



*centroappunti.it*

**CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 2472A**

**ANNO: 2020**

# **A P P U N T I**

**STUDENTE: Sobrero Giovanni**

**MATERIA: Controllo delle Emissioni di Inquinanti - Prof. Spessa**

**Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.**

**Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.**

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

# Controllo delle Emissioni di Inquinanti

**Professore: Ezio Spessa**

**Appunti di Giovanni Sobrero**

**A.A. 2019 – 2020 (8 cfu)**

## Programma

Riserve, produzione e distribuzione di combustibili per il trasporto; analisi 'well-to-wheel'; controllo delle emissioni inquinanti e di gas ad effetto serra. Principali tipologie di emissioni, loro sorgenti e processi evolutivi. Impatto ambientale delle emissioni allo scarico dei motori a CI: effetto serra; smog fotochimico; piogge acide; effetti dell'ozono e del particolato. Effetti sulla salute delle emissioni.

Produzione di emissioni inquinanti nei motori a Si e CI. Processi di formazione delle principali sostanze inquinanti e loro dipendenza dalle variabili di funzionamento: Ossidi di azoto (NOx); Monossido di carbonio (CO); Idrocarburi incombusti (HC); Particolato (PM); Ossidi di zolfo (SOx).

Il contesto normativo (emissioni di inquinanti e di  $CO_2$ ).

Analisi dei transitori di funzionamento e dinamica delle emissioni nei motori; controllo delle emissioni inquinanti durante i transitori veloci e lenti.

Trattamento delle emissioni allo scarico in motori ad accensione comandata. Reattori termici, convertitori catalitici e loro evoluzione tecnologica, tecnologie emergenti. Sistemi di post-trattamento delle emissioni allo scarico in motori ad accensione per compressione. Catalizzatori di ossidazione. Trappole di particolato e loro rigenerazione. Catalizzatori e trappole di ossidi di azoto. Catalizzatori DENOX.

Controllo delle emissioni a bordo del veicolo durante la sua vita utile: On-Board Diagnostics e On-Board Monitoring.

Evoluzione tecnologica dei motori ad accensione comandata: iniezione diretta; tecnologie per la riduzione delle emissioni inquinanti e dei consumi nei motori a benzina; motori a gas naturale ed a combustibili alternativi. Evoluzione tecnologica dei motori ad accensione per compressione: controllo della combustione e della formazione di emissioni inquinanti, nonché dei consumi mediante sistemi 'Common Rail multijet' e tecnologie emergenti.

Elettrificazione del powertrain: veicoli elettrici ed ibridi.

## Organizzazione dell'insegnamento

### ESERCITAZIONI

Sistemi e tecniche per la misura delle emissioni inquinanti: analizzatori a raggi infrarossi (NDIR); analizzatori a chemiluminescenza (CLD); analizzatori a ionizzazione di fiamma (FID); misura del particolato. Metodologie per il calcolo della dosatura in base ai costituenti dei gas di scarico. Calcolo delle emissioni specifiche. Calcolo del 'Carbon Dioxide Equivalent'.

### LABORATORI

- Ottimizzazione dell'architettura e della strategia di controllo di motopropulsori ibridi
- Tecniche model-in-the-loop, hardware-in-the-loop e di rapid-prototyping applicate al controllo delle emissioni in motori a combustione interna.

## Esame

L'esame è orale. Il candidato dovrà rispondere a due o tre domande, sviluppandone i temi attraverso la discussione o lo svolgimento di brevi calcoli. Le prove d'esame durano in media circa sessanta minuti l'una.

## Sommario (Manuale)

|  |    |
|--|----|
| 0. Premessa dell'autore .....  | 2  |
| 0.1 Contenuto e forma.....   | 8  |
| 0.2 Architettura della dispensa.....   | 9  |
| 1. Introduzione .....  | 10 |
| 1.1 Partendo dalle Conclusioni .....   | 10 |
| - Panorama odierno [ ↓ LEZIONE 01: 09/10/19 ] .....  | 10 |
| 1.2 Energy Outlook .....   | 12 |
| - Consumo complessivo energetico di tutti i settori .....  | 12 |
| - Consumo annuo di petrolio.....   | 12 |
| - Diagramma della domanda di petrolio giornaliero per il settore dei trasporti.....              | 13 |
| - Variazione media annua della domanda di petrolio nel Trasporto stradale per regione (NPS)..... | 14 |
| - Consumo di carburante medio e chilometri percorsi per regione (NPS, 2025) .....                | 14 |
| 1.3 Emissioni di $CO_2$ .....  | 15 |
| - Emissioni di $CO_2$ per regioni e settori (NPS).....   | 15 |
| - Effetto serra (Greenhouse Gas Effect) [ ↓ LEZIONE 02: 09/10/19 ] .....                         | 15 |
| - Potenziale di riscaldamento globale ed equivalente di anidride carbonica.....                  | 16 |
| - Emissioni di $CO_2$ a livello globale per settori.....   | 16 |
| - Il Downstream della produzione di energia.....   | 17 |
| 1.4 Inquinamento dell'aria.....  | 18 |
| - Il processo di combustione.....  | 18 |
| - Gli inquinati non sono solo legati al trasporto ma vengono un po' dappertutto .....            | 19 |
| - Emissioni dei principali inquinanti per settore nel 2015 e previsioni per il 2040 .....        | 19 |
| - Considerando gli effetti .....   | 20 |
| - Costo, legato al Welfare, delle morti premature (2012) .....                                   | 20 |
| 1.5 Introduzione al contesto normativo.....  | 21 |
| - Cicli di guida NEDC e WLTC.....  | 21 |
| - Quadro normativo Europeo per veicoli stradali .....  | 21 |
| - La normativa sugli inquinanti e sulla $CO_2$ .....   | 22 |
| - La normativa sulla $CO_2$ .....  | 23 |
| - Stesso discorso per i veicoli commerciali pesanti.....   | 23 |
| 1.6 Soluzioni tecnologiche per migliorare l'efficienza .....                                     | 24 |
| - Analisi costi – benefici [ ↓ LEZIONE 03: 11/10/19 ] .....                                      | 24 |
| - Motore a combustione interna .....   | 24 |
| - Effetto utile dell'energia meccanica .....   | 25 |
| - Riduzione della resistenza al rotolamento .....  | 26 |
| - Miglioramento dell'aerodinamica .....  | 26 |
| - Riduzione del peso .....   | 26 |



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

- Roadmap generale .....27
- 1.7 Passaggio a combustibili alternativi e biocombustibili .....28
  - Introduzione.....28
  - Combustibile alternativo: il gas naturale.....28
  - Riserve e risorse energetiche stimate .....29
  - Condotture principali di CNG e terminali di LNG in Europa.....29
  - Biocombustibile.....30
  - Produzione e consumo di biocombustibili nel mondo allo stato odierno (2017) .....31
  - Aspettative di utilizzo dell’energia rinnovabile nel mondo (2017 -2040) .....31
- 1.8 Passaggio all’elettrificazione .....32
  - Introduzione.....32
  - Veicolo elettrico a batteria (BEV: Battery Electric Vehicle) .....32
  - Emissione di  $CO_2$  per un veicolo elettrico tradizionale .....32
  - Sistemi di accumulo dell’energia per percorrere 500 [km] .....33
  - Confort termico: autonomia in funzione del mese [ ↓ LEZIONE 04: 11/10/19 ] .....34
  - Complicazioni .....34
  - Fattori abilitanti che verranno richiesti per lo sviluppo del veicolo elettrico .....34
- 1.9 Ibridi (HEV: Hybrid Electric Vehicle) .....35
  - Veicolo ibrido Serie .....35
  - Veicolo ibrido Parallelo .....35
  - Frenata rigenerativa .....36
  - Funzioni e classificazione .....36
- 2. Motori SI: Spark Ignition .....37
  - 2.1 Processo di combustione nei motori SI .....37
    - Reazione di combustione [ ↓ LEZIONE 05: 16/10/19 ] .....37
    - Processo di combustione .....37
    - Processo di propagazione del fronte di fiamma .....38
    - Parametri del processo di combustione.....39
    - Fronte di fiamma.....40
    - Fronte di fiamma: da laminare a turbolento .....41
    - Evoluzione dell’iniezione nei motori SI.....43
    - Detonazione (Abnormal combustion) nei motori SI .....43
    - Valori tipici dei principali parametri per diverse classi di ICE .....44
  - 2.2 Emissioni primarie da motori SI.....45
    - Presentazione.....45
  - 2.3 SI: Ossidi di Azoto (NOx) .....46
    - Introduzione sugli Ossidi di Azoto (NOx) [ ↓ LEZIONE 06: 16/10/19 ] .....46
    - Meccanismi di formazione degli Ossidi di Azoto (NOx) .....46
    - Storia: modelli del processo di formazione degli NO.....47
    - Excursus sull’energia di attivazione .....48

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

|  |            |
|--|------------|
| - Meccanismo Termico - Analisi del modello cinetico a 6 equazioni .....                              | 48         |
| - Ulteriori meccanismi di formazione del NO .....  | 50         |
| - Resoconto sui meccanismi di formazione del NO .....  | 50         |
| - Calcolo predittivo dei livelli di NO (considerando il Meccanismo Termico).....                     | 50         |
| - Risultati della combinazione dei modelli termodinamico e cinetico [ ↓ LEZIONE 07: 18/10/19 ] ..... | 54         |
| - Principali parametri motoristici sulla formazione degli Ossidi di Azoto (NOx) .....                | 60         |
| [ ↓ LEZIONE 08: 18/10/19 ] .....   | 67         |
| <b>2.4 SI: Idrocarburi incombusti (HC).....</b>  | <b>71</b>  |
| - Introduzione sugli HC .....  | 71         |
| - Reattività fotochimica .....   | 73         |
| - Formazione degli HC .....  | 75         |
| - Meccanismi di spegnimento della fiamma [ ↓ LEZIONE 09: 23/10/19] .....                             | 76         |
| - Generazione dei meccanismi di occultamento di HC (A) .....   | 79         |
| - Ossidazione di HC nel cilindro e nei condotti di scarico (B) .....                                 | 79         |
| - Analisi dei meccanismi di occultamento [ ↓ LEZIONE 09: 23/10/19] .....                             | 80         |
| [LEZIONE 10: 23/10/19] .....   | 88         |
| - Analisi del processo di ossidazione.....   | 95         |
| - Considerazioni riassuntive.....  | 97         |
| - Effetto dei principali parametri motoristici sulla formazione di HC .....                          | 97         |
| <b>2.5 SI: Ossido di Carbonio (CO).....</b>  | <b>108</b> |
| - Introduzione sul CO [LEZIONE 12: 25/10/19] .....   | 108        |
| - Meccanismi di formazione del CO .....  | 108        |
| - Effetto di alcuni parametri sulla formazione del CO.....   | 109        |
| <b>2.6 SI: Particolato (PM).....</b>   | <b>114</b> |
| - Premessa [ ↓ FINE LEZIONE 21: 30/10/19 52' 00'' ] .....  | 114        |
| - Introduzione.....  | 114        |
| - Excursus sui motori GDI .....  | 114        |
| - Formazione e caratteristiche del PM.....   | 115        |
| - Recenti scoperte .....   | 116        |
| - Metodi per la riduzione del PM.....  | 116        |
| - Veicoli ibridi e PM.....   | 116        |
| <b>3. Motori CI: Compression Ignition.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>3.1 Processo di combustione nei motori CI.....</b>  | <b>117</b> |
| - Reazione di combustione .....  | 117        |
| - Sistema di iniezione.....  | 117        |
| - L'iniettore.....   | 118        |
| - Legge di alzata dello spillo.....  | 118        |
| - Descrizione delle fasi del getto.....  | 119        |
| - Forma e composizione del getto dopo all'incirca 10° [LEZIONE 13: 30/10/19].....                    | 120        |
| - Considerazioni sul getto .....   | 121        |
| - Ordini di grandezza .....  | 121        |
| - Common Rail: iniezioni multiple.....   | 122        |
| - Parametri che agiscono sul sistema di ottimizzazione del getto .....                               | 123        |

|  |     |
|--|-----|
| 3.2 CI: Emissioni primarie.....  | 124 |
| - Presentazione.....   | 124 |
| 3.3 CI: Ossidi di Azoto (NOx).....   | 125 |
| - Analisi sperimentale della formazione degli NOx mediante diagnostica ottica .....                                    | 125 |
| - Meccanismi di formazione degli NOx [ ↓ LEZIONE 14: 30/10/19].....  | 128 |
| - Modello di cinetica chimica.....   | 129 |
| - Modello termodinamico e dello spray .....  | 130 |
| - Fenomeni fisici in camera che influenzano la formazione degli NOx .....  | 132 |
| - Effetto dei principali parametri motoristici sulla formazione degli NOx [ ↓ LEZIONE 15: 06/11/19] .....              | 135 |
| 3.4 CI: Particolato (PM).....  | 144 |
| - Composizione e caratteristiche del PM (Particulate Matter) da motori Diesel .....                                    | 144 |
| - Processi che influenzano la produzione netta di PM [ ↓ LEZIONE 16: 06/11/19].....                                    | 150 |
| - Formazione delle particelle carboniose .....   | 152 |
| - Modelli di formazione delle particelle carboniose [ ↓ LEZIONE 17: 13/11/19] .....                                    | 154 |
| - Ossidazione delle particelle carboniose .....  | 161 |
| - Modelli di ossidazione [ ↓ LEZIONE 18: 13/11/19].....  | 163 |
| - Stima della quantità di “Soot” ossidato.....   | 165 |
| - Massimo diametro ossidabile.....   | 165 |
| - Effetto di agglomerazione delle particelle.....  | 166 |
| - Esempi di calcolo di formazione/ossidazione del soot .....   | 166 |
| - Effetti di T e $\rho$ della carica, d. dei fori del polverizzatore, p. di iniezione, grado di diluizione (EGR) ..... | 167 |
| [ ↓ LEZIONE 19: 15/11/19] .....  | 172 |
| 3.5 CI: Idrocarburi incombusti (HC) .....  | 177 |
| - Generalità.....  | 177 |
| - Combustione diesel e formazione degli HC.....  | 178 |
| - HC che si formano durante il ritardo di accensione [ ↓ LEZIONE 20: 15/11/19] .....                                   | 178 |
| - HC che si formano dopo il ritardo di accensione .....  | 181 |
| - Undermixing.....   | 181 |
| - Spray impingement .....  | 183 |
| - Misfiring.....   | 184 |
| - HC e condizioni di funzionamento del motore .....  | 184 |
| - HC e geometria della camera di combustione [ ↓ LEZIONE 21: 22/11/19] .....   | 184 |
| 4. La misura delle Emissioni.....  | 187 |
| 4.1 Strumentazione per la misura del Particolato (PM).....   | 187 |
| - Introduzione: richiamo sul Particolato (PM) [ ↓ LEZIONE 22: 22/11/19] .....  | 187 |
| - Tecniche per la misura della massa del Particolato (PM) .....  | 187 |
| - Tecniche per la misura del numero di particelle del Particolato(PM) [ ↓ LEZIONE 23: 27/11/19] .....                  | 193 |
| - Dimensione e distribuzione del Particolato (PM) .....  | 195 |
| 4.2 Determinazione delle emissioni specifiche dai costituenti dei gas di scarico grezzi...199                          |     |

