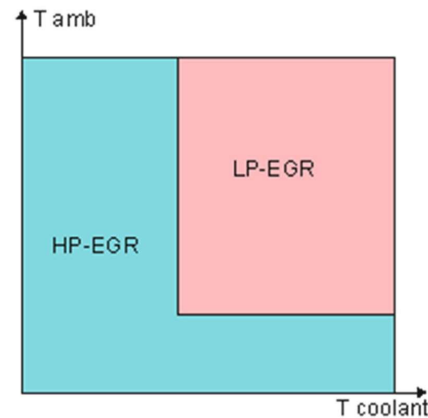
OSSIDI DI AZOTO – Tipi EGR

EGR HP (high pressure)

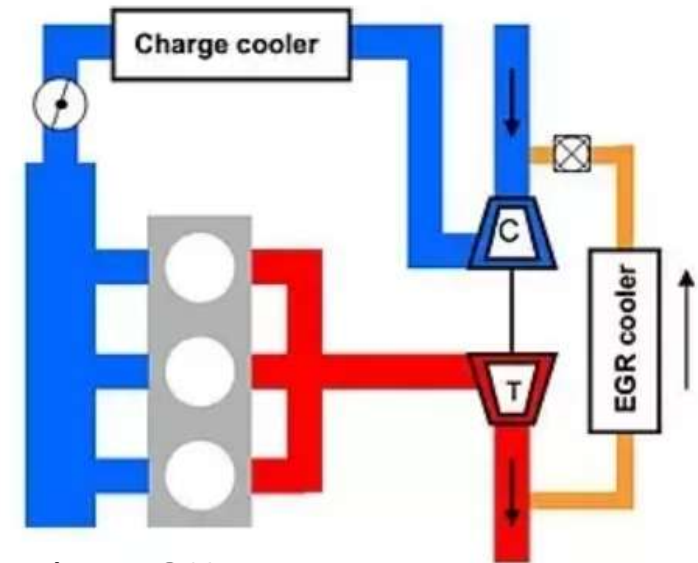


Automotive OK
Marine OK (MAN 2S)

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



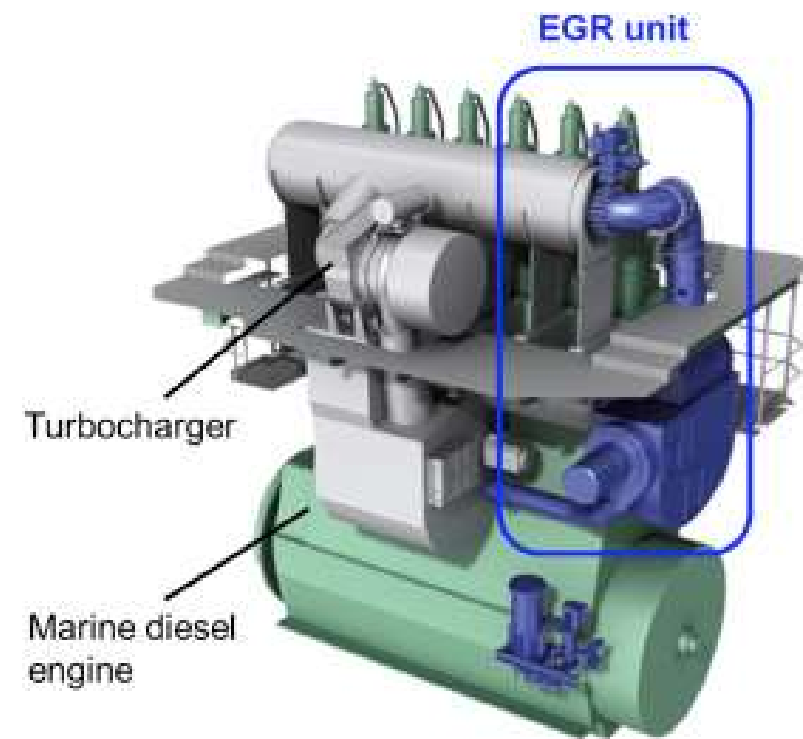
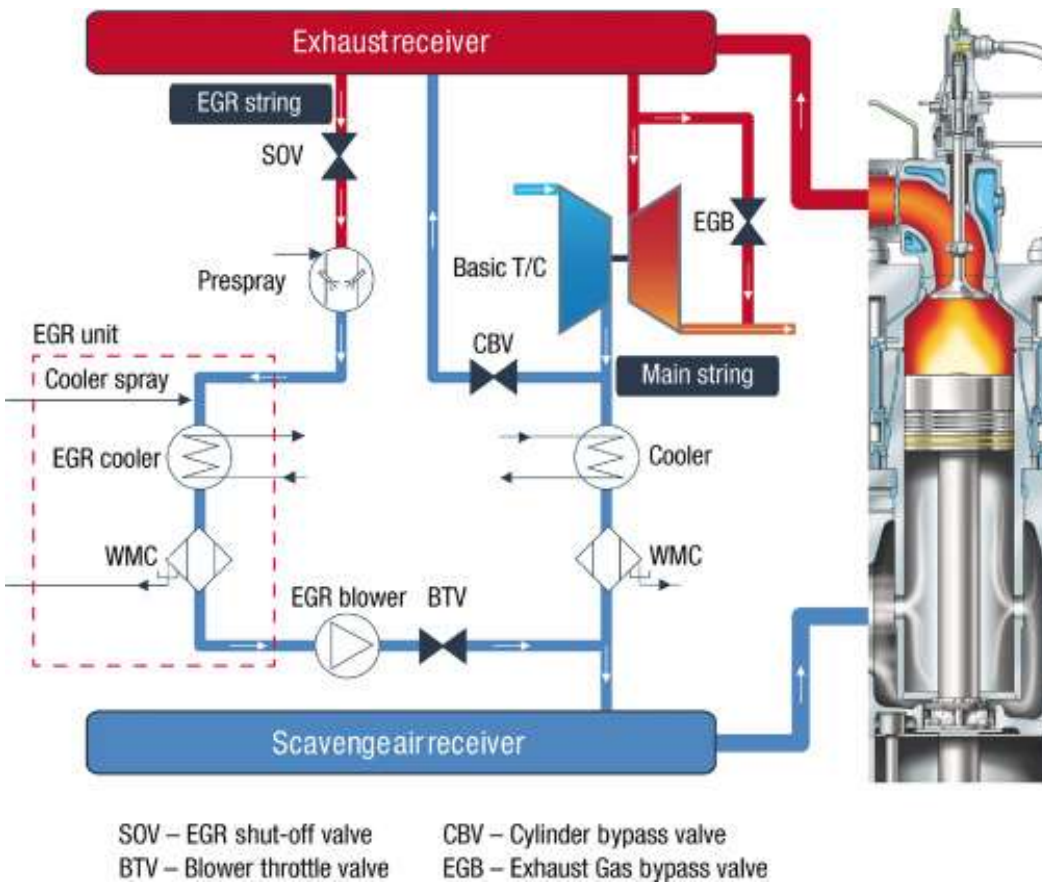
EGR LP low pressure



Automotive ~OK
Marine: problematico? (Mitsubishi)