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

- Introduzione.....199
- Reazione di combustione e nomenclatura [ ↓ LEZIONE 24: 27/11/19] .....202
- Espressione della dosatura ( $\alpha$ ) e di ( $\lambda$ ) in funzione del numero di moli di aria ( $n$ ) .....203
- Calcolo del n. di moli di aria ( $n$ ) e delle moli allo scarico .....203
- Stima EGR.....211
  
- 4.3 Strumentazione per la misura delle emissioni gassose .....216
- Richiamo sulle emissioni inquinanti da motore SI e motore CI [ ↓ LEZIONE 25: 29/11/19] Ing. C. Maino ..216
- Analizzatori per la misura delle emissioni inquinanti gassose .....217
- [ ↓ LEZIONE 26: 29/11/19] Ing. C. Maino ..... 223
- Banco di analisi dei gas di scarico grezzi (raw emissions).....228
  
- 4.4 Stima delle emissioni in massa nei gas di scarico diluiti.....231
- Introduzione [ ↓ LEZIONE 27: 04/12/19].....231
- Diluizione dei gas di scarico del veicolo.....232
- Sistema di prelievo CVS .....234
- CVS: calcolo delle emissioni in massa da gas di scarico diluiti .....237
- Analisi modale dei gas diluiti .....241
- Analisi modale dei gas grezzi [non da sapere per all’esame].....241
- Limiti del Sistema CVS .....242
- Sistemi di diluizione con DF costante .....242
  
- 5. HEVs: Hybrid Electric Vehicles .....243
- 5.1 Veicoli Ibridi ed HEV .....243
- Introduzione sui veicoli Ibridi [ ↓ LEZIONE 28: 04/12/19] .....243
- HEV.....245
- HEV: Serie.....247
- HEV: Parallelo [ ↓ LEZIONE 29: 06/12/19].....249
- Elettrificazione ausiliare, BAS, FAS .....254
- HEV Complessi.....257
- [ ↓ LEZIONE 30: 06/12/19] ..... 260
- Esempi dell’impatto della ibridazione sul Fuel Consumption (FC) e sulle emissioni.....265
- Confronto: funzioni dell’ibrido / percezione del cliente.....269
  
- 5.2 Ottimizzazione delle Strategie di Controllo degli HEV .....270
- Introduzione sulle Strategie di Controllo (CS) [ ↓ LEZIONE 31: 11/12/19] Ing. C. Maino .....270
- Metodi di ottimizzazione globali (metodi Benchmark) (non implementabili a bordo) .....272
- Metodi di ottimizzazione istantanei (implementabili a bordo) [ ↓ LEZIONE 32: 11/12/19] Ing. C. Maino ..279
- Metodi di ottimizzazione euristici (implementabili a bordo).....282
- Metodi di ottimizzazione basati sull’Intelligenza Artificiale (implementabili a bordo) .....285
  
- 6. Contesto Normativo: Emissioni di Inquinanti e Gas Serra.....288
- 6.1 Contesto Normativo - Parte 1 (Autovetture e Veicoli Commerciali Leggeri) .....288
- Introduzione: necessità di introdurre un contesto normativo [ ↓ LEZIONE 33: 11/12/19] .....288
- Contesto normativo legato alle Autovetture e ai Veicoli Commerciali Leggeri .....289

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

|   |     |
|---|-----|
| [ ↓ LEZIONE 34: 11/12/19] .....   | 297 |
| [ ↓ LEZIONE 35: 18/12/19] .....   | 312 |
| 6.2 Contesto Normativo - Parte 2 (Veicoli Commerciali Pesanti + Veicoli Off-road) ..... | 320 |
| - Veicoli pesanti (HDV) e autobus [ ↓ LEZIONE 36: 18/12/19] .....                       | 320 |
| - Veicoli “non-road” .....  | 332 |
| 7. Trattamento delle emissioni allo scarico .....                                       | 334 |
| 7.1 Trattamento delle emissioni allo scarico nei motori SI: il TWC .....                | 334 |
| - Introduzione [ ↓ LEZIONE 37: 10/01/20] .....  | 334 |
| - Reattori termici .....  | 334 |
| - Convertitori catalitici .....   | 335 |
| [ ↓ LEZIONE 38: 10/01/20] .....   | 343 |
| - Deterioramento delle prestazioni del catalizzatore .....                              | 348 |
| - Accoppiamento del catalizzatore con il sistema di controllo del titolo .....          | 351 |
| - Sistemi OBD per la diagnostica dell'impianto catalitico .....                         | 356 |
| 7.2 Trattamento delle emissioni allo scarico nei motori CI: DOC e DPF .....             | 358 |
| - Introduzione [ ↓ LEZIONE 39: 15/01/20] .....  | 358 |
| - Catalizzatori ossidanti (DOC) .....   | 359 |
| - Filtri per il particolato (DPF) (/Antiparticolato) .....                              | 365 |
| [ ↓ LEZIONE 40: 15/01/20] .....   | 368 |
| [ ↓ LEZIONE 41: 17/01/20] .....   | 376 |
| 7.3 Trattamento delle emissioni allo scarico nei motori CI: catalizzatori per NOx ..... | 378 |
| - Tipologie .....   | 378 |
| - Sistemi SCR (Selective Catalytic Reduction) con ammoniaca/urea .....                  | 379 |
| - Sistemi LNC (Lean NOx Catalyst) o DeNOx .....   | 385 |
| - Trappole per gli NOx (LNT: Lean NOx Trap) [ ↓ LEZIONE 42: 17/01/20] .....             | 386 |
| - Sistemi DPNR (Diesel Particulate-NOx Reduction System) .....                          | 390 |
| 7.4 Trattamento delle emissioni allo scarico nei motori SI: GPF .....                   | 393 |
| - Introduzione .....  | 393 |
| - Stato commerciale del GPF .....   | 393 |
| - Materiale e configurazioni del GPF .....  | 393 |
| - Effetti del GPF sul PN .....  | 394 |
| - GPF RGN & Controllo .....   | 394 |

## **0. Premessa dell'autore**

### **0.1 Contenuto e forma**

*Questa dispensa è stata redatta ascoltando le videolezioni online del Professore Ezio Spessa, registrate durante l'anno accademico 2019-2020. Tutto quello che racconta, o meglio "dice", è riportato. Io, studente all'ultimo anno del percorso di Laurea magistrale in ingegneria meccanica, mi sono occupato del riordino del materiale, per uno studio fluido e propedeutico della materia. Tutto il materiale utilizzato per la stesura, in termini, non di testo, ma di immagini e diagrammi ed eventuali approfondimenti, è stato realizzato e messo a disposizione dal Prof. E. Spessa. Al limite ho modificato alcune immagini in termini, non di contenuto, ma di forma.*

*Mi sono permesso di mettere alcune considerazioni personali che non differiscono dall'esposizione tenuta dal professore durante le 42 lezioni.*

*In particolare, le osservazioni in cui, io studente, mi faccio "sentire" le ho riportate in arancione.*

*Inoltre ho riportato in rosso alcune domande per il professore per ovviare ad alcune incomprensioni personali. Ho deciso di lasciarle in quanto potrebbero tornare utili a futuri studenti del corso che vorranno integrare questa dispensa al proprio lavoro di comprensione e studio della materia.*

*In verde saranno riportati i chiarimenti che gentilmente il professore sarà lieto di dare.*

*In blu ho evidenziato le parti del testo più rilevanti.*

*[Nota: nel caso in cui venissero apportate delle modifiche a questo File, consiglio di rigenerare il sommario automatico e aggiornare quello manuale. Ho preferito riportare il sommario manualmente per una questione di ordine e precisione.]*

## 0.2 Architettura della dispensa

### Titolo 1

#### Titolo 2

- Titolo 3

Titolo 4

Titolo 5 [Domande per il Prof.]

Per quanto riguarda l'architettura della dispensa, segue l'esempio del capitolo 2.

## 2. Motori SI: Spark Ignition

### 2.1 Processo di combustione nei motori SI

- Reazione di combustione [ ↓ LEZIONE 05: 16/10/19 ]

- Processo di combustione

....

### 2.3 SI: Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>)

- Introduzione sugli Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>) [ ↓ LEZIONE 06: 16/10/19 ]

- Meccanismi di formazione degli Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>)

- Storia: modelli del processo di formazione degli NO

- Excursus sull'energia di attivazione

- Risultati della combinazione dei modelli termodinamico e cinetico [ ↓ LEZIONE 07: 18/10/19 ]

....

[Domanda (4) per il Prof.: il meccanismo che porta l'azoto contenuto nel combustibile a reagire con l'ossigeno, portando alla formazione di NO quasi istantaneamente, avviene sempre nella zona di fiamma, corretto?] [Corretto!] | Facsimile [pag. 50]

....

Lo stesso discorso vale anche per l'effetto di altri parametri, per esempio quello che controlla la temperatura e in particolare avrà rilevanza la combinazione degli effetti. Per esempio, io studente, arrivato a questo punto, mi aspetto che se riduciamo il tempo e la temperatura di combustione in un motore pensato per una miscela povera, si riduca conseguentemente la formazione degli NO. [pag. 56]

- Principali parametri motoristici sulla formazione degli Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>)

1) Dosatura

2) Frazione di gas residui

....

Il mio consiglio è di andare a lezione / guardare le videolezioni, tenendo sottocchio questa dispensa.

Buona preparazione,

Giovanni Sobrero

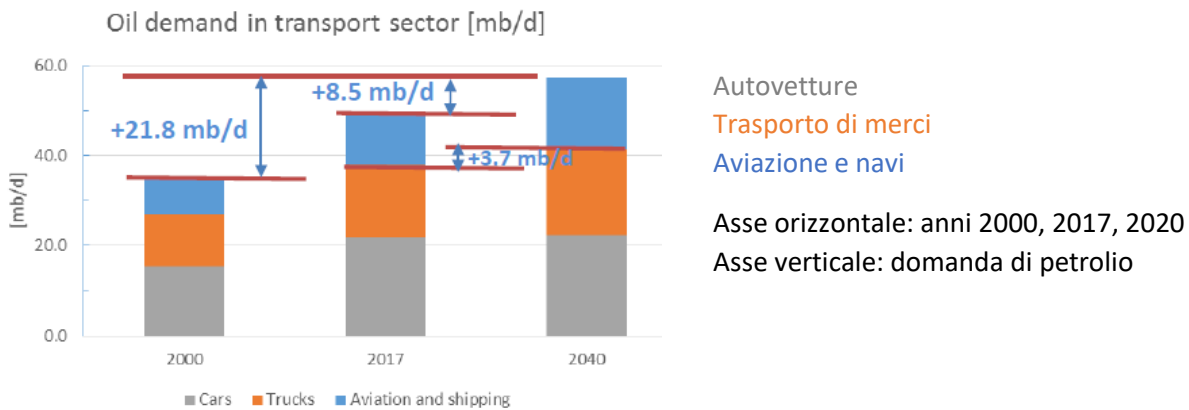
## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

6. Uno dei **combustibili alternativi** sarà il **gas naturale** che è quello il cui impiego aumenterà più intensamente da un punto di vista percentuale.
7. Per quanto riguarda i **biocombustibili** (il biocombustibile è un combustibile derivante non da una fonte fossile ma da una **biomassa**), rispetto a oggi, il loro impiego nel **2040** ci si aspetta possa **triplicare** e rappresenteranno grosso modo il **8% dei trasporti**.
8. Nel **2035/2040** ci si aspetta che lo **80%** dei veicoli venduti abbia ancora a bordo un **motore a combustione interna (ICE)** che però non sarà come quello che abbiamo oggi ma sarà in grado di funzionare con **combustibili diversi** e potrà **essere integrato in maniera massiccia con un'architettura ibrida o elettrica**.
9. Ci si aspetta anche ci saranno **280 milioni di veicoli elettrici**, che rappresenteranno circa il **15% della flotta complessiva** (considerando sempre che ci saranno **complessivamente 2 miliardi di vetture**). Perché così poco? Per via delle batterie che a oggi **non** hanno una **densità energetica sufficiente in molte applicazioni**, per i problemi inerenti alle **infrastrutture di ricarica**, agli **standard hardware e software** di tali strutture e per via della **smart Grid** (“rete intelligente”) ovvero per via degli sbilanciamenti di ricarica (se tutti oggi vogliono caricare il veicolo la rete può non essere in grado di soddisfare tutti. Quindi la rete deve diventare in qualche modo intelligente ovvero essere in grado di tamponare i picchi di richiesta energetica).
10. Tra le varie soluzioni di cui si prevede un notevole utilizzo sono le **architetture ibride: ibridi o ibridi di tipo plug-in**; un ibrido è un veicolo che ha a bordo due sorgenti di potenza, normalmente una sorgente termica e una elettrica, ma l'energia sostanzialmente è quella del combustibile (solitamente benzina); la parte elettrica viene gestita da quella termica e serve “solo” a rendere più efficiente il funzionamento del powertrain, perché con la parte elettrica si può recuperare l'energia in frenata, si può far lo Start and Stop, si può viaggiare alle basse velocità dove il motore termico è poco efficiente... rende più efficiente il sistema; ma la batteria viene caricata in frenata o, quando è scarica, dal motore termico. L'ibrido plug-in ha anche la possibilità di essere messo in carica attraverso una presa esterna. Nel momento in cui si scarica la batteria entra in funzione il termico.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

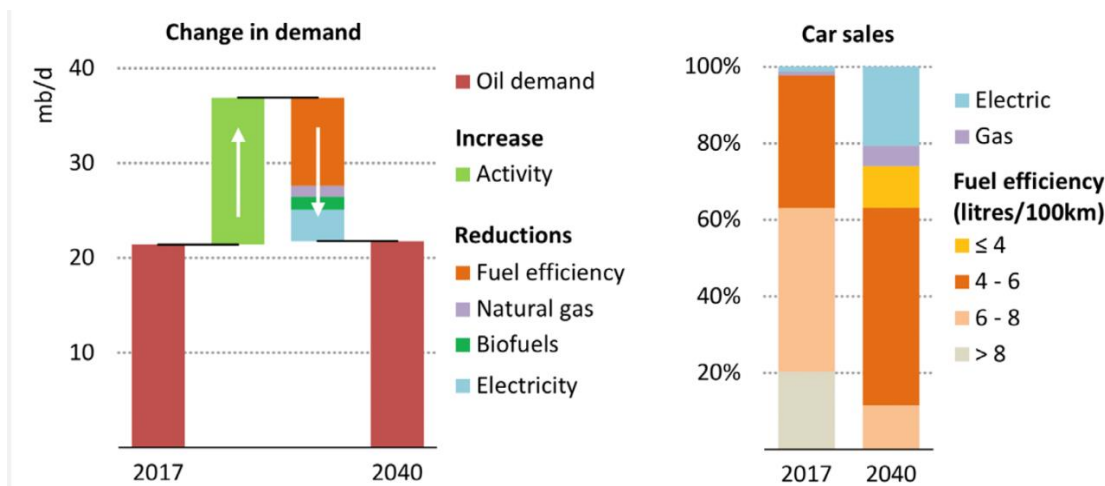
**- Diagramma della domanda di petrolio giornaliero per il settore dei trasporti**



[rif. International Energy Agency, 2018]

Osserviamo che dal **2000 al 2040** l'aumento complessivo di questa domanda è considerevole, **+21.8 [mb/d]**. Il grosso di questo 21.8 ce lo siamo giocato tra il 2000 e il 2017; si prevede che l'aumento del petrolio sia solo del **+8.5 [mb/d]**. E se osserviamo solo i settori delle autovetture e del trasporto delle merci aumenta solo del **+3.7 [mb/d]**. Come mai? Perché **dal 2010** sono state introdotte una serie di **normative** che mettono alle strette i produttori. *Se non ci fosse il contesto normativo*, da oggi al 2040 ci si sarebbe aspettati un aumento, **anziché di +3.7 [mb/d], di +28 [mb/d]**; quindi c'è un **"risparmio" di 24 [mb/d]** poiché si prevede, grazie al contesto normativo, un **miglioramento nell'efficienza del motore e delle tecnologie** (che risparmia **15 [mb/d]**), un maggior utilizzo dei **biocombustibili e gas naturali** (che risparmia **4[mb/d]**) e infine dell'**elettrificazione** (che risparmia **5 [mb/d]**).