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

OSSIDI DI AZOTO – HP EGR



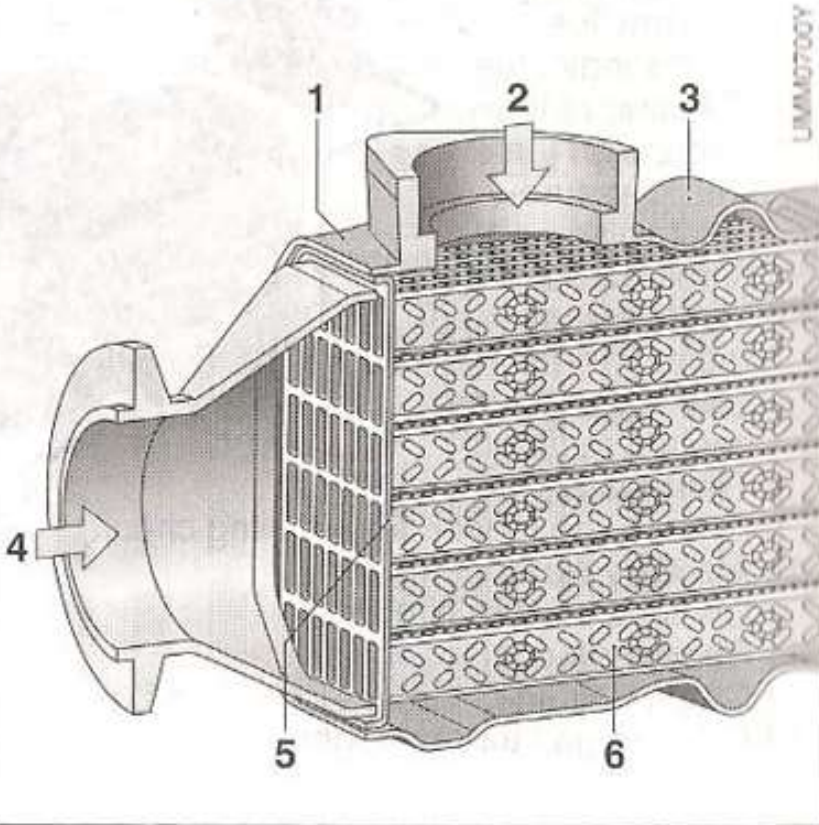
High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a Euro 6 diesel engine with lean-NOx trap: Effectiveness to reduce NOx emissions

[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

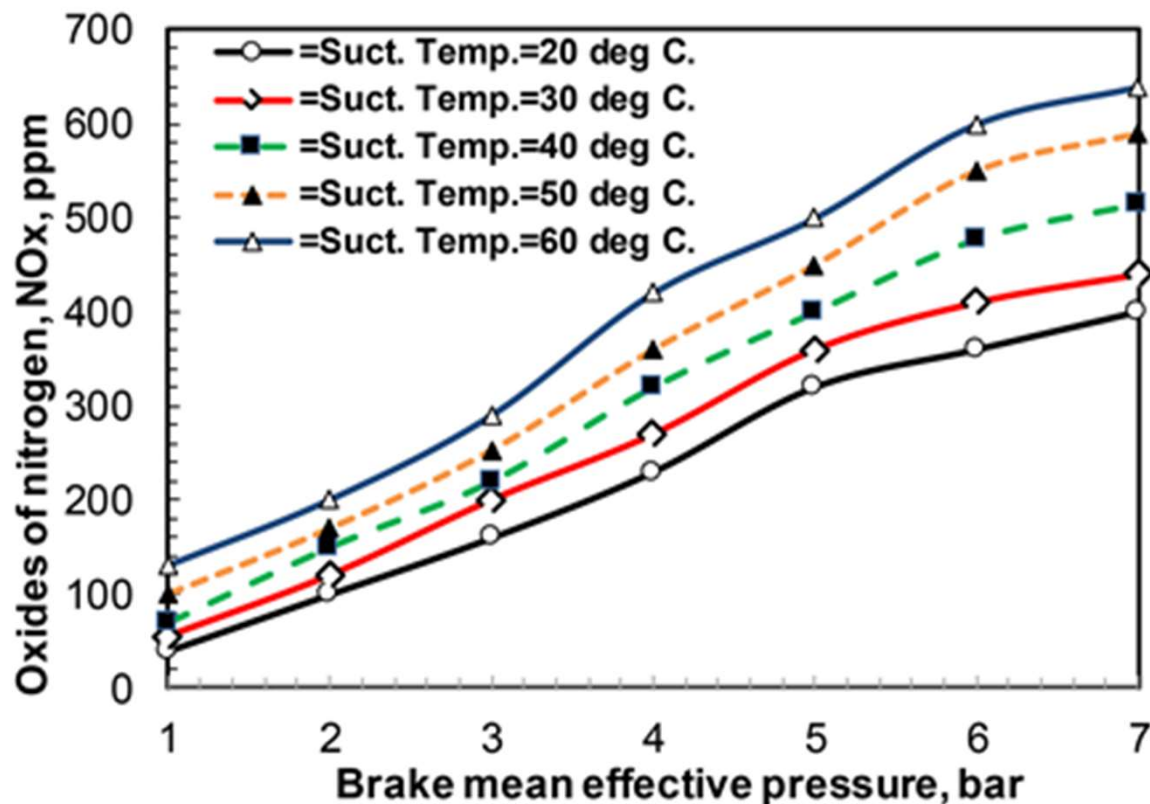
$T_{\text{gas_IN}}$

$T_{\text{Gas_OUT}}$

$T_{\text{cool_IN}}$

$T_{\text{cool_OUT}}$

OSSIDI DI AZOTO – TEMPERATURA ASPIRAZIONE



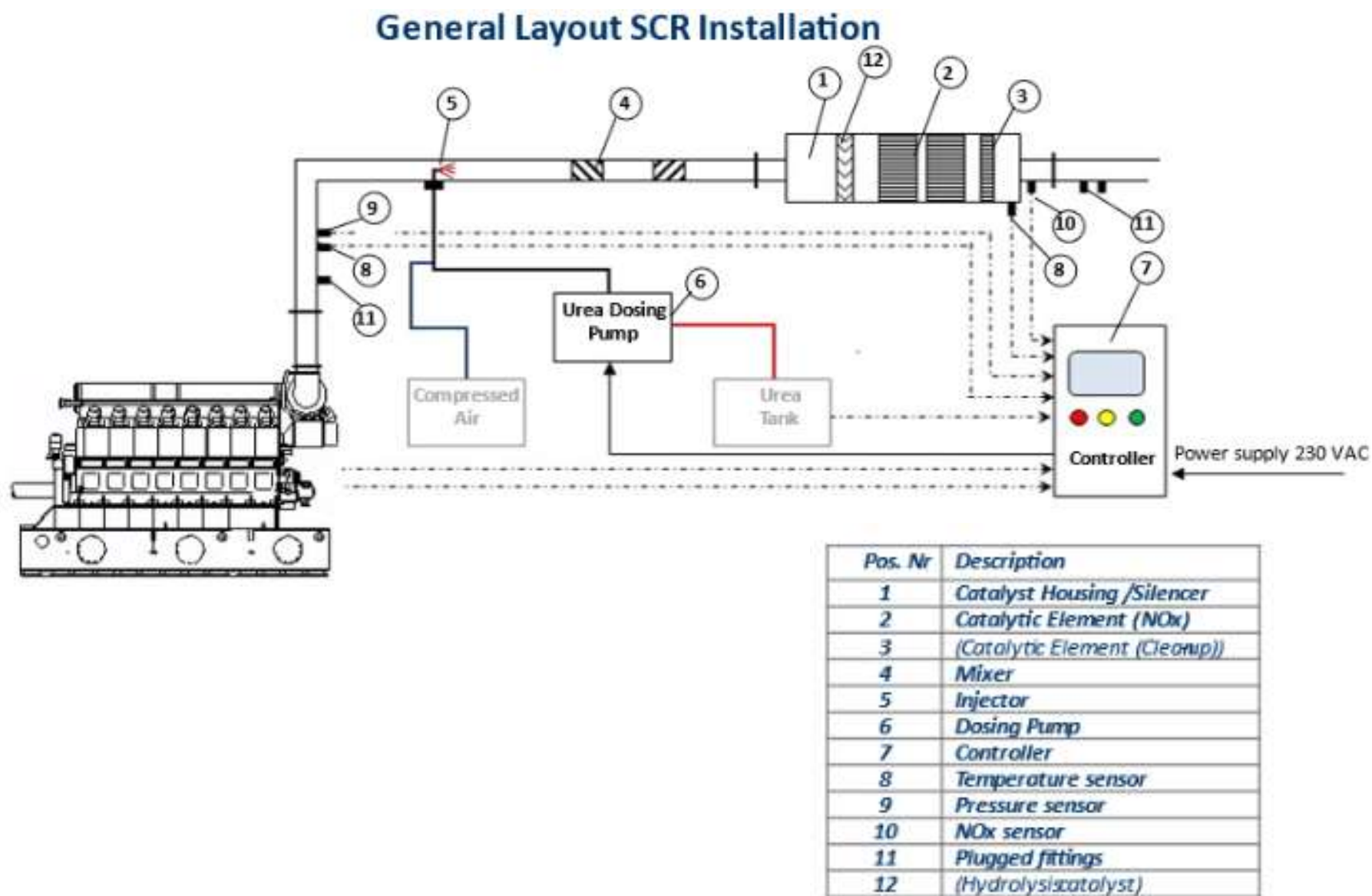
Una bassa $T_{\text{aspirazione}}$ consente:

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

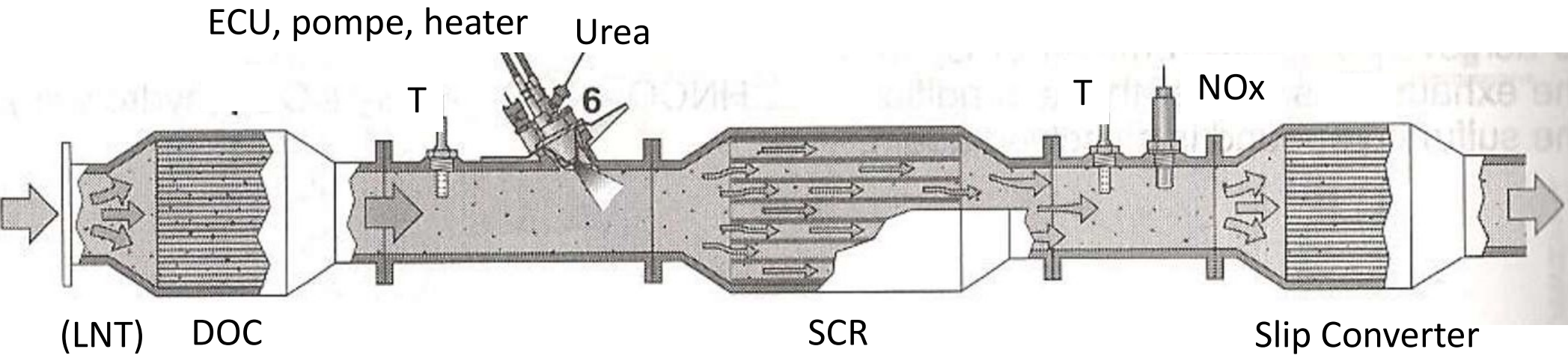
→ Per questa ragione EGR hanno scambiatori di calore

→ Per questo è giustificato lo sforzo a sfruttare LP EGR

OSSIDI di AZOTO – Sistema di scarico



OSSIDI DI AZOTO – Sistema di scarico

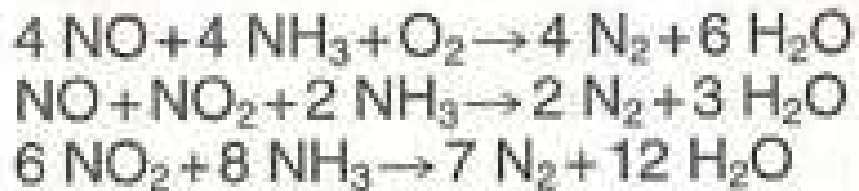


Automotive:

LNT/NSC → Lean Nox Trap / Nox storage catalyst

DOC → Diesel Oxidation Catalyst

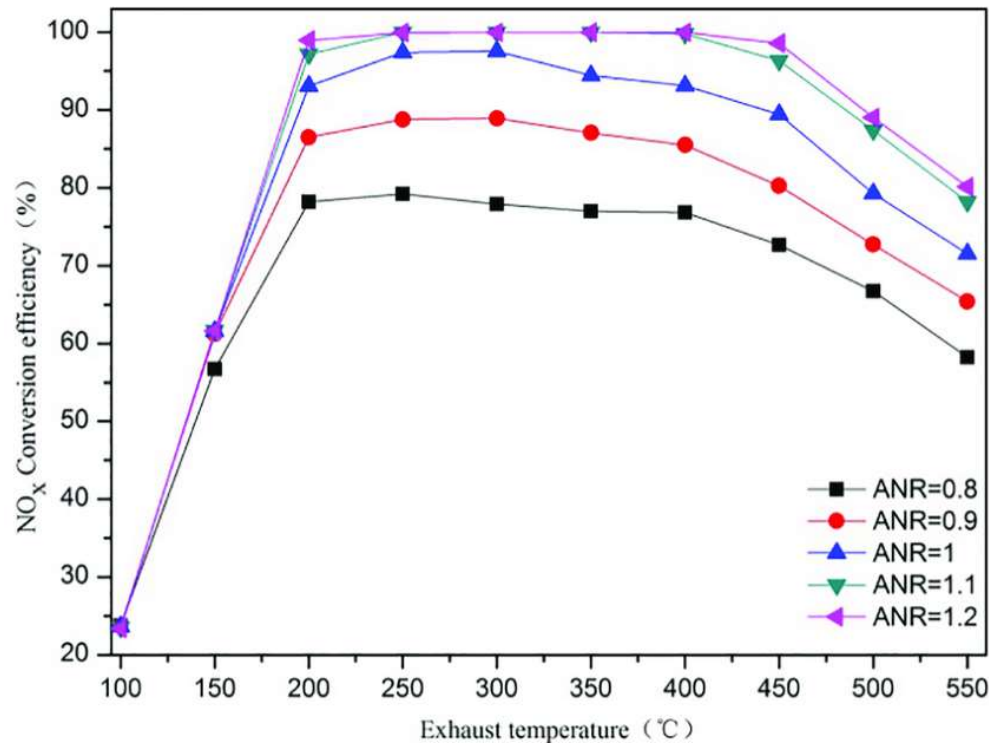
SCR → Selective Catalyst reduction



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)