Il diagramma successivo, sulla sinistra, rappresenta tale situazione prendendo in considerazione solo le autovetture. Sulla destra troviamo l'impatto sul parco veicoli che venderemo (nel mondo).



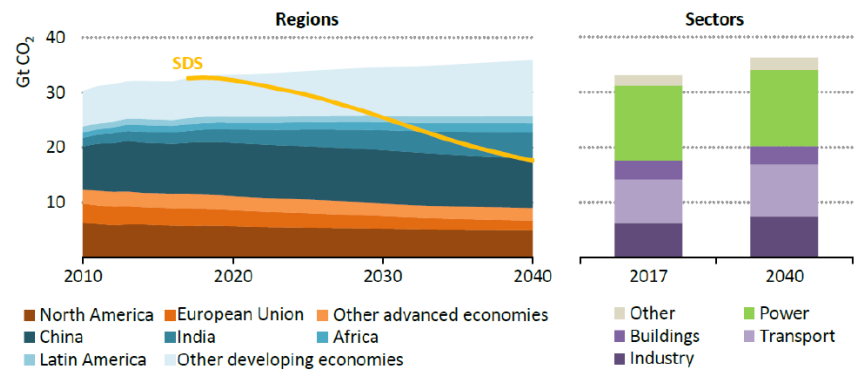
Nota: con Elettrico si intende i veicoli a batteria o a celle combustibili (fuel cells) e gli ibridi plug-in (quindi si intende non necessariamente puramente elettrico).

### 1.3 Emissioni di CO<sub>2</sub>

- Emissioni di CO<sub>2</sub> per regioni e settori (NPS)
- Effetto serra (Greenhouse Gas Effect)
- Potenziale di riscaldamento globale ed equivalente di anidride carbonica
- Emissioni di CO<sub>2</sub> a livello globale per settori
- Il Downstream della produzione di energia

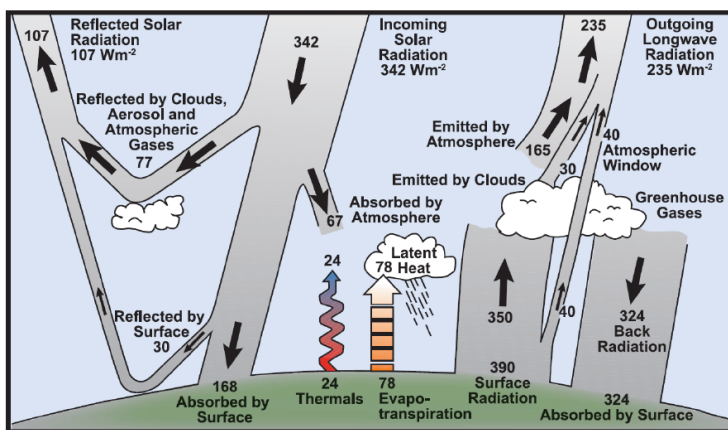
#### - Emissioni di CO<sub>2</sub> per regioni e settori (NPS)

Tutto ciò ha un effetto sulle emissioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera.



- Guardando gli andamenti previsti nel mondo notiamo che le **emissioni in Europa**, con il **miglioramento delle tecnologie**, andranno a **diminuire** mentre **in altre regioni aumenterà** compensando quindi l'effetto.
- Guardando al **settore dei trasporti**, **crece in valore assoluto** ma in % non cambia di molto (18% -> 19-20%).

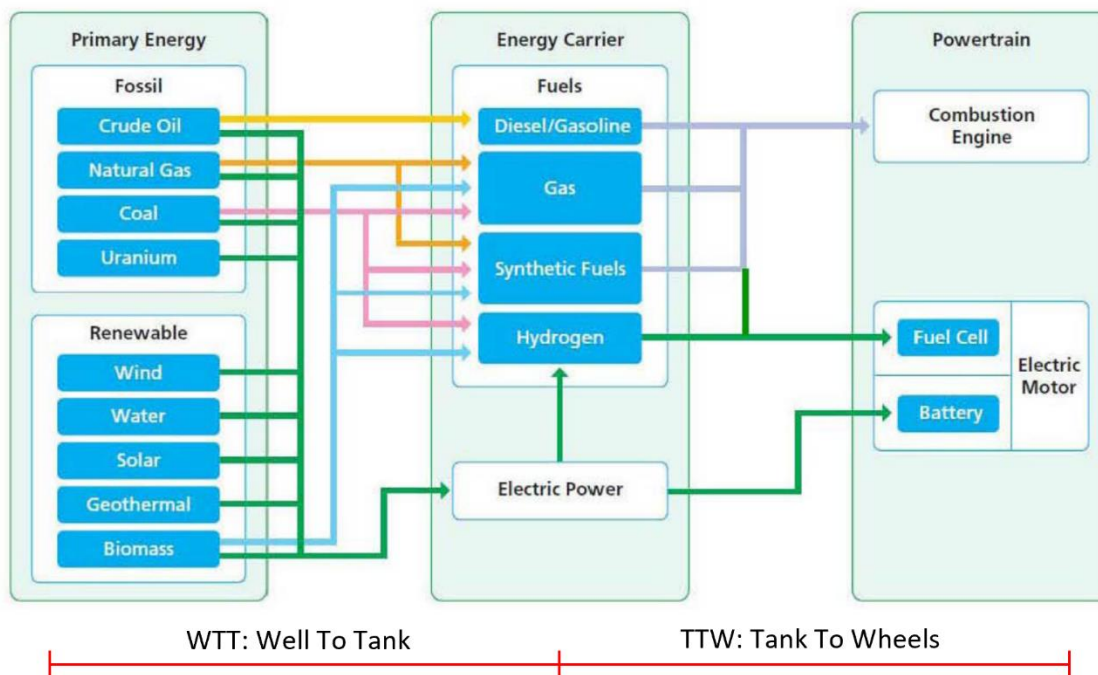
#### - Effetto serra (Greenhouse Gas Effect) [ ↓ LEZIONE 02: 09/10/19 ]



La CO<sub>2</sub> è responsabile dell'effetto serra.

La **radiazione solare incidente** (342) viene assorbita dalla superficie della Terra. Non totalmente. Infatti, in parte, viene **riflessa** da eventuali **gas presenti nell'atmosfera** e in parte **assorbita dall'atmosfera**; il restante viene **assorbito dalla terra** facendone aumentare la temperatura; la terra, riscaldandosi, si comporta come un **corpo nero**, quindi emette una radiazione che tuttavia ha una frequenza d'onda diversa rispetto alla radiazione incidente. Ne consegue che alcuni gas presenti nell'atmosfera facciano **riflettere nuovamente verso la terra** parte della radiazione (**Back radiation**). La vita si è sviluppata sulla Terra in presenza nella nostra atmosfera di gas serra ben definiti. Con la **rivoluzione industriale** abbiamo incominciato a introdurre nell'atmosfera dei gas, come la CO<sub>2</sub> e non solo (N<sub>2</sub>O prodotto da alcuni fertilizzanti, piuttosto che da CH<sub>4</sub>, metano), già precedentemente presenti, ma in maniera massiccia, **alterandone l'equilibrio**. Ne consegue un **innalzamento della temperatura** (3, 4 gradi possono cambiar molto le cose).

### - Il Downstream della produzione di energia



Una decina di anni fa i powertrain erano tutti basati sugli ICE, ovvero i motori a combustione interna, tutti alimentati o da gasolio (Diesel Oil) o da benzina (Gasoline). Quindi, se dovevamo andare a confrontare in termini di emissioni di  $CO_2$  o di energia per esempio, potevamo dire “bene questa vettura su strada consuma tot a cui è associata una certa emissione di  $CO_2$ ”. Poteva bastare quello. Oggi la situazione è molto diversa data la **diversità dei powertrain**. Per esempio **non possiamo dire che l’elettrico ha emissioni di  $CO_2$  uguale a zero** poiché, si l’autovettura elettrica non ha emissioni, ma l’energia con cui viene caricata deve essere prodotta in qualche modo.

**WTT: Well To Tank:** dal pozzo al serbatoio: quanto devo spendere in termini di  $CO_2$  per produrre il vettore energetico.

**TTW: Tank To Wheels:** dal serbatoio alle ruote: rappresenta le emissioni di  $CO_2$  durante la vita operativa del veicolo quando viaggia su strada.

Tutti i diagrammi precedentemente visti non tengono solo conto della produzione di  $CO_2$  in fase di funzionamento operativo ma tengono conto di tutto (quindi sono calcolati sulla somma dei due contributi).

**WTT + TTW = WTW: Well To Wheels**

Se si vuole anche tenere conto del **discorso sui materiali costruttivi utilizzati** (plastiche riciclate, batterie elettriche a fine vita... per esempio), e quindi inerenti cicli di produzione, bisognerà fare un’analisi di tipo:

**LCA: Life Cycle Assessment**

Sempre di più si va in questa direzione (non solo per il settore dei trasporti).

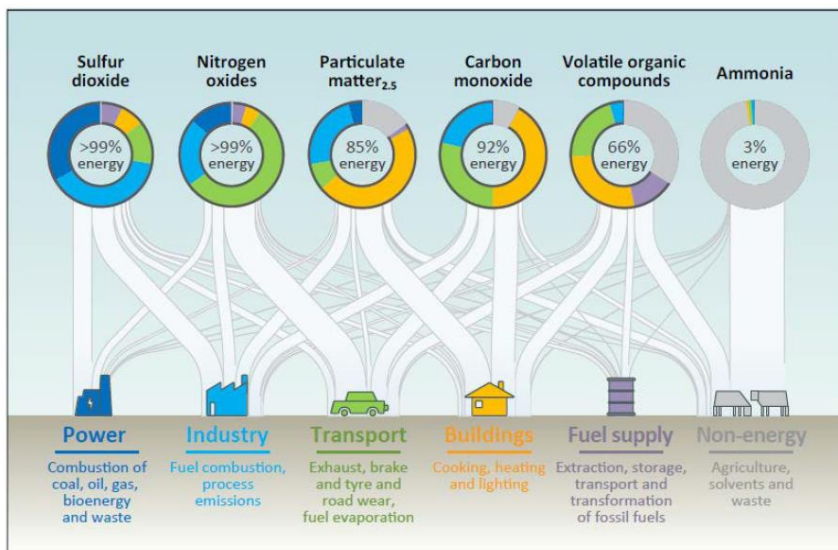
Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

che un **promotore dello smog fotochimico** (**HC mescolati con gli NO<sub>x</sub>**), in presenza dei **raggi solari**, responsabili dell'innesco di tale fenomeno. Lo smog fotochimico è la tipica situazione di alcune città nei mesi estivi o anche nei mesi invernali in condizione di alta pressione; se la pressione sale e non c'è vento gli inquinanti ristagnano e con il sole producono lo smog fotochimico), ecc. ...

**Alcuni inquinanti** possono avere un **effetto sull'ozono ad alti strati dell'atmosfera**; in questo caso **l'effetto è la rimozione dell'ozono**, effetto dannoso in quanto esso ci protegge dai raggi cosmici.

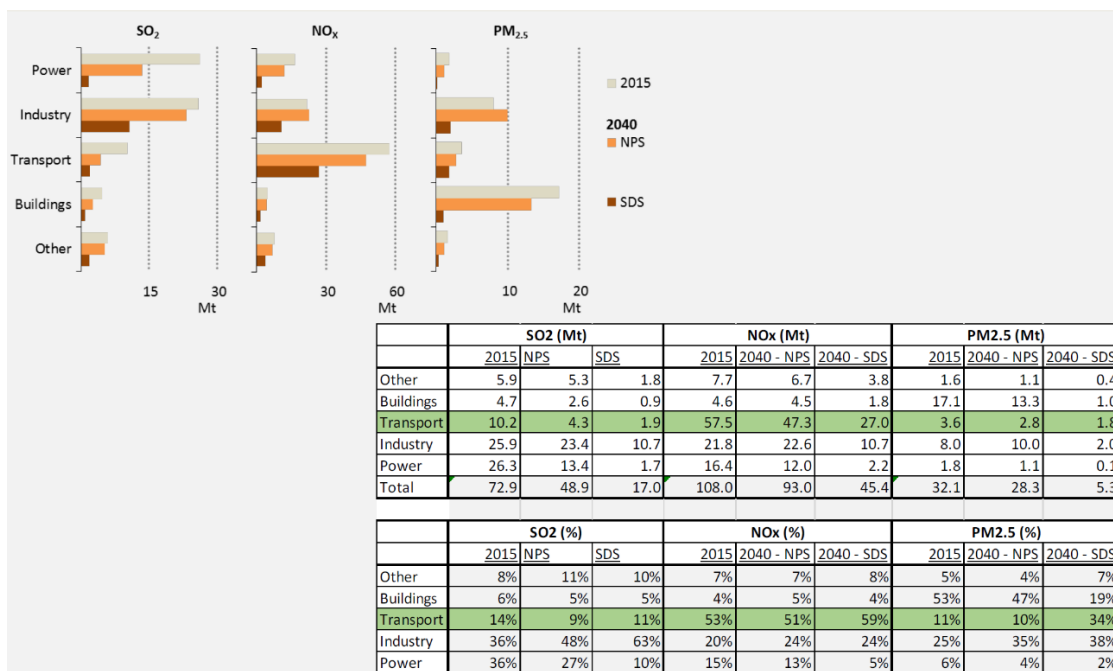
È poi importante studiare **l'effetto che tali inquinanti hanno sulle persone o sull'ambiente**, dipendente anche dall'**esposizione** (se inquiniamo in una zona in cui non vive nessuno? Vi è dispersione dovuta alle correnti d'aria). Non è il nostro campo; **cerchiamo di limitare i danni alla sorgente** considerando che poi il danno è sulle persone. Noi ci occuperemo della produzione delle emissioni.

**- Gli inquinati non sono solo legati al trasporto ma vengono un po' dappertutto**



I **principali inquinanti legati al settore del trasporto** sono gli **ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>)** per più del **50% del totale (52%)**, e anche gli **ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>)** per un po' meno del **20%**. Quindi oggi l'attenzione è soprattutto per questi, oltre che il **particolato (11%)**.