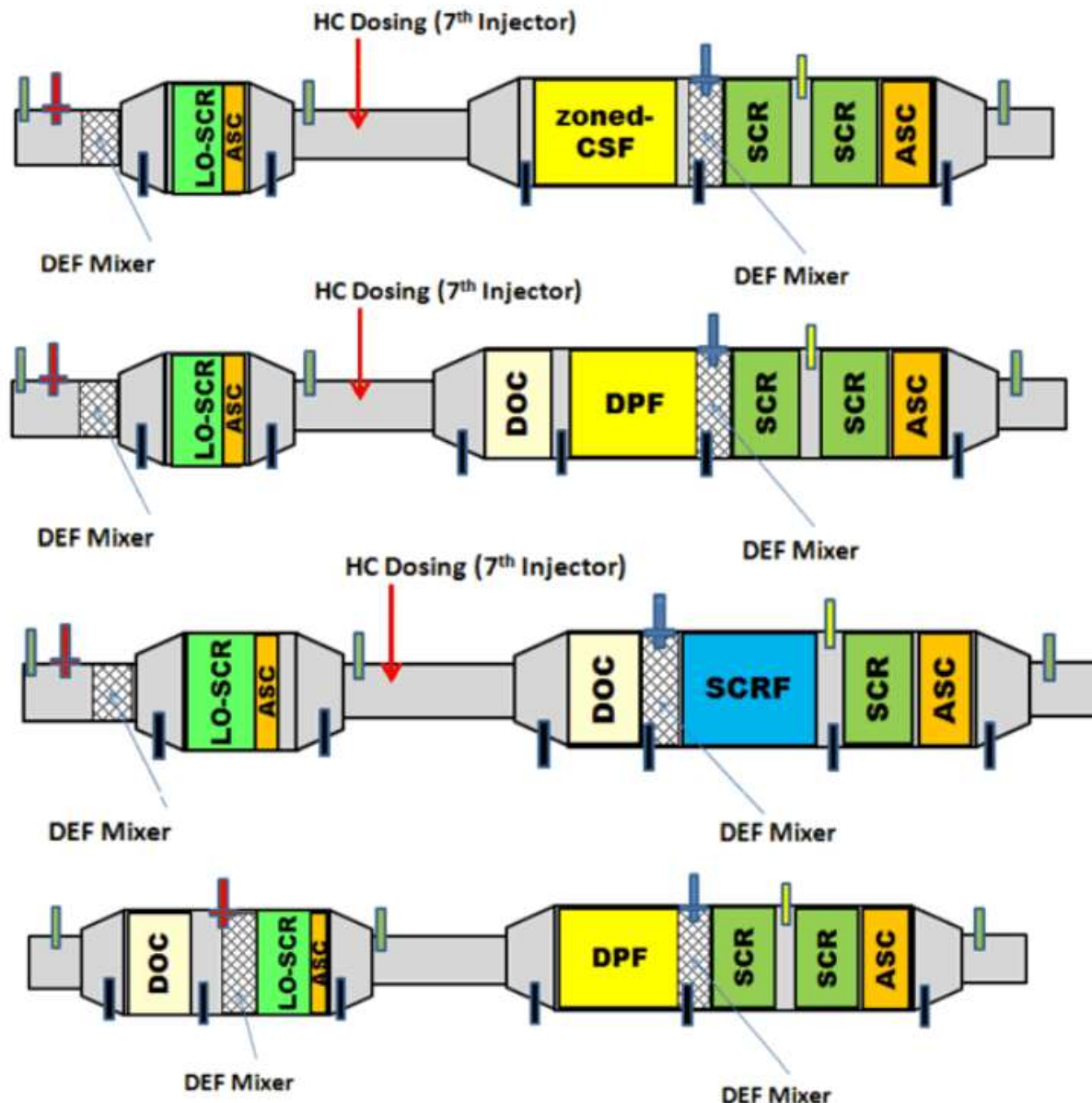
#2 Concetto chiave → efficienza è fortemente dipendente dalla temperatura di soglia (es navi ormeggiate)

#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...)

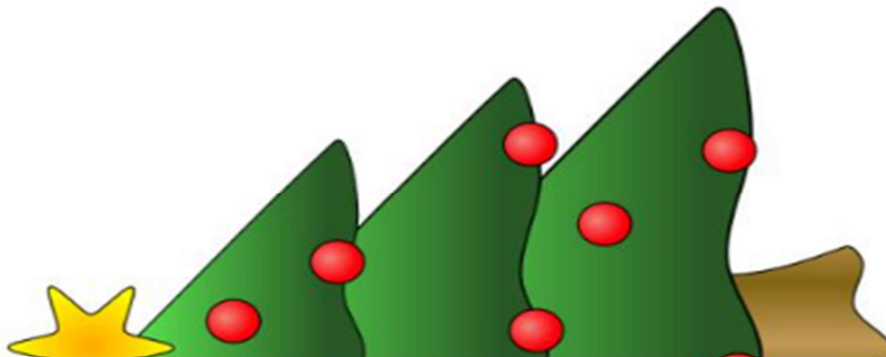
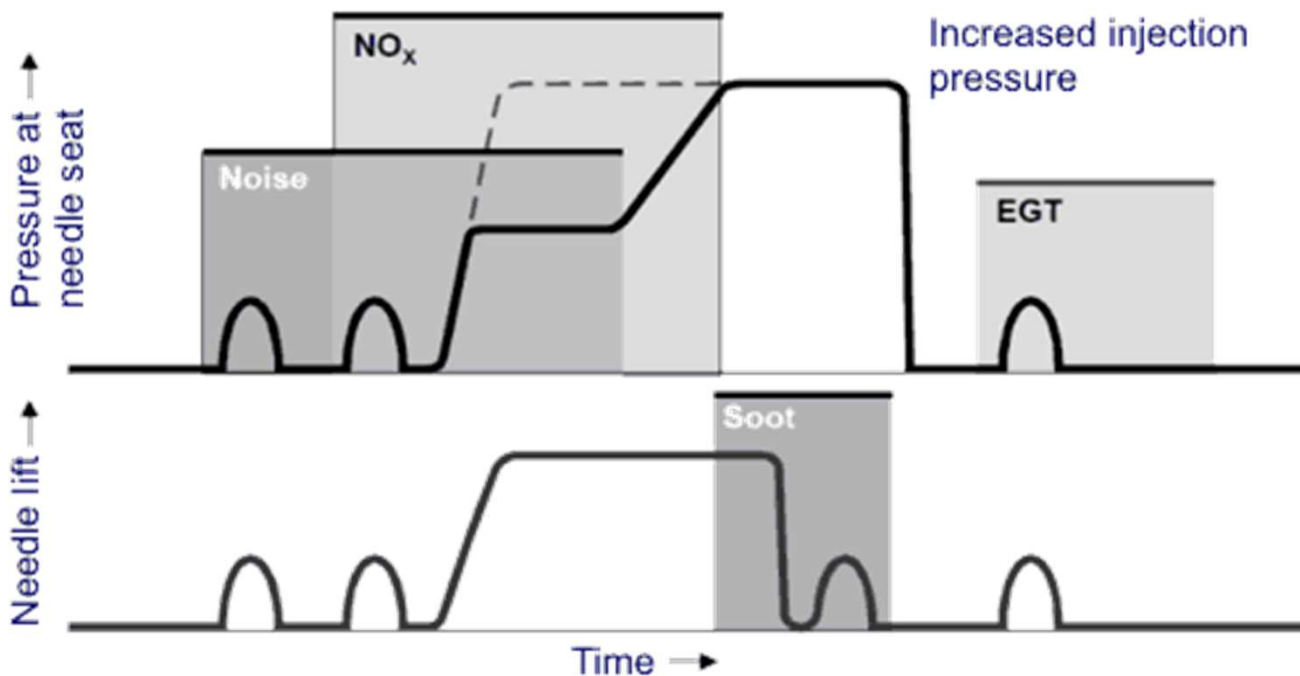
■ = NO_x Sensor + = DEF Dosing ■ = NH₃ Sensor ■ = Temp Sensor + = Heated DEF Dosing



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



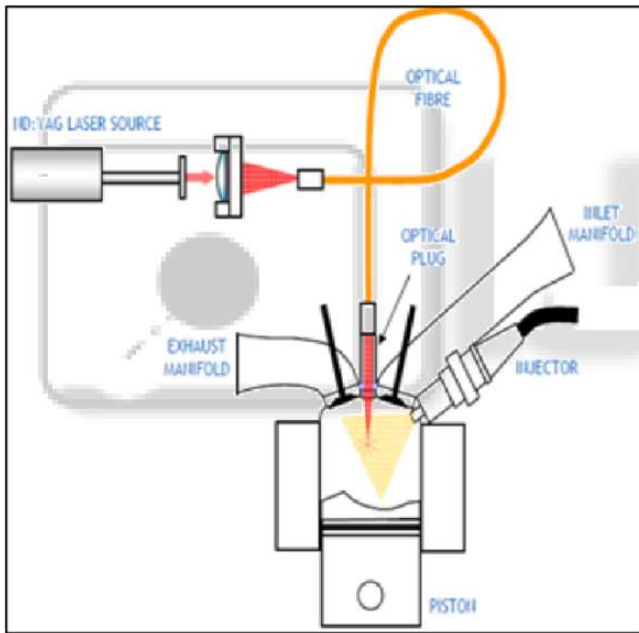
Concetto chiave: la combustione deve essere rapida ma controllata

Strategie DRS

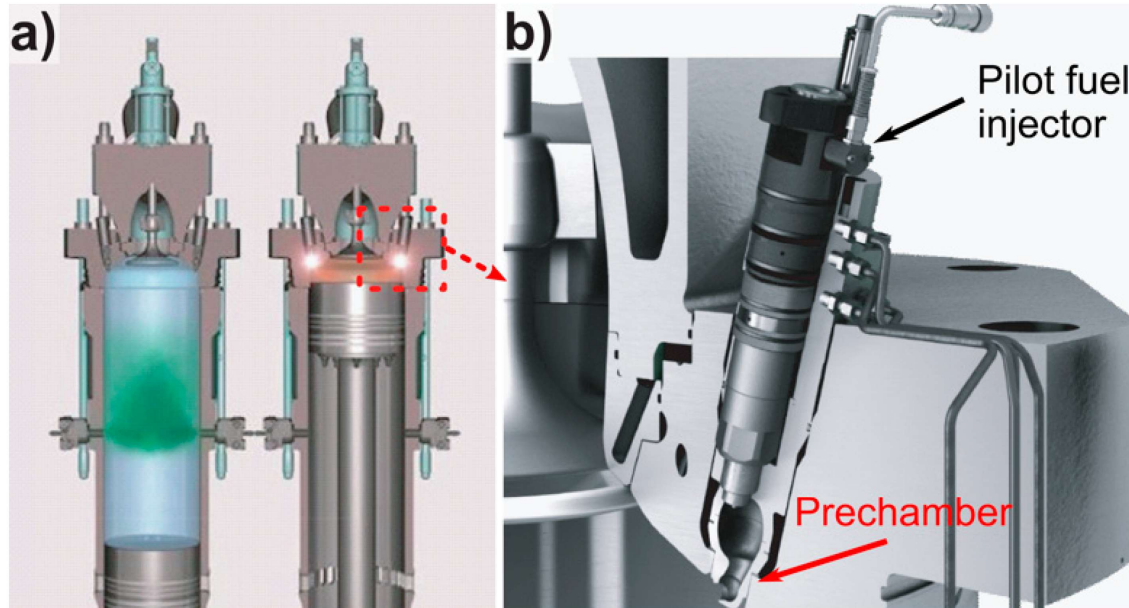
(Digital Rate Shaping):

- 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

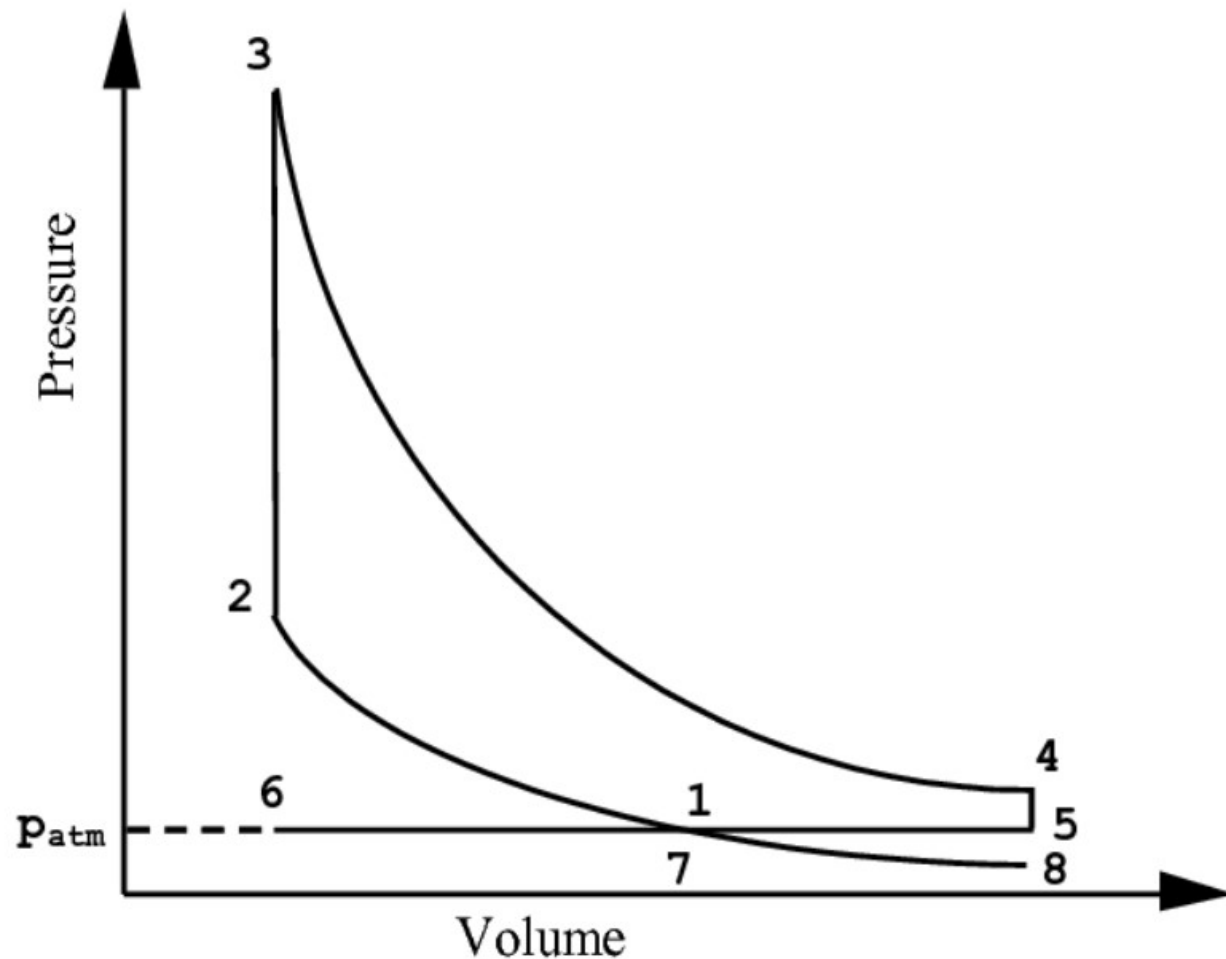
Baseline: nel motore abbiamo chiusura della valvola di aspirazione in concomitanza con PMI. (Appena dopo PMI, quando tutta la carica è nel cilindro).