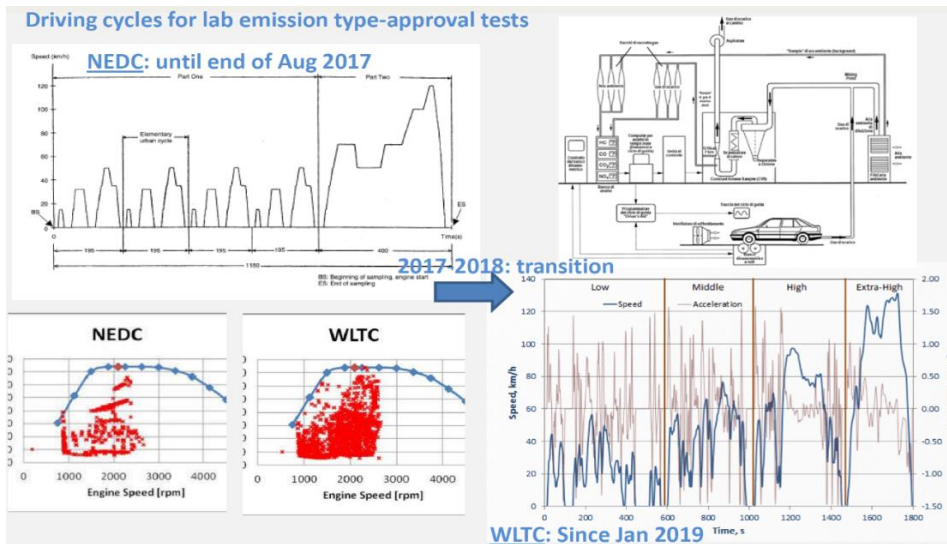
**- Emissioni dei principali inquinanti per settore nel 2015 e previsioni per il 2040**



## 1.5 Introduzione al contesto normativo

- Cicli di guida NEDC e WLTC
- Quadro normativo Europeo per veicoli stradali
- La normativa sugli inquinanti e sulla  $CO_2$
- La normativa sulla  $CO_2$
- Stesso discorso per i veicoli commerciali pesanti

### - Cicli di guida NEDC e WLTC



Come possiamo pensare di vincere queste sfide? Dobbiamo confrontarci con la realtà.

### Un'azienda produce un utile vendendo automobili.

Perché una casa automobilistica dovrebbe mettere sul mercato un veicolo che, per raggiungere certi obiettivi, costerebbe di più rischiando poi che qualcuno non lo compri più per via del prezzo?

Lo fa in qualche modo solo se c'è un contesto normativo che la mette alle strette.

Il contesto normativo nel mondo del veicolo è molto complicato. Non è basato solo sui risultati.

Normalmente il risultato del contesto normativo è una soluzione di compromesso; quello che propone inizialmente la commissione, quello che propone un gruppo di esperti, quel che risponde il produttore: "guarda che quello che mi imponete, va bene, posso rispettarlo, ma mi verrebbe a costare talmente tanto che il veicolo finito, per l'alto prezzo dati gli alti costi di produzione, poi non lo compra nessuno e quindi non avrebbe un impatto e inoltre potrei chiudere gli stabilimenti con un conseguente costo sociale".

A valle di un processo molto lungo allora viene fissato un limite.

### - Quadro normativo Europeo per veicoli stradali

Innanzitutto bisogna considerare le differenze tra i veicoli e i diversi utilizzi.

Quindi, per esempio, per autovetture e veicoli commerciali, si stabilisce un ciclo guida. L'autovettura viene messo su un banco di prova e questo ciclo guida viene riprodotto.

Fino ad agosto 2017 il ciclo guida era il NEDC: New European Driving Cycle.

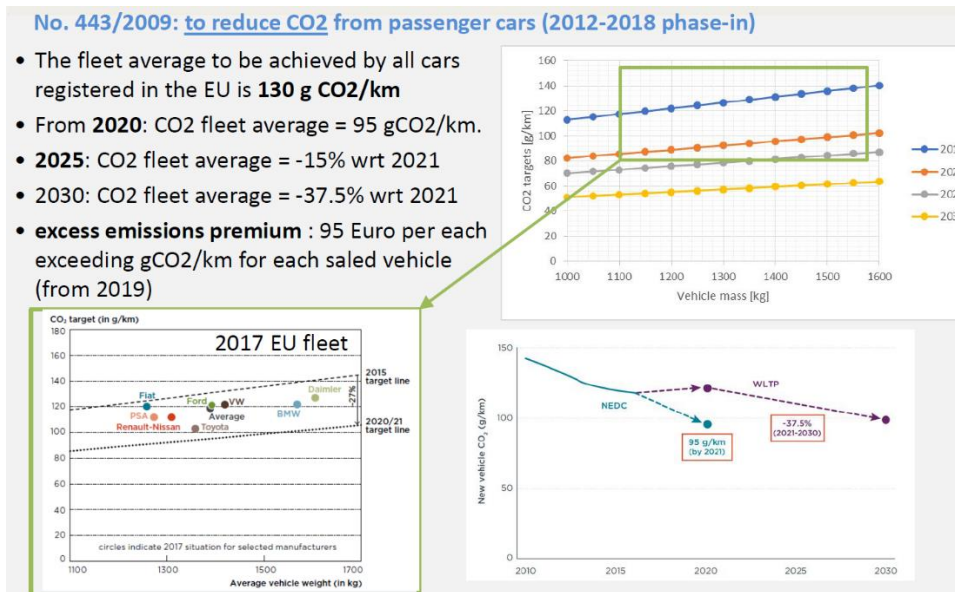
Si è fatta un'analisi statistica su come vengono utilizzate le vetture e si è costruito un ciclo artificiale che ha dei tratti di velocità costanti, periodi di minimo, dei tratti di accelerazioni e decelerazioni, che tengono conto di queste valutazioni statistiche. La vettura viene collocata sul banco di prova con le ruote su dei rulli che riproducono la resistenza della strada in termini del rotolamento delle ruote, in base alla massa del veicolo e ad altri fattori. Il Rod Road Factor è ciò che tiene conto di tutti i parametri.



## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

### - La normativa sulla CO<sub>2</sub>

La normativa sull'emissione di CO<sub>2</sub> è un "ex post".



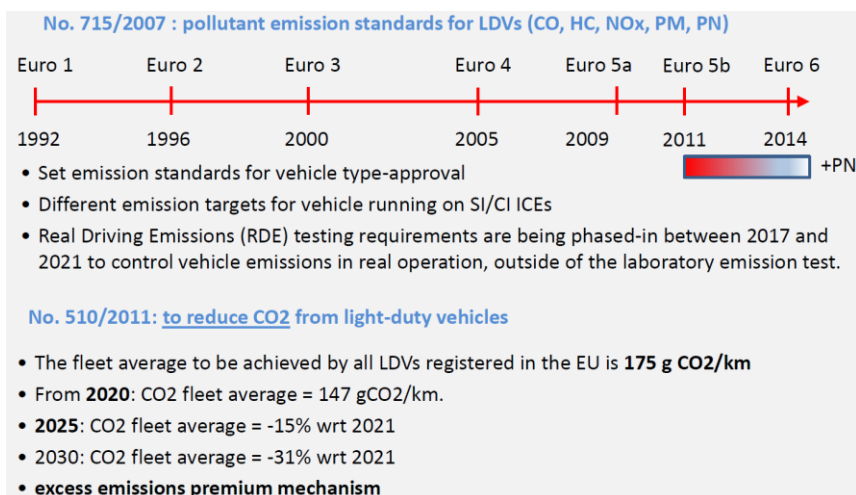
Alla fine di ogni anno si verifica se la **media sulla flotta del venduto** per ogni costruttore è **al di sotto di un limite di legge**. Se il limite di legge **viene superato** il costruttore deve pagare una **multa**.

Il limite di legge non è costante ma **dipende dalla massa**. Nel grafico in alto a destra vi sono i limiti di emissioni di CO<sub>2</sub> in [g/km] per la massa [kg]. La linea blu rappresenta il limite attualmente in vigore. A partire dal 2020 sarà sostituita dal limite rappresentato con la linea arancione. Facendo la media tra i limiti in relazione alla massa, si ottiene il **Fleet Average** che a **oggi in UE è di 130 [g CO<sub>2</sub>/km]**.

La multa consiste nel pagamento di **95€ per ogni [g]** in più **per ogni veicolo venduto** (dal 2019). Quindi un costruttore che vende 2 milioni di veicoli che sfiorano di un [g] la sua media, paga 95 x 2.000.000 = 190.000.000 €. **Conviene investire questi soldi in miglioramenti tecnologici**.

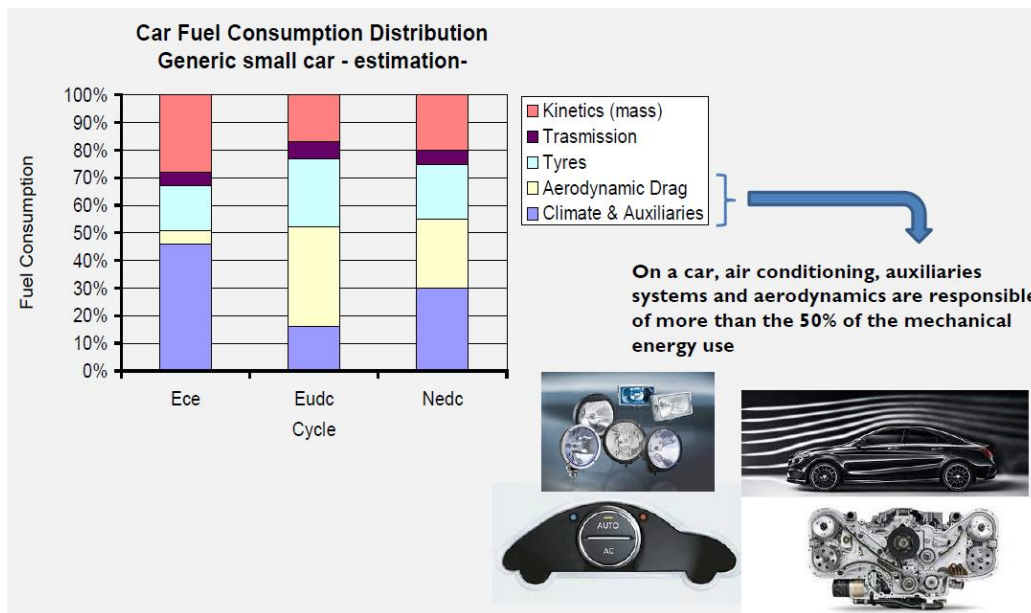
La questione è **complicata** dal fatto che tutti questi limiti sono stati **stabiliti quando c'era il NEDC**. Adesso c'è il WLTC, per cui **bisogna fare delle conversioni** (vedremo più avanti nel dettaglio).

### - Stesso discorso per i veicoli commerciali pesanti



Fino a oggi non c'è stata una legislazione sulla CO<sub>2</sub> perché il **consumo di un veicolo pesante è un valore di mercato ma ci sarà nel futuro**.

**- Effetto utile dell'energia meccanica**



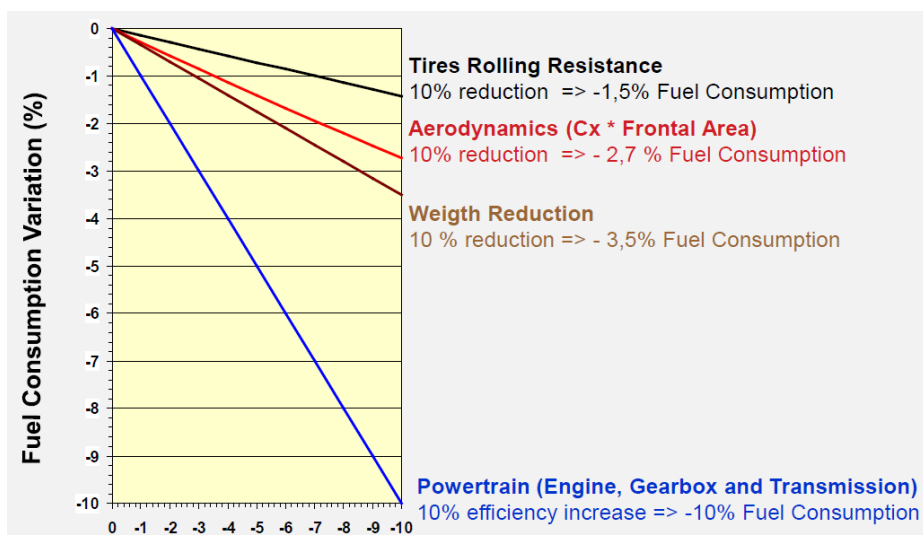
I diversi colori nel diagramma mostrano come venga utilizzata questa energia meccanica.

Osservando il NEDC vediamo che circa il 50% di questa energia viene utilizzata per vincere la **resistenza aerodinamica** (giallo) del veicolo e alla necessità di dover **comandare gli ausiliari** (lilla) (ausiliari per il funzionamento del motore: pompa dell'olio, del lubrificante, ... e ausiliari per il comfort: condizionatore ...).

Il **restante 50%** è necessario in parte per vincere le perdite che si hanno lungo la **linea di trasmissione** (viola), in parte per vincere **l'inerzia del veicolo** (rosso) (per i cambiamenti di velocità, quindi le accelerazioni e decelerazioni) e infine per vincere la **resistenza al rotolamento dello pneumatico** (azzurro).

Ne consegue che, **per ridurre il consumo del combustibile**, possiamo:

- 1) **Migliorare l'efficienza del motore** per far aumentare quell'1/3 di partenza;
- 2) **Migliorare l'aerodinamica del veicolo, ridurre la potenza assorbita dagli accessori; migliorare l'efficienza della trasmissione, alleggerire il veicolo e ridurre la resistenza al rotolamento delle ruote.**

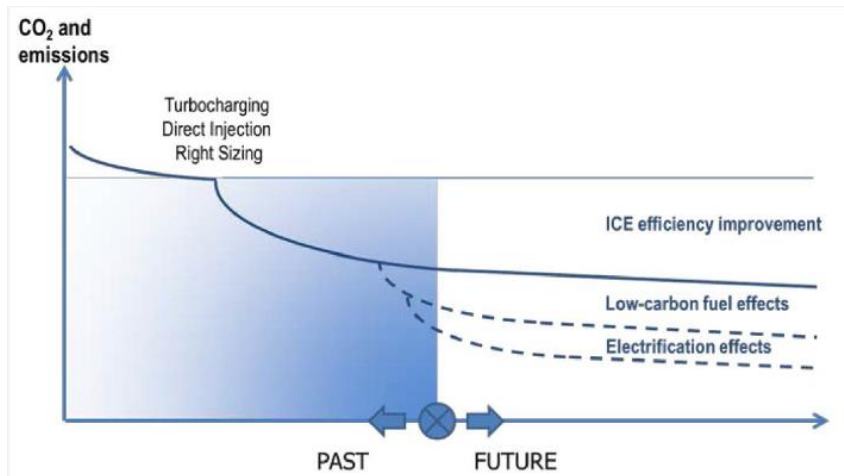


Quando facciamo l'analisi dei costi e benefici dobbiamo tener conto della **disparità degli effetti**.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Quindi - considerando l'immagine iniziale dell'analisi costi e benefici - dato che l'obiettivo va raggiunto negli anni, vengono scelte prima le tecnologie che costano meno e danno un beneficio maggiore e poi tutte le altre in un secondo momento. Tutti i costruttori hanno un proprio diagramma.