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

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

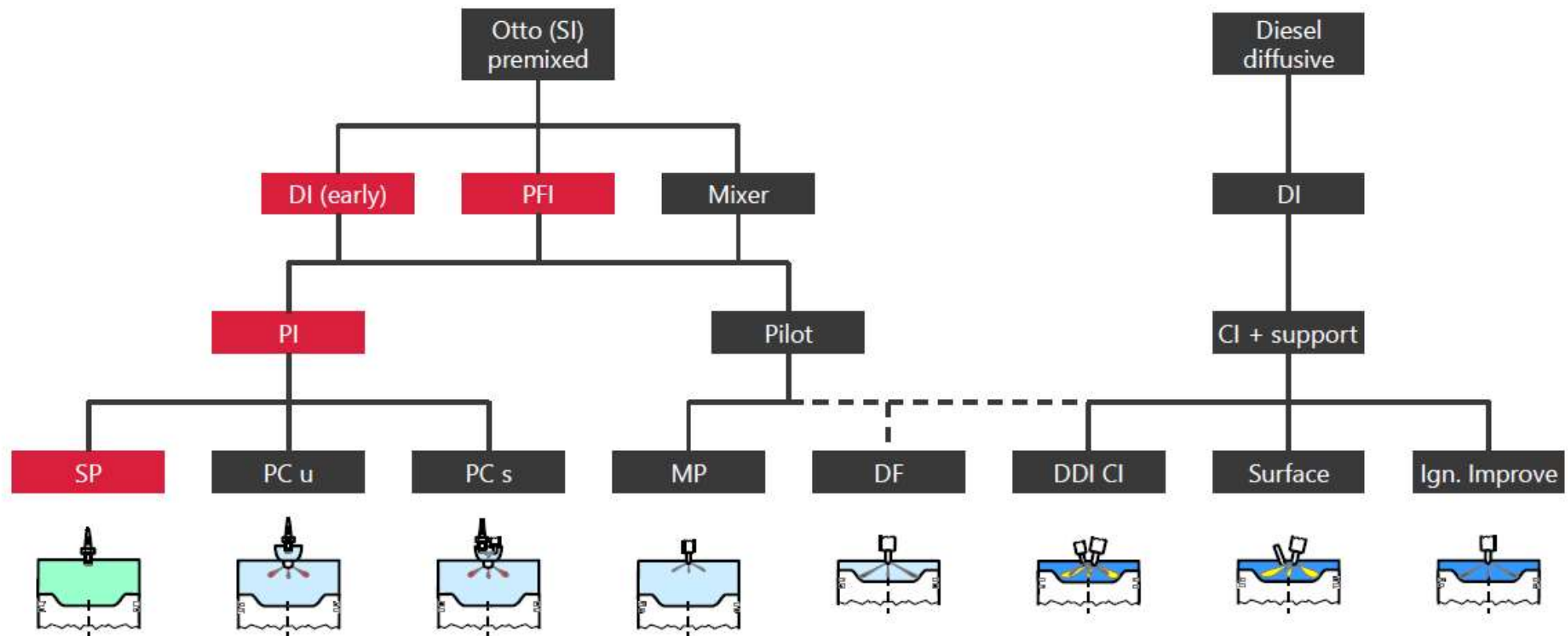
Concetto chiave: combustibili come metano e Idrogeno nei MCI (ICE) hanno elevato potere antidetonante (= maggiori rdc, sovralimentazione, rapidità di combustione, etc).

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

OSSIDI DI AZOTO – NO_x e H₂

layout combustione

ASSESSMENT OF POTENTIAL COMBUSTION SYSTEMS – OVERVIEW



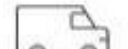
DI: Direct Injection; PFI: Port Fuel Injection; CI: Compression Ignition; PI: Positive Ignition; DDI CI: Dual Direct Injection Compression Ignition; Ign.: Ignition; DF: Dual Fuel; MP: Micro Pilot; SP: Spark Plug; PC u: Pre Chamber unscavenged; PC s: Pre Chamber scavenged
Source: VKA, FEV

8

Concetto Chiave: integrazione del motore Otto e Diesel (ciclo Sabathe). I diversi layout Sono soprattutto funzione delle dimensioni motore

OSSIDI DI AZOTO – NO_x 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
		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					Cost Packaging
		PC Engine Size ~2l					
		REX Engine Size ~1l					

Concetto Chiave: iniezione diretta possibile per trarre vantaggio da sistemi di stoccaggio già ad alta pressione (>200bar)

OSSIDI DI AZOTO – NO_x e H₂

specifiche combustione

H₂ INJECTION SYSTEMS FOR HD ENGINES, SINGLE STAGE TURBO CHARGING (**13L CLASS**)

	External mixture preparation	Space requirement cylinder head		
	Low pressure PFI	Low pressure DI	Mid pressure DI	High pressure DI
Fuel Injection	Port fuel injection ~ 5-10 bar	Direct injection ~ 15-30 bar	Direct injection ~ 40-60 bar	Direct injection ~ 300 bar
Specific Power (HD) engine	< 25 kW/l	> 25 kW/l	> 25 kW/l	~ 30 kW/l
Peak BMEP (HD) engine	< 20 bar	> 20 bar	> 20 bar	> 25 bar
Combustion	 Stoich/Lean Spark ignited	 Lean Spark ignited	 Lean Spark ignited	 Lean Spark ignited -- Diffusive
Knock tendency	↓	0	0	↑(SI) -- Not existing (Dif. ¹⁾)
Boost pressure demand	↑↑	0	0	0
Transient load response	↓↓	0	0	↑
Main benefit	- Easy to integrate, - Hardware available - Low failure risk	- Robust against back-fire - Power density - Transient response	- Same as LP DI - Smaller packaging compared to low pressure - Potentially better mixture preparation	- Same as MP DI - Diffusive combustion possible
Main challenges	- Boosting - Safety (Backfire)	- Integration DI Injector - Uniform mixture preparation	- Integration DI Injector - Range	- Integration DI Injector - High pressure generation - For Diffusive combustion high NO_x raw emissions