### - Roadmap generale

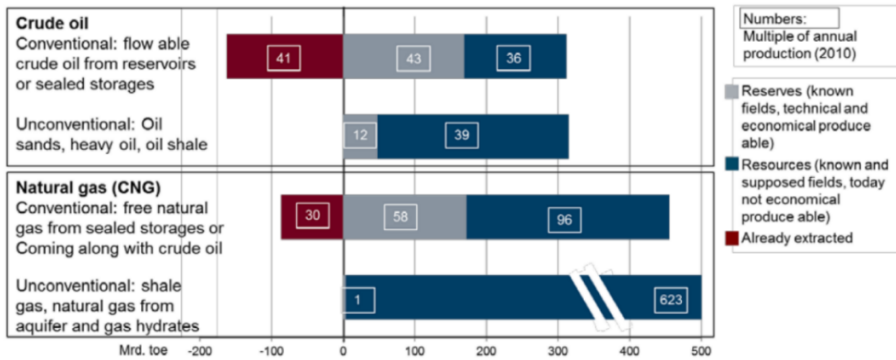


Questa, per esempio, è una **roadmap generale** non di un singolo costruttore, ma viene pubblicata da una **piattaforma tecnologica che si chiama ERTRAC**, specializzata per il trasporto su strada; costruttori ed enti di ricerca collaborano su questa piattaforma e periodicamente emettono delle **roadmap generali** (abbastanza in linea con le roadmap dei singoli costruttori).



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**- Riserve e risorse energetiche stimate**

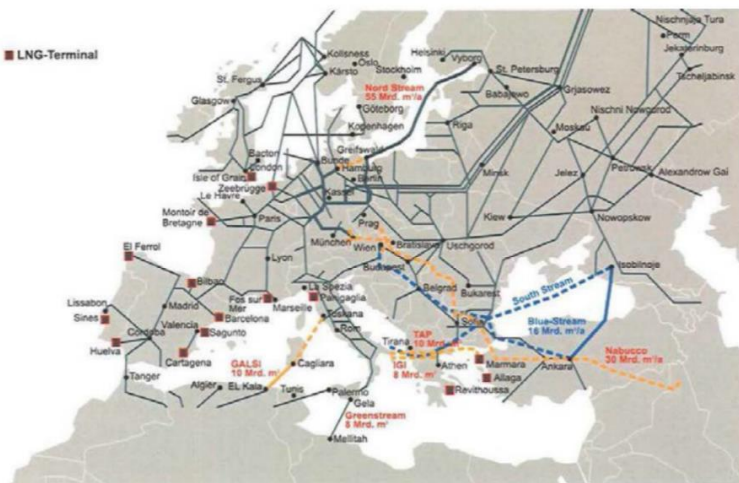


In alto abbiamo il petrolio in basso il gas naturale.

Guardando al futuro ci sono barre di colore differente: il grigio rappresenta le riserve e il blu le risorse.

Le riserve sono dei giacimenti noti che attualmente, con le attuali tecnologie e agli attuali costi possono essere direttamente disponibili e sfruttabili. Le risorse sono quelle ipotizzate (possibili con nuove tecnologie). Si apre anche un discorso di geopolitica inerente alla disponibilità di risorse. Noi in Italia non abbiamo risorse di petrolio ma di gas naturale.

**- Condotture principali di CNG e terminali di LNG in Europa**



**CNG: Compressed Natural Gas**  
**LNG: Liquefied Natural Gas**

Nota: il gpl non è un gas naturale; deriva dal petrolio (Inoltre, compresso a pochi [bar] diventa liquido).

La densità di un gas è molto inferiore alla densità di un liquido. Di conseguenza, a parità di volume (che può essere un serbatoio per esempio), è più conveniente avere un gas allo stato liquido in termini di disponibilità energetica e quindi di autonomia.

Il CNG, per autovetture, è compresso a circa 200 [bar]. Come viene distribuito? Attraverso un metanodotto il gas compresso arriva alle stazioni di rifornimento e attraverso un compressore viene immesso nei serbatoi delle autovetture (che devono quindi resistere a questi 200 [bar], costruiti dunque con materiali compositi leggeri preferibilmente).

Il gas naturale non può essere liquefatto a meno che non venga refrigerato con tecniche criogeniche (bisogna portarlo a circa -180 [C]). Il problema è come mantenerlo e trasportarlo a basse temperature. Questo avviene principalmente tramite il trasporto marittimo su nave (metaniera). Dopo di che, giunto ai LNG Terminal, può essere gassificato e immesso nei metanodotti.

Per cui LNG utilizzato sulle vetture è un po' complicato. Viene utilizzato per lo più nei camion a lunga percorrenza che, nell'arco di poco tempo, consumano l'intero serbatoio prima di un nuovo approvvigionamento in uno dei punti pianificati dov'è possibile trovare il gas naturale in forma liquida.

Ci sono dunque i cosiddetti "blue corridor" per la percorrenza dei camion che usufruiscono del LNG.

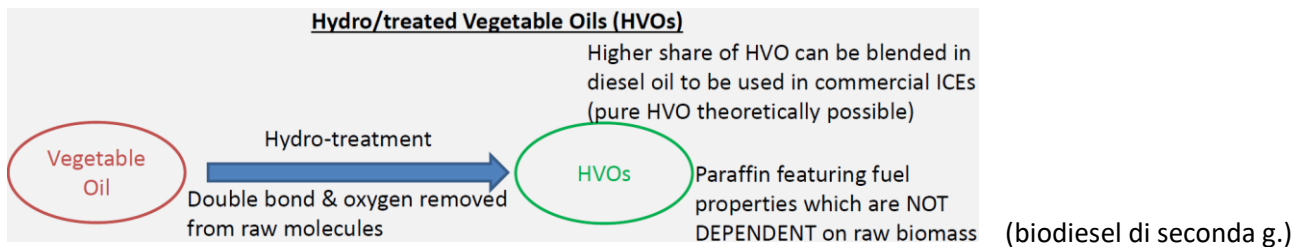
Da qui viene fuori l'importanza delle infrastrutture (anche per quanti riguarda il CNG).

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Le proprietà della molecola di metilestere sono molto simili a quelle di un gasolio ma conservano tracce della biomassa di partenza. Normalmente non si può utilizzare pura ma si mescola con il gasolio immettendone un quantitativo per il 7% (**blending whole**). Non se ne può mescolare troppo perché altrimenti risulterebbe difficile progettare un motore che funzioni allo stesso modo con entrambi.

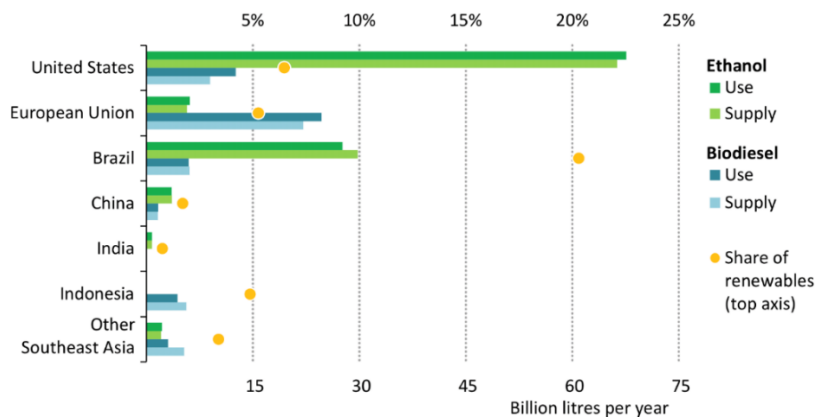
Il futuro prevede **trattamenti diversi**:

Viene fatto un **idro-trattamento dell'olio vegetale**, ottenuto da una biomassa di partenza, che permette di rompere tutti i doppi legami della molecola di partenza, **rimuovere tutto l'ossigeno** e ottenere così una **paraffina**, chiamata **HVO (Hydro-treated Vegetable Oil)**.



L'HVO è un diesel ottimo. Teoricamente non c'è un blending whole e si potrebbe utilizzare al 100%. Il **blending whole viene fatto per un discorso di costi** più che per il funzionamento in un quantitativo del **10-15%**. Esempio di carburante derivante da HVO è il **“green diesel”**.

**- Produzione e consumo di biocombustibili nel mondo allo stato odierno (2017)**

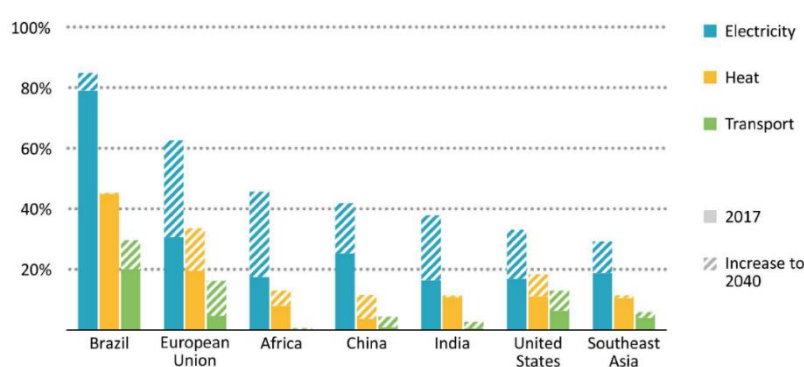


Il **biodiesel** è il biocombustibile naturale sostituto del diesel (soprattutto FAME; si inizia a parlare di HVO); il **bioetanolo** è il biocombustibile naturale sostituto della benzina.

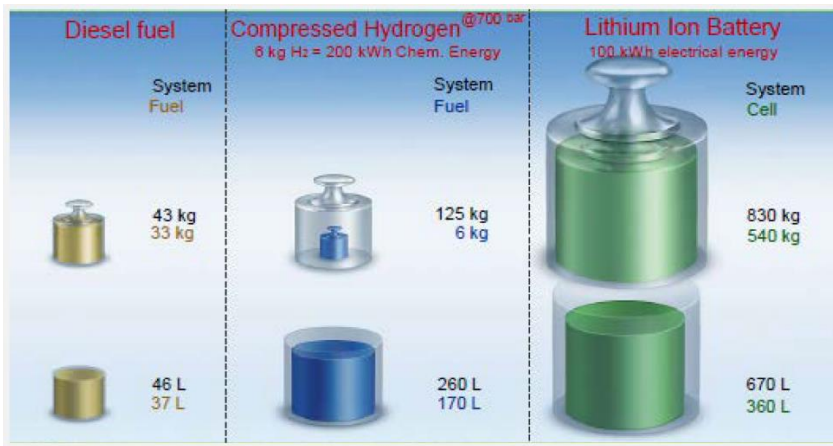
Le barre si leggono in riferimento dell'ascissa in basso (miliardi di litri all'anno).

I pallini si leggono in riferimento dell'ascissa in alto. Rappresentano la % in base all'impiego comune.

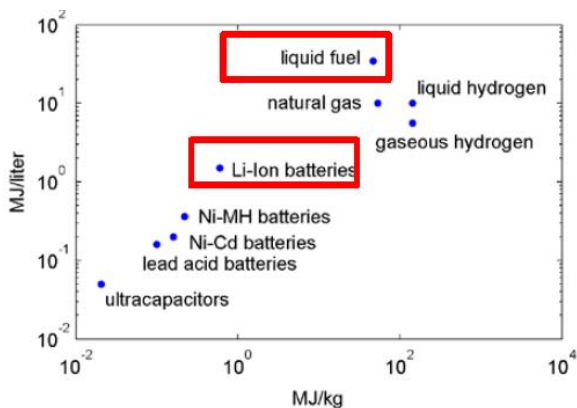
**- Aspettative di utilizzo dell'energia rinnovabile nel mondo (2017 -2040)**



**- Sistemi di accumulo dell'energia per percorrere 500 [km]**



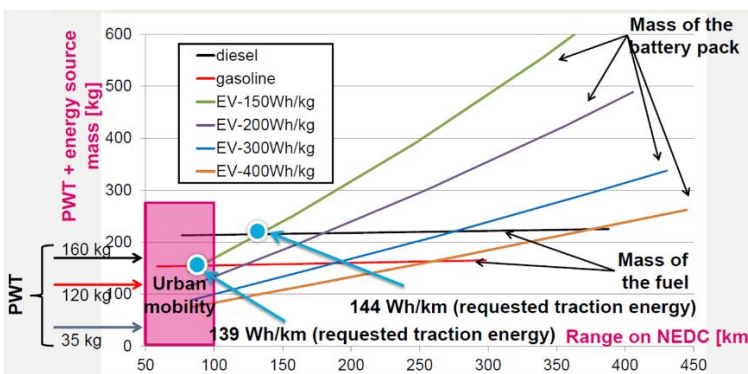
33 [kg] per il Diesel e 540 [kg] per l'elettrico. Dipende dalla densità energetica:



Oggi giorno le batterie hanno una densità energetica a livello di cella di circa: 250-300 [Wh/kg].

Un altro aspetto è rappresentato dai 43 [kg] per il Diesel e 830 [kg] per l'elettrico. Dipende dal sistema di immagazzinamento. L'elettrico ha un peso di 830 [kg] a livello di sistema perché la batteria deve essere condizionata termicamente; deve stare, durante il funzionamento e durante la ricarica, sempre alla stessa temperatura (o in un range di T molto ristretto); dunque ha bisogno del cosiddetto **Battery Management System (BMS)** (sistema di condizionamento del pacco batteria).

I conti visti precedentemente sono stati fatti a parità di peso. Prendiamo in considerazione il seguente grafico:



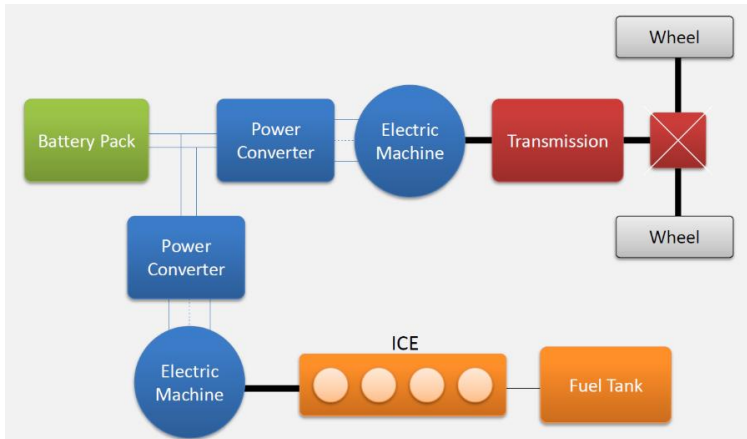
Prendendo come rif. una vettura Diesel (nero): il suo peso di 200 [kg] (che non tiene conto dello chassis) cambia poco (30 [kg]) a seconda di quanti [km] si vogliono percorrere. Punto di intersezione delle curve nera e verde: stesso peso, stessi [km]. Il peso per il diesel cambia di poco se vogliamo percorrere più [km] mentre per l'elettrico il peso cresce molto rapidamente. [Rif. NEDC ripetuto]

La curva per il Diesel è quasi piatta; Avendo le batterie una densità energetica molto inferiore, più [km] si vogliono fare più peso a bordo bisogna mettere; quindi le curve rappresentanti veicoli elettrici che montano diverse batterie (tenuto in conto anche il peso del Battery Management System) risultano molto inclinate (ci sono più curve perché tengono conto della densità energetica delle batterie).