Concetto Chiave: miscele magre e boost consentono riduzione del Knock (detonazione).
Richiesta sovradimensionamento sistema sovralimentazione

OSSIDI DI AZOTO – NO_x e H₂

Idrogeno nei MCI in sintesi

When compared with other zero emission powertrains, H₂-ICE offers many advantages you can make use of in shorter term

ADVANTAGES

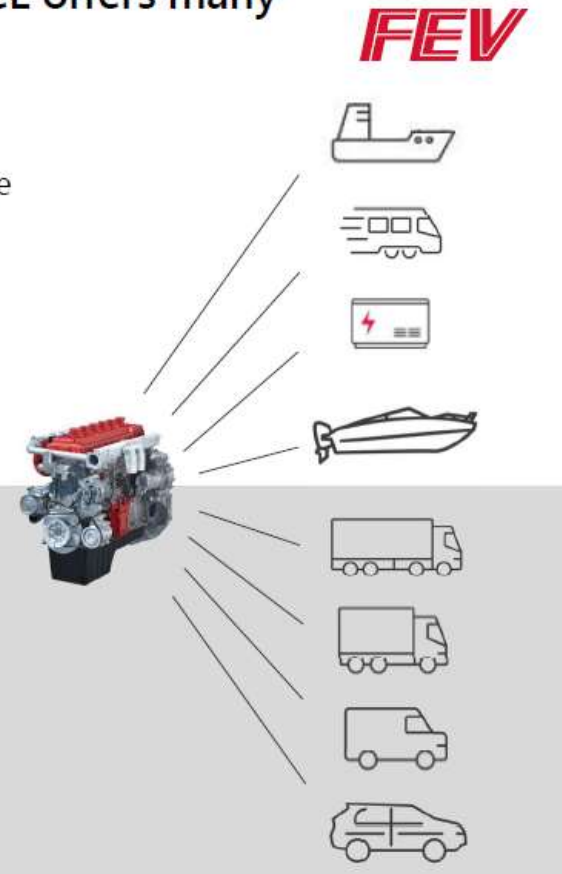


-  High energy storage density, compared to BEV
-  Lower development and production effort, hence quicker introduction to the market
-  Fast refueling, compared to BEV
-  Proven powertrain durability
-  Less stringent requirement to hydrogen purity
-  Good efficiency in high load operations

DRAWBACKS



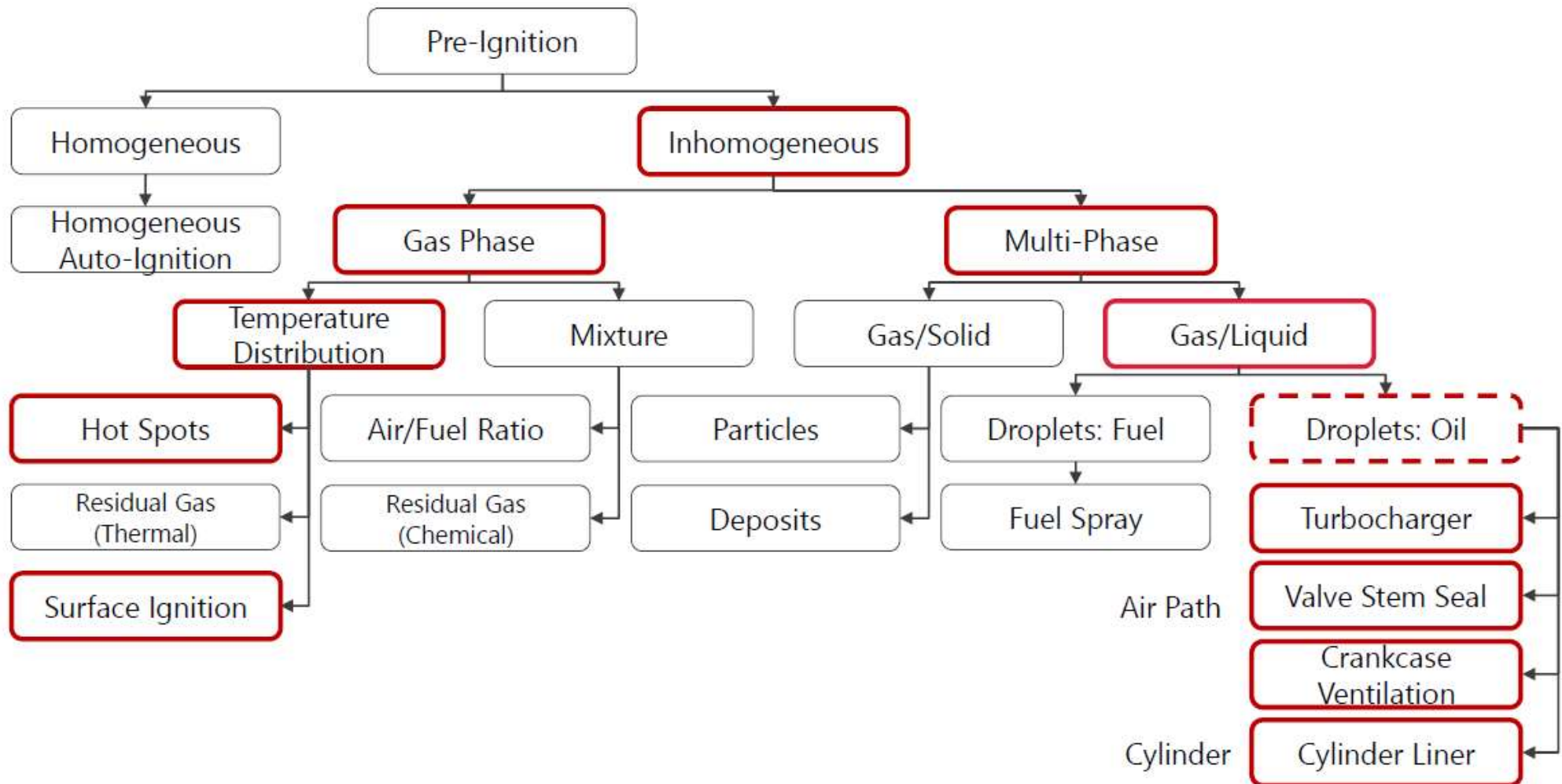
-  Infrastructure and fuel cost
-  Engine out NO_x emissions will require EATS for certain applications
-  Maintenance effort
-  Powertrain noise level (still lower than diesel)



Concetto Chiave: le applicazioni maggiormente plausibili sono quelle ad elevato utilizzo potenza installata (HD, MD).