## 1.9 Ibridi (HEV: Hybrid Electric Vehicle)

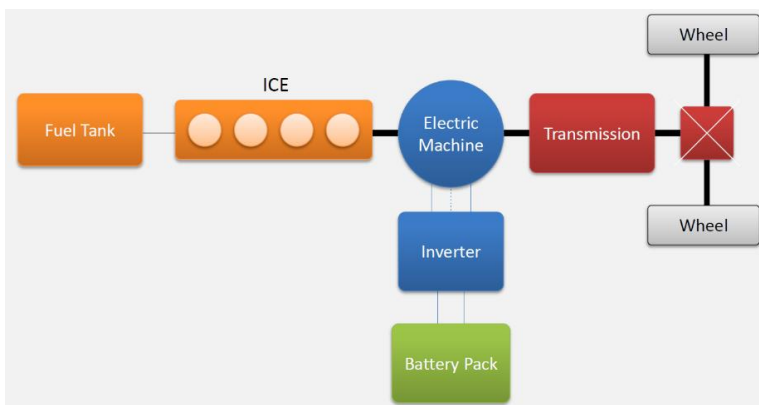
- Veicolo ibrido Serie
- Veicolo ibrido Parallelo
- Frenata rigenerativa
- Funzioni e classificazione
- **Veicolo ibrido Serie**

Nota: distinguiamo tra:  
Ibridi Serie e ibridi Parallelo  
Ibridi e ibridi Plug-in



- La macchina elettrica funziona come **generatore**: invece di (/oltre che) collegare la batteria alla presa, **viene acceso il motore termico che ricarica la batteria**.
- Il motore termico non è meccanicamente collegato alle ruote; quindi non fornirà mai potenza meccanica: tutta la dinamica del veicolo è gestita dalla macchina elettrica di trazione (quella che precede la trasmissione).
- Quindi il motore ICE ha una funzione energetica e serve per allungare l'autonomia (Range Extender).
- Questa soluzione può essere conveniente per piccoli veicoli che non richiedono ricariche rapide, quindi molta potenza, in modo tale che il motore termico possa avere dimensioni contenute.

### - Veicolo ibrido Parallelo



- La macchina termica e la macchina elettrica sono collegate meccanicamente, e meccanicamente sono collegate alle ruote: entrambi possono fornire potenza alle ruote e le loro potenze si sommano.
  - Un ibrido Parallelo è un abilitatore del **Downsizing** e del **Downspeeding**.
- A parità di potenza del powertrain possiamo mettere un motore termico più piccolo (Downsizing). Inoltre il motore elettrico ha una caratteristica di coppia più favorevole alla trazione: può aiutare il termico dove ha più problemi; si può pensare di fare i rapporti più lunghi al cambio (Downspeeding) oppure addirittura di pensare a un esclusivo funzionamento in elettrico a basse velocità e attivare il termico quando necessario.
- In questo caso è più il motore elettrico che dà una mano al termico rendendolo anche più efficiente.
  - Rispetto all'ibrido Serie c'è il risparmio di una macchina elettrica.

## 2. Motori SI: Spark Ignition

### 2.1 Processo di combustione nei motori SI

### 2.2 Emissioni primarie da motori SI

### 2.3 SI: Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>)

### 2.4 SI: Idrocarburi incombusti (HC)

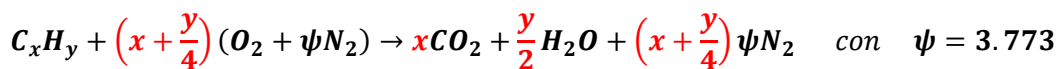
### 2.5 SI: Ossido di Carbonio (CO)

### 2.6 SI: Particolato (PM)

### 2.1 Processo di combustione nei motori SI

- Reazione di combustione
- Processo di combustione
- Processo di propagazione del fronte di fiamma
- Fronte di fiamma: da laminare a turbolento
- Evoluzione dell'iniezione nei motori SI
- Detonazione (abnormal combustion) nei motori SI
- Valori tipici dei principali parametri per diverse classi di ICE

#### - Reazione di combustione [ ↓ LEZIONE 05: 16/10/19 ]



Un idrocarburo reagisce con l'aria dando anidride carbonica, acqua e azoto.

La formazione di inquinanti deriva dal fatto che questa combustione non è completa.

La **combustione reale** dà origine a: **HC, CO, NO<sub>x</sub>** (gassosi) e **PM10** (solidi)

Questi rappresentano la categoria degli **inquinanti primari**.

#### - Processo di combustione

Normalmente i Motori ad accensione comandata, SI (Spark Ignition) (Benzina), operano con **combustibili** che sono caratterizzati da una **bassa reattività**: l'avvio del processo di combustione deve essere **comandato esternamente**; questi combustibili sono **poco propensi ad autoaccendersi**.

I combustibili interessati sono:

- di origine fossile: **benzina, gas naturale, gpl**;
- tra i biocombustibili: **biogas e bioetanolo** (aggiunto in parte alla benzina)

Innanzitutto si crea una **miscela di aria e combustibile, normalmente omogenea (più di recente anche opportunamente stratificata)**. Questi **combustibili devono avere la capacità di evaporare facilmente a temperatura e pressione ambiente** in modo da formare insieme all'aria una miscela combustibile.

**Durante la fase di compressione** questa miscela raggiunge temperature relativamente elevate, dell'ordine dei **700 [K]**, e pressioni relativamente elevate, dell'ordine dei **20-40 [bar]**, T e p non sufficienti a determinare un'accensione spontanea.

**L'autoaccensione non avviene per via della struttura molecolare dei combustibili**. Normalmente questi combustibili sono caratterizzati da **catene corte, compatte e rigide** (esempio il CH<sub>4</sub>) (quindi richiedono più tempo per reagire e condizioni più estreme per accendersi). L'accensione viene comandata da una **candela**.

È necessario, tramite una candela, fornire una **quantità di energia (10 [mJ])**, molto piccola se comparata all'energia sprigionata dal processo di combustione (**1 [kJ]**), per avviare il processo.

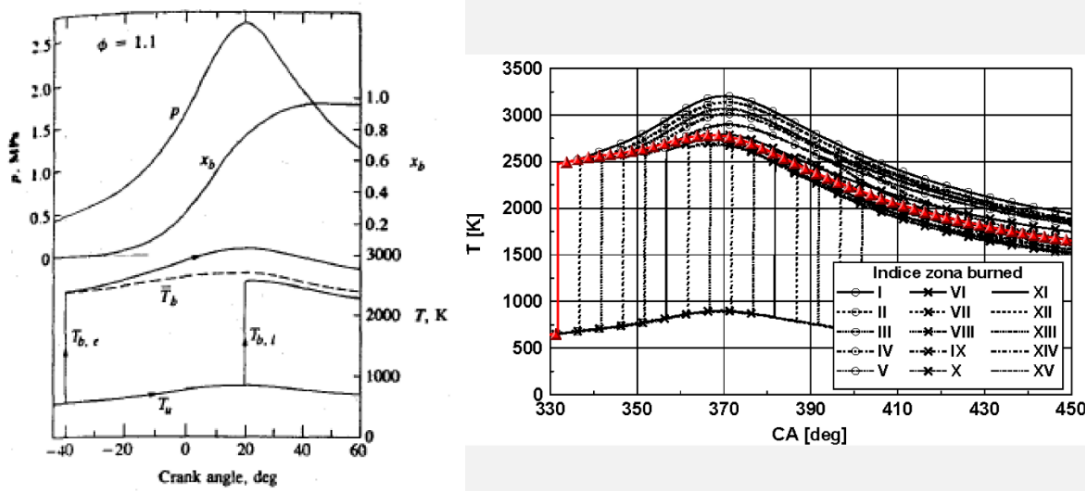
Partita la combustione, questa procede lungo la camera di combustione: **processo di propagazione del fronte di fiamma**.



Quindi il momento di spark va scelto in modo da massimizzare questo processo, per massimizzarne l'efficienza. Esiste quindi un **anticipo di accensione** che è quello che fornisce la **massima coppia (MBT timing: Maximum Brake Torque timing)**.

Nel grafico notiamo che c'è una dispersione ciclica considerevole della **pressione media** che c'è all'interno della camera. Questa variabilità dev'essere contenuta. Bisogna stimare il **COV della PMI** (Pressure Mean Indicator), ovvero il Coefficient Of Variation della PMI. Questo **COV** deve essere al di sotto di un certo valore percentuale che normalmente è dell'ordine del **5-10%**.

**- Parametri del processo di combustione**



Valutati istante dopo istante:

1) **Pressione in camera (p)**: nel grafico è riportata la media delle pressioni nei singoli cicli.

2) **Frazione di massa bruciata ( $x_b$  o MFB: Mass Fraction Burnt)**:

$$x_b = \frac{m_b}{m_{tot}} \quad \text{con } m_b: \text{massa dei burned gas}; m_{tot}: \text{massa totale in camera}$$

Quando il processo inizia è zero e quando finisce vorremmo che sia 1, quindi che  $m_b = m_{tot}$

È quindi un **indicatore di come viene rilasciata l'energia chimica** durante il processo.

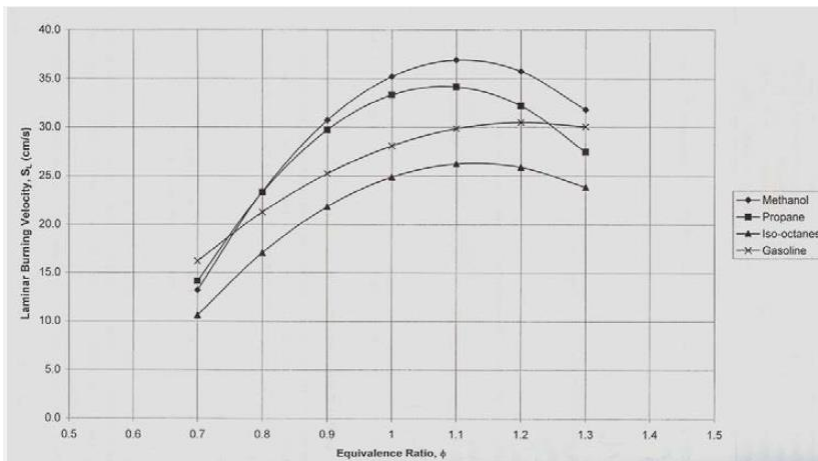
Sulla base di  $x_b$  si possono determinare degli **angoli caratteristici della manovella**: MFB1, MFB10, MFB50, MFB90 sono gli angoli ai quali si realizza  $x_b = 1\%, 10\%, 50\%, 90\%$ .

3) **Temperatura in camera**: è molto difficile da misurare direttamente per cui spesso la si ricava. Si ricavano distinte: la **temperatura degli unburned gas ( $T_u$ )** e la **temperatura dei burned gas ( $T_b$ )**.

Una **prima massa** che brucia, che nasce come unburned gas, avviato il processo, diventa burned: si porta ad **alta temperatura** e in prima battuta si può dire a **pressione costante**; ne segue un **aumento di pressione**, per cui aumenta leggermente la **temperatura degli unburned gas**. Man mano che le altre masse bruciano vi è **sempre più un aumento di pressione** e la prima massa si porterà a **temperature più alte (linea continua)** rispetto alle successive poiché queste la comprimono sempre di più. Quindi la **prima massa che brucia** è quella che si mantiene alle **temperature più alte** di tutte. Per effetto opposto, **l'ultima massa che brucia**, è quella che si tiene alle **temperature più basse**.

Si definisce una **temperatura media dei burned gas ( $\bar{T}_b$ )** qui rappresentata con la linea tratteggiata. Nella figura di destra sono definite le **temperature puntuali delle varie masse**. Il calcolo di queste è possibile con **due approcci limite diversi**: **approccio Fully Mixed**: le masse appena si creano istantaneamente si mescolano; quindi unica zona, unica temperatura (non è così). L'altro approccio è il **Fully Unmixed**: le masse come si creano non si mischiamo e viaggiano per conto proprio. Il rilevamento delle temperature risulta più complicato.

**- Fronte di fiamma: da laminare a turbolento**



In alto sono mostrati i tipici valori di velocità laminare per alcuni combustibili (metanolo, propano, iso-ottano, e benzina)

Sull'asse delle ordinate: velocità laminare di combustione [cm/s] (picchi tra 25 e 40 [cm/s])

Sull'asse delle ascisse: rapporto di equivalenza  $\Phi$

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} : \text{equivalence ratio}$$

$$\lambda = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = \frac{\text{Air/Fuel}}{\text{Air/Fuel}_{st}} = \frac{\text{Fuel}_{st}}{\text{Fuel}} : \text{relative air fuel ratio}$$

il valore stechiometrico si ottiene bilanciando l'equazione della reazione di combustione, ottenendo quindi le parti dei vari componenti:

| Fuel        | Lower Heating Value LHV [MJ/kg] | Stoichiometric A/F ratio | Energy Parametre LHV / A/F [MJ/kg] |
|-------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Gasoline    | 44,0                            | 14,6                     | 3,01                               |
| Diesel      | 42,5                            | 14,5                     | 2,93                               |
| Methanol    | 20,0                            | 6,5                      | 3,07                               |
| Ethanol     | 27,0                            | 9,0                      | 3,00                               |
| Natural gas | 50,0                            | 17,2                     | 2,90                               |
| Hydrogen    | 120,0                           | 34,3                     | 3,50                               |

Se la miscela è stechiometrica:  $\lambda = 1$

Se è povera di combustibile:  $\lambda > 1$  : miscela povera (ricca d'aria)

Se è ricca di combustibile:  $\lambda < 1$  : miscela ricca

Quindi, essendo  $\Phi$  il duale di  $\lambda$ :

Se la miscela è stechiometrica:  $\Phi = 1$

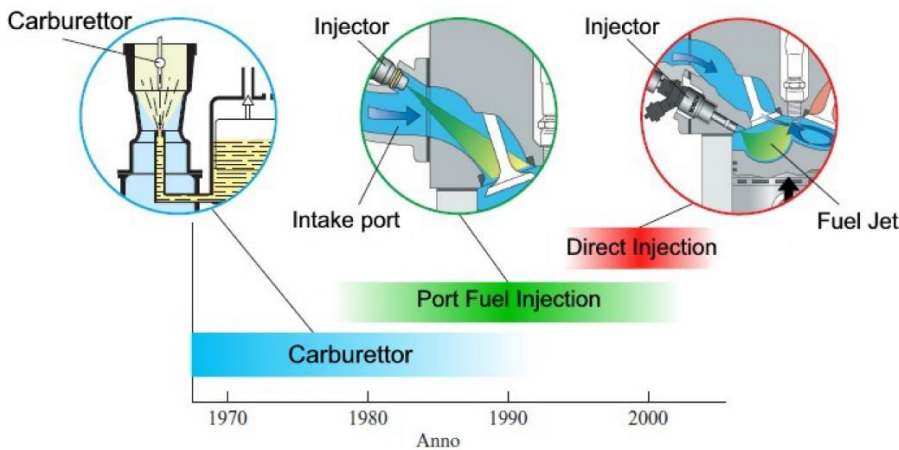
Se è povera di combustibile:  $\Phi < 1$  miscela povera (ricca d'aria)

Se è ricca di combustibile:  $\Phi > 1$  miscela ricca

Analizzando il grafico:

Notiamo che **tutte le curve hanno un massimo verso il ricco  $\Phi > 1$** . Se ci allontaniamo la velocità laminare diminuisce. Questa velocità laminare, anche nel suo picco, prendendo per esempio la benzina, corrispondente circa a 30 [cm/s], non sarebbe sufficiente a propagare la reazione in tutta camera (considerando il fatto che per compiere 60 gradi di manovella abbiamo una frazione di secondo).

### - Evoluzione dell'iniezione nei motori SI



**PFI: Port Fuel Injection:** iniezione indiretta: l'iniettore è posto nel collettore di aspirazione il più vicino possibile alla testa. Il combustibile è iniettato nel port.

**DI: Direct Injection:** iniezione diretta: il combustibile è iniettato in camera tramite un opportuno iniettore. Questo iniettore può iniettare o **carica omogenea**, se si vuole raggiungere sempre lo stesso target, per esempio di **potenza**, oppure una **carica stratificata** se si vuole raggiungere sempre lo stesso target di **efficienza** (il combustibile viene iniettato verso la candela dove quindi si crea una zona ricca; una volta che parte la combustione creiamo una **zona più povera in modo da ottimizzare i consumi**). La scelta tra carica omogenea e carica stratificata influenza altre scelte. Il motore va sempre studiato parallelamente al sistema di post-trattamento. Se scegliamo di usare motori stechiometrici possiamo usare i three-way catalyst (tecnologia consolidata dagli anni '90), efficienti ed economici; se scegliamo la carica stratificata non possiamo più utilizzare questi catalizzatori e abbiamo difficoltà a controllare gli ossidi di azoto (vedremo più avanti nel dettaglio).

Poiché ci stiamo spostando progressivamente, per motivi di Requirements in termini di  $CO_2$ , verso motori a iniezione diretta, incomincia a diventare importante anche per i motori a benzina la formazione del particolato (in particolare il numero di particelle). Si prevede che anche i motori a benzina a iniezione diretta saranno tutti forniti di un filtro antiparticolato per poter rispettare la normativa.

### - Detonazione (Abnormal combustion) nei motori SI

Si tratta di combustioni anomale con delle propagazioni di **onde** che possono danneggiare il motore.

In caso di detonazione, la combustione della miscela viene avviata dalla candela di accensione. Con l'incremento di pressione e temperatura della miscela non ancora bruciata, causata da pressione di combustione e calore indotto, avviene una **seconda combustione**, quasi "**parallela**", all'interno del cilindro. Quando i due fronti di fiamma si incontrano, si creano intense onde di pressione ad alta frequenza. Tali onde creano un caratteristico suono metallico e la pressione nel cilindro aumenta notevolmente. La combustione dovuta alla detonazione **può portare nei cicli successivi a una preaccensione**, a causa delle alte temperature di combustione.



## **2.2 Emissioni primarie da motori SI**

### **- Presentazione**

#### **2.3 SI: Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>)**

#### **2.4 SI: Idrocarburi incombusti (HC)**

#### **2.5 SI: Ossido di Carbonio (CO)**

#### **2.6 SI: Particolato (PM)**

La **formazione di NO<sub>x</sub>** (Mix di NO e NO<sub>2</sub>) è il risultato dell'ossidazione dell'azoto presente nell'aria aspirata ad alta temperatura ( $T > 2000 [k]$ ). In particolare avviene **nei gas combusti** (burned gas) **ad alta temperatura** dietro il fronte di fiamma: più alti sono i valori di T e ossigeno disponibile, più alto sarà il tasso di formazione degli NO.

Gli **idrocarburi incombusti (HC)** (incombusti o parzialmente combusti, idrocarburi di specie diverse) sono prodotti da una **varietà di fenomeni**: intrappolamento della miscela nelle fessure o nello strato di tempra alle pareti della camera di combustione o assorbimento della miscela dallo strato di olio sulla superficie del rivestimento.

La **formazione di CO** è dovuta alla **combustione incompleta causata dall'uso di una miscela ricca di combustibile** ( $\lambda < 1$ ). Anche la **dissociazione di CO<sub>2</sub>** che avviene ad alte temperature ( $T > 1900 [k]$ ) può contribuire significativamente.

Nota: SI: **Particolato (PM)**: emissioni trascurabili. Il Particolato include anche gli Ossidi di Zolfo (SO).

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Nei combustibili in cui sono presenti percentuali significative di azoto, i composti contenenti azoto costituiscono una fonte addizionale per la formazione di NO. Le benzine contengono quantitativi trascurabili di azoto. [Preview]: nonostante i gasoli contengano percentuali di azoto maggiori, tali percentuali non sono tali da dare contributi importanti alla produzione di NO.

I principali parametri che determinano la quantità degli NO prodotti da questi processi sono:

- La storia temporale dei gas combustibili in camera di combustione e, in particolare, il valore del picco della temperatura dei gas combustibili raggiunto durante la combustione (**Temperatura, Tempo**);
- A parità di temperatura di combustione, la concentrazione di ossigeno in camera (**Radicali Ossigeno**);

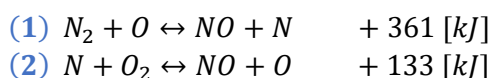
**- Storia: modelli del processo di formazione degli NO**

I primi studi sulla produzione di NO nei motori ad accensione comandata (SI) avevano individuato delle correlazioni tra i livelli di NO misurati allo scarico e i principali parametri di funzionamento del motore: dosatura, anticipo di accensione, velocità angolare e pressione nel collettore di scarico (ad esempio: Hulsand Nickol, 1967; Hazenand Holiday, 1962; Alpersteinand Bradow, 1966; Wimmerand McReynolds, 1961).

Tali studi permisero una comprensione qualitativa del fenomeno. Ad esempio, si osservò che la modifica di quei parametri di funzionamento che producono un aumento del picco della temperatura del ciclo motore o che provocano un aumento della concentrazione di ossigeno nei gas combustibili comportano un aumento della concentrazione di NO nei gas di scarico.

Inoltre, si osservò che le concentrazioni di NO misurate allo scarico erano più prossime alle concentrazioni di equilibrio chimico corrispondenti al picco di temperatura e pressione nel ciclo motore piuttosto che alle concentrazioni di equilibrio corrispondenti alle condizioni allo scarico.

Newhall and Starkman (1967) proposero un primo modello "cinetico" della formazione degli NO, basato sul cosiddetto meccanismo di Zeldovich (1946): **ZM: Zeldovich Mechanism**



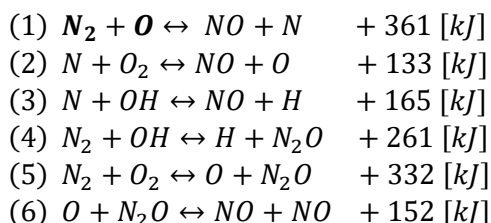
Gli atomi di ossigeno alle spalle del fronte di fiamma promuovono la decomposizione dell'azoto molecolare.

I livelli di NO allo scarico venivano determinati nell'ipotesi di un congelamento immediato delle concentrazioni calcolate alle condizioni corrispondenti al picco di pressione e temperatura dei gas combustibili, assunti a loro volta omogenei.

Tuttavia, è ormai riconosciuto che nelle normali condizioni di funzionamento dei motori, la "cinetica chimica" riveste un ruolo importante per quanto riguarda i processi di formazione e di decomposizione degli NOx nei "post-flame" gas. Dunque aggiungiamo al nostro studio ulteriori reazioni.

Da Lavoie propose di aggiungere la (3): **EZM: Extended Zeldovich Mechanism: meccanismo termico**.

L'approccio più utilizzato oggi per la stima degli NO nei motori a combustione interna, si basa sul: **modello cinetico a 6 equazioni proposto da Lavoie e altri (1970)**.



(Queste non sono le uniche reazioni possibili; potremmo scriverne 100/120)

**Ulteriori reazioni: Drake e Blindt (1991)** introdussero una reazione addizionale:



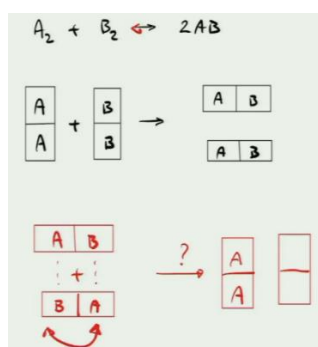
M indica una qualunque molecola che viene coinvolta negli urti molecolari e nelle interazioni energetiche. In condizioni di funzionamento con **miscele povere** e alte pressioni in camera di combustione, l'azoto molecolare  $N_2$  può ricombinarsi con l'ossigeno atomico O in presenza di altri composti gassosi M (per lo più lo stesso  $N_2$ ), dando luogo a  $N_2O$ .

L' $N_2O$ , reagendo a sua volta con l'ossigeno atomico, può dare luogo alla formazione di NO – vedi reazione (6) – oppure alla formazione di  $N_2$  – vedi reazioni (5) e (7).

Normalmente, le reazioni (5) e (7) che portano alla formazione di  $N_2$  prevalgono, tuttavia **all'aumentare della dosatura e di T, aumenta l'importanza della reazione (6)**.

Drake e Blindt (1991) stimarono che ad **alte p, in fiamme stechiometriche**, il meccanismo dell' $N_2O$  (6) può contribuire fino al **10-15%** della produzione complessiva di NO.

Dopo le reazioni principali, le successive (dalla (6) in poi diciamo), sono sempre meno rilevanti. Vi è una dipendenza dal **fattore sterico ( $aT^b$ )** che **tiene conto dell'orientamento degli urti**:



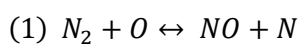
Nella reazione rossa, le molecole non possono urtarsi in un modo qualunque, ma **devono urtarsi in modo tale che A venga a toccarsi con A e B con B**; quindi il fattore sterico della reazione inversa (rossa) è sicuramente inferiore al fattore sterico della reazione diretta (nera).

SE le molecole che devono reagire diventano tre, allora il fattore sterico diminuisce ulteriormente.

Quindi, a sua volta, **k, costante di velocità di reazione, diminuisce**.

Quando siamo **ad alte temperature** anche la **velocità delle reazioni è elevata**, tale per cui si raggiunge velocemente l'equilibrio. **Quando le temperature scendono** (per effetto dell'espansione) le reazioni che hanno portato alla formazione di NO ripartono in direzione opposta e quindi gli NO che si sono formati si decompongono. Quindi il bilancio dovrebbe essere zero. Però **in questa fase di decomposizione non si riesce a raggiungere l'equilibrio chimico e alcune reazioni si possono congelare**. La diminuzione della temperatura in camera avviene così velocemente che NO si comincia a decomporre, ma anche la **velocità di reazione scende (con la T) e quindi lo NO non ha più il tempo di decomporsi ulteriormente e rimane presente allo scarico**. (se avesse un tempo infinito allora continuerebbe a decomporsi fino a raggiungere l'equilibrio).

Per poter descrivere correttamente il fenomeno, le reazioni chimiche non bastano; **bisogna aggiungere un modello cinetico** di queste reazioni. Le **velocità della reazione (1) diretta (+) e indiretta (-)** saranno date da:



$$v_1^+ = k_1^+ [N_2][O] : \text{velocità reazione diretta}$$

$$v_1^- = k_1^- [NO][N] : \text{velocità reazione inversa}$$

$$R_1 = v_1^+ = v_1^- = k_1^+ [N_2][O] = k_1^- [NO][N] : \text{velocità di reazione all'equilibrio}$$

Le prime 6 equazioni rappresentano tutte insieme il **meccanismo termico**, poiché dominato dalla temperatura e in particolare dalla storia temporale della temperatura. Un altro fattore importante è rappresentato dalla presenza di **radicali ossigeno**. La presenza di radicali ossigeno è più facile averla allo **stechiometrico** oppure nel **povero** piuttosto che nel ricco.

## - Modello termodinamico

La **temperatura dei gas combusti** è il principale fattore che influenza la **velocità di formazione degli NO**. Pertanto, per il calcolo delle velocità di formazione degli NO è necessaria un'accurata caratterizzazione dei gas in termini di pressione e temperatura successivamente al passaggio del fronte di fiamma.

Gli studi di Rassweiler e Withrow (1935) evidenziarono che **all'interno dei gas combusti è presente un sostanziale gradiente di temperatura ( $\Delta T \approx 200$  [K])** tra le frazioni di massa che bruciano in istanti di tempo diversi rispetto allo scoccare della scintilla. **Questo gradiente può essere simulato a livello modellistico.**

Il **mescolamento delle masse di gas bruciate** durante le successive fasi della combustione può essere descritto con due approcci limite:

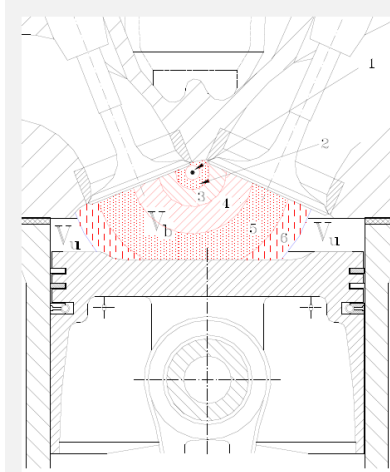
- Mescolamento rapido e completo (modello 'fully mixed')
- Assenza totale di mescolamento (modello 'fully unmixed')

Nell'ipotesi di mescolamento rapido e completo (corrispondente a **conducibilità termica infinita** all'interno dei gas combusti) il calcolo può essere effettuato considerando un'unica zona di gas combusti con temperatura e composizione uniforme.

Nell'ipotesi di assenza totale di mescolamento (corrisponde al caso limite in cui la **conducibilità termica all'interno dei gas combusti è pari a zero**) il calcolo può essere effettuato considerando zone multiple all'interno dei gas combusti che evolvono senza mescolarsi; **in questo caso la produzione complessiva degli NO è ottenuta integrando i contributi delle diverse zone.**

Le indagini sperimentali suggeriscono che l'effetto del mescolamento è molto ridotto e che il parametro principale che determina le velocità di formazione degli NO è rappresentato dalla storia temporale delle T di ciascuna zona di massa bruciata. **Quindi, la situazione reale è ben descritta da un caso intermedio tra l'assenza totale di mescolamento ed il mescolamento completo, che può essere modellato ipotizzando un numero opportuno di zone (5-15) che non si mescolano tra loro (approccio multi-zona).**

**Per ogni zona** andiamo ad applicare il **primo principio della termodinamica**, sia per zone di unburned e burned gas:



Conservazione dell'energia per la zona degli "unburned gas" (u):

$$-q_u A_u \frac{d\mathcal{G}}{\omega} + V_u dp = (1 - x_b) m dh_u$$

Conservazione dell'energia per la zona i-esima ( $i \neq n$ ) dei "burned gas" (b):

$$-q_{b,i} A_{b,i} \frac{d\mathcal{G}}{\omega} + V_{b,i} dp = m x_{b,i} dh_{b,i}$$

Conservazione dell'energia per la zona i-esima ( $i = n$ ) dei "burned gas" (b):

$$\begin{aligned} -q_{b,n} A_{b,n} \frac{d\mathcal{G}}{\omega} + V_{b,n} dp &= \\ &= m x_{b,n} dh_{b,n} + m dx_{b,n} (h_{b,n} - h_u) \end{aligned}$$

Le zone, escluse la 6 (ultima zona dei burned gas), possiamo ipotizzare che **evolvano a massa costante.**

Per quanto riguarda la **zona 6**:

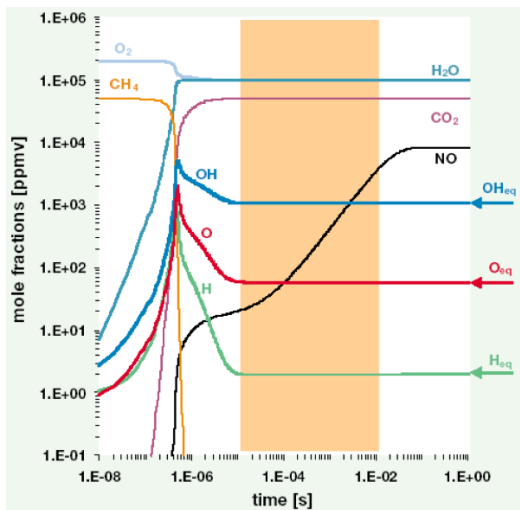
Alcuni unburned gas vengono inglobati sottoforma di burned gas; il valore dell'**entalpia cambia, poiché cambiano la composizione chimica e la temperatura.**

I **dh** degli unburned e burned gas sono legati solo al cambiamento della temperatura (potrebbero essere scritti come  $dh_u = c_{p,u} \Delta T$ ;  $dh_b = c_{p,b} \Delta T$ ). **Mentre per la zona 6** vi è un passaggio da unburned a burned per cui vi è una variazione entalpica a seguito anche del **cambiamento di energia interna chimica** ( $h = u + pv$ ).