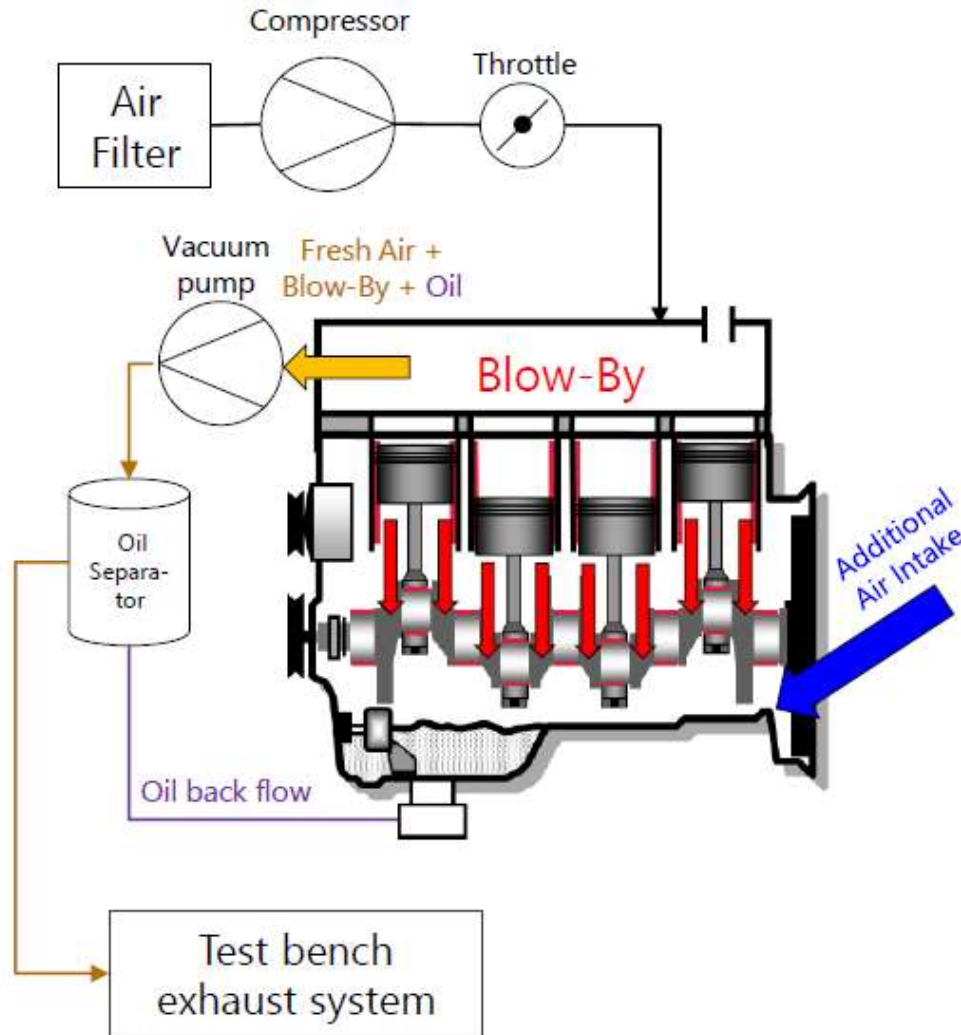
OSSIDI DI AZOTO – NO_x e H₂

Combustione incontrollata (preaccensione /detonazione)



OSSIDI DI AZOTO – NO_x e H₂

Diluizione e controllo del by-pass



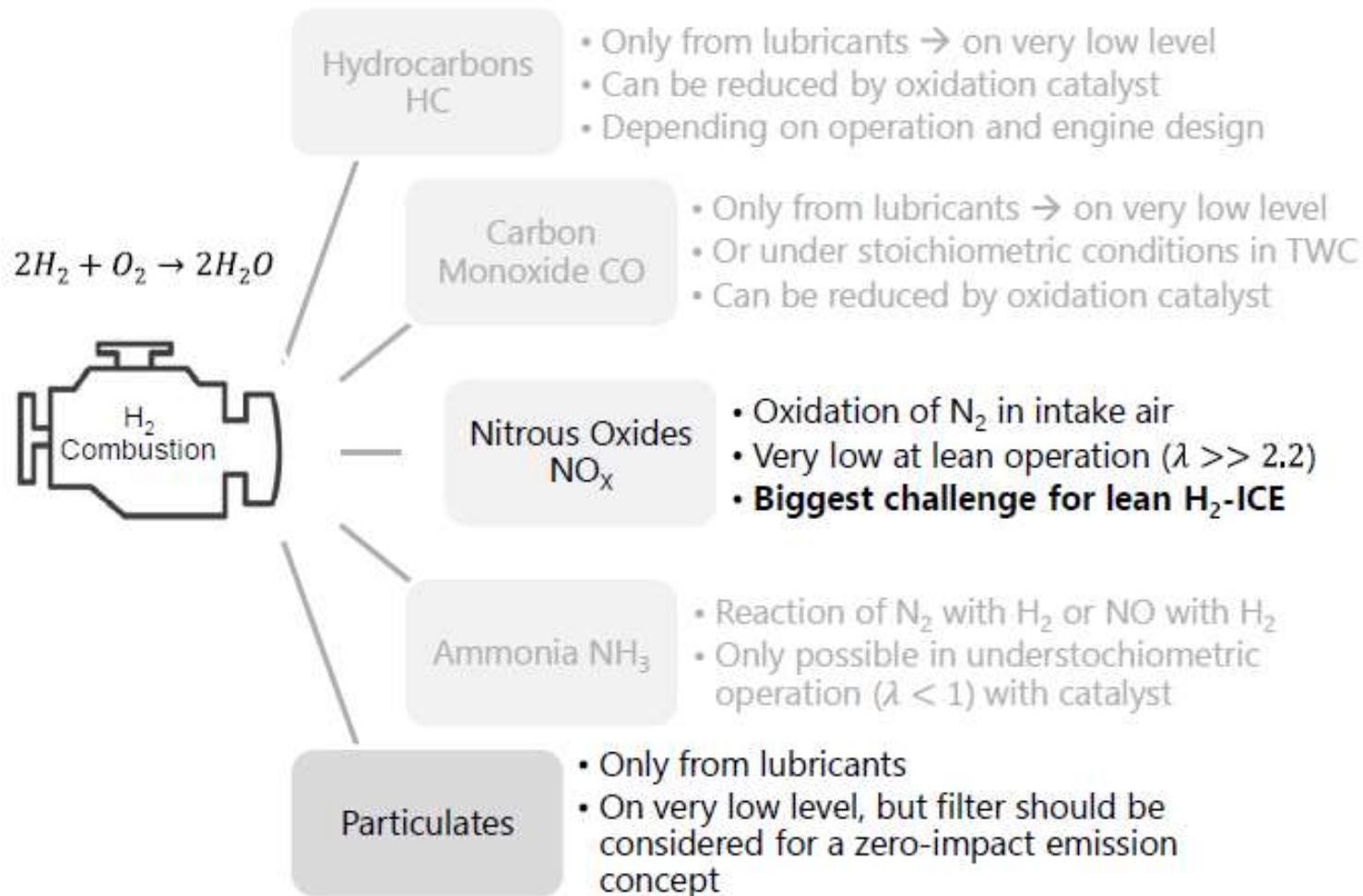
Serve un «lavaggio» del basamento

Per mantenere la diluizione a soglia:

- per sicurezza
- per evitare danneggiamento dei materiali
(l'idrogeno atomico penetra nei metalli)

OSSIDI DI AZOTO – NO_x e H₂

Per concludere: NO_x sono l'aspetto chiave di combustibili sintetici



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