(Di **sperimentale** abbiamo le pressioni e i volumi, il resto lo ricaviamo)

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Per un processo di combustione, analizziamo i tempi di reazione (qui il calcolo è stato fatto in un reattore non in un motore, a temperatura costante – quindi come se stessimo analizzando un'unica zona - i tempi sono pressoché simili ai tempi che si potrebbero avere in un motore. Quest'immagine ci serve per confrontare i **tempi necessari per portare alla formazione delle nuove molecole**):



Notiamo che O, H e OH, ovvero tutto ciò che è **legato alla combustione**, raggiungono l'equilibrio in tempi relativamente ridotti; invece la cinetica di formazione di NO è **decisamente più lunga**. Questo giustifica il fatto che quando stiamo facendo i calcoli nella **zona di pendenza massima**, le altre grandezze le consideriamo all'equilibrio:

$$[O_2]_e, [N_2]_e \text{ (presenti in grandi quantitativi nell'aria)}$$

$$[O]_e; [H]_e; [OH]_e$$

Considerando il sistema di eq. differenziali si fa un'ulteriore ipotesi: si pongono uguali a zero  $\frac{d[N]}{dt}$  e  $\frac{d[N_2O]}{dt}$ ; questo non vuol dire che N e N<sub>2</sub>O hanno raggiunto l'equilibrio ma che hanno raggiunto una **situazione più o meno stazionaria**, ovvero sono arrivati quasi a regime.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1^+[N_2]_e[O]_e - k_1^-[NO][N] + k_2^+[N][O_2]_e - k_2^-[NO][O]_e + k_3^+[N][OH]_e - k_3^-[NO][H]_e + k_6^+[O]_e[N_2O] - k_6^-[NO][NO]$$

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1^+[N_2]_e[O]_e - k_1^-[NO][N] - k_2^+[N][O_2]_e + k_2^-[NO][O]_e - k_3^+[N][OH]_e + k_3^-[NO][H]_e = 0$$

$$\frac{d[N_2O]}{dt} = k_4^+[N_2]_e[OH]_e - k_4^-[H]_e[N_2O] + k_5^+[N_2]_e[O_2]_e - k_5^-[O]_e[N_2O] - k_6^+[O]_e[N_2O] + k_6^-[NO][NO] = 0$$

Questa situazione ci consente di semplificare: le ultime due equazioni **da differenziali diventano algebriche**, permettendoci di ricavare alcuni valori al loro interno che andremo a sostituire nella prima equazione.

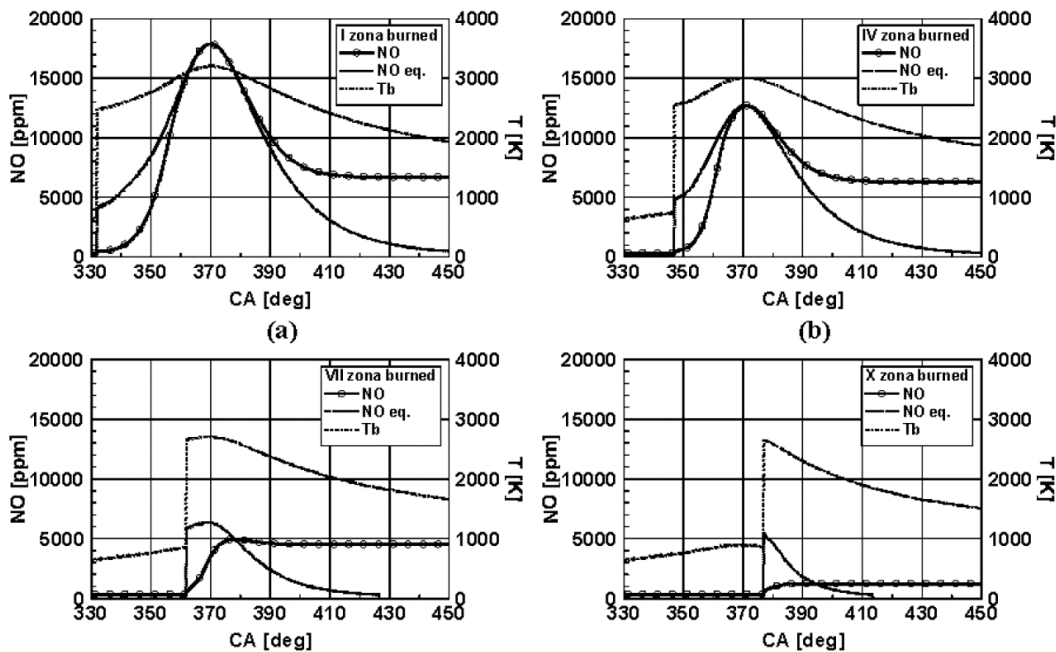
La **prima equazione** diventa un'equazione differenziale con **sola incognita [NO]**, quindi diventa un'equazione differenziale ordinaria che ci permette di ottenere la seguente soluzione:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2 \left\{ 1 - \left( \frac{[NO]}{[NO]_e} \right)^2 \right\} \left\{ \frac{R_1}{1 + \frac{[NO]}{[NO]_e} \frac{R_1}{R_2 + R_3}} - \frac{R_6}{1 + \frac{R_6}{R_4 + R_5}} \right\}$$

EZM ←                      N<sub>2</sub>O

Da dove salta fuori [NO]<sub>e</sub>? Nei molti passaggi ce n è uno per il quale multiplico e divido per [NO]<sub>e</sub> (artificio matematico); le R<sub>i</sub> indica la velocità all'equilibrio chimico della reazione diretta i ( R<sub>1</sub> = k<sub>1</sub><sup>+</sup>[N<sub>2</sub>]<sub>e</sub>[O]<sub>e</sub>). Il **primo addendo del secondo termine dipende dal meccanismo esteso di Zeldovich il secondo addendo dal meccanismo di formazione dello N<sub>2</sub>O intermediario**. R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub>, R<sub>6</sub> non sono costanti, dipendono dalla temperatura (attraverso i k, la T è presente nel fattore sterico e nel termine esponenziale). Quindi abbiamo un'equazione differenziale in funzione del tempo che di fatto dipende dalla temperatura (T). Le temperature ce le abbiamo perché ce le ha date il modello termodinamico.

## Analisi delle zone



I quattro grafici si riferiscono a zone diverse (I, IV, VII, X)

La linea tratteggiata rappresenta la temperatura dei burned gas e si legge sull'ordinata di destra [K].

La curva continua rappresenta lo NO all'equilibrio (può tornare utile per alcune considerazioni);

La curva con il pallino rappresenta lo NO calcolato mediante i modelli precedentemente descritti.

### Analizziamo la zona I:

la curva NO raggiunge rapidamente la curva NOeq. La temperatura, dove le curve si toccano, è sempre al di sopra dei 3000 [K]. Questo significa che per effetto delle alte temperature, la velocità delle reazioni è talmente elevata che il sistema si porta rapidamente in condizione di equilibrio, quindi il quantitativo di NO calcolato con il modello cinetico coincide di fatto con il livello di equilibrio.

Superato il picco le curve scendono poiché inizia la dissociazione di NO (la reazione ora è inversa, da destra verso sinistra). Al di sotto dei 3000 [K] la curva NO si scosta dalla curva NOeq. Perché si stanno congelando le reazioni di dissociazione dell'NO: la temperatura diminuisce, quindi anche la velocità di dissociazione diminuisce; la curva NO potrebbe raggiungere la curva NOeq. se avesse il tempo sufficiente. (il calcolo dello NOeq. è stato fatto tenendo conto solo della temperatura della zona interessata; alla fine, all'equilibrio, non avremmo più NO poiché, scesi a  $T = 0$ , saremmo tornati alla situazione di partenza  $N_2 + O$ )

### Analizziamo la zona IV:

La situazione è molto simile a quella della zona I.

### Analizziamo la zona VII:

Le curve non si sovrappongono: questo significa che le condizioni di equilibrio non si raggiungono mai. La curva NO non raggiunge la curva NOeq. neanche nel punto di temperatura massima. Di fatto sono proprio le reazioni di formazione che si congelano.

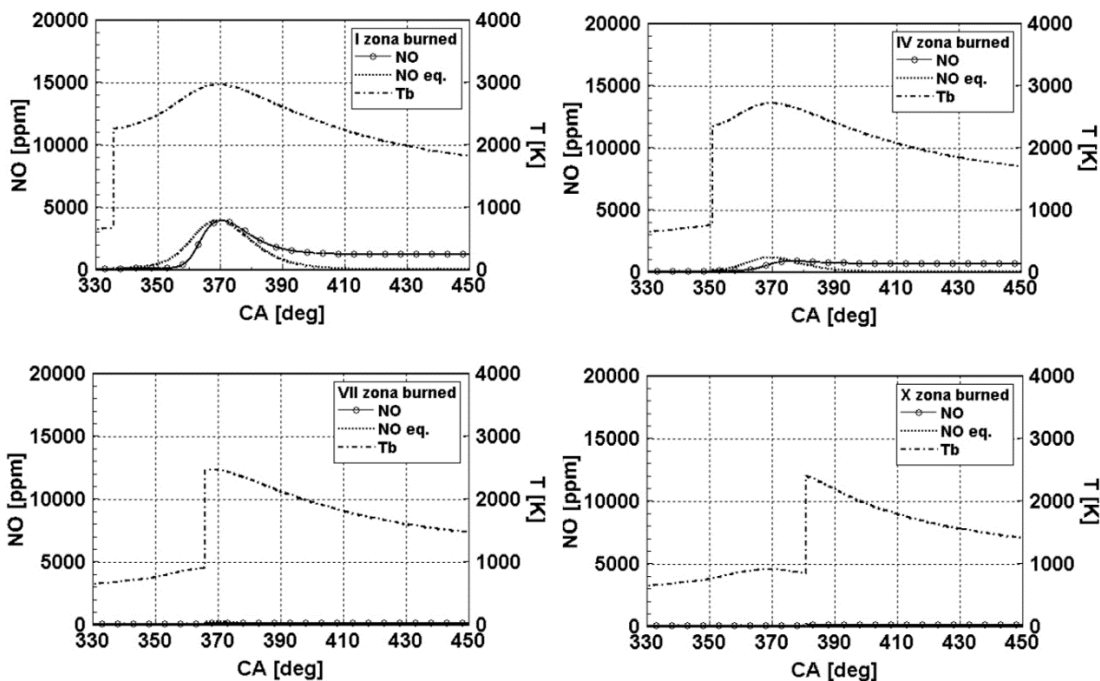
[Domanda (5) per il Prof.: non sarebbe più corretto dire anche qui che sono le reazioni di dissociazione che si congelano anziché le reazioni di formazione (dato che la curva NO sta scendendo)?] [Propriamente entrambe si congelano; se vi è un leggero picco significa che anche le reazioni di dissociazione sono partite]



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

[La reazione di ossidazione di un combustibile può essere organizzata in due parti: nella prima parte tutto il carbonio viene ossidato a  $CO$ , nella seconda parte il  $CO$  diventa  $CO_2$ . Sono due step esotermici, però avvengono separatamente. Il primo è velocissimo, il secondo un po' più lento. Quindi se ci spostiamo leggermente nel ricco non abbiamo l'ossigeno sufficiente per far diventare il C tutto  $CO_2$ , ma è comunque sufficiente per farlo diventare tutto  $CO$  nel primo step. Mettiamo più combustibile, il carbonio diventa tutto  $CO$ ; una parte di questo diventerà  $CO_2$ . A conti fatti riusciamo a liberare più energia chimica per cui le temperature salgono. Se però si esagera non riusciamo ad ossidare tutto il C in  $CO$  e conseguentemente le temperature scendono.]

**Analisi delle zone**



I quattro grafici si riferiscono a zone diverse (I, IV, VII, X)

La linea tratteggiata rappresenta la temperatura dei burned gas e si legge sull'ordinata di destra [K].

La curva continua rappresenta lo NO all'equilibrio (può tornare utile per alcune considerazioni);

La curva con il pallino rappresenta lo NO calcolato mediante i modelli precedentemente descritti.

**Analizziamo la zona I:**

Innanzitutto notiamo che il massimo della curva  $NO_{eq.}$  è molto più basso rispetto al corrispettivo del caso  $\lambda = 1$ .  $NO_{eq.}$  traduce l'effetto della temperatura e della disponibilità di ossigeno. La curva NO raggiunge l'equilibrio (3000 [K] sono sufficienti per il tempo a disposizione). Quando la temperatura diminuisce inizia il processo di dissociazione dello NO. Successivamente le reazioni di dissociazione si congelano.

**Analizziamo la zona IV:**

Notiamo che già nella quarta zona le reazioni di formazione dello NO si congelano.

Lo stesso capita per la zona VII e la zona X.

Quindi tolte le primissime zone, la I e forse la II, il congelamento avviene già a livello di formazione dello NO.

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Quindi il livello di NO all'equilibrio è elevato per via dell'ossigeno, il livello di velocità di formazione è plafonata dal fatto che abbiamo delle temperature più basse, per cui **non vi è sufficiente tempo per il raggiungimento dell'equilibrio**.

[Domanda (6bis) per il Prof.: anche qui il mio dubbio/incomprensione. La presenza di un picco dovrebbe significare che alcune reazioni di dissociazione hanno avuto origine. Per cui non dovremmo dire che sono le reazioni di dissociazione a congelarsi?] [Entrambe si congelano]

In definitiva, possiamo dire che per le miscele stechiometriche e ricche, soprattutto per le prime zone, sono importanti sia le reazioni di formazione che di dissociazione (bisogna simulare tutte e due perché l'effetto finale è un equilibrio delle due), **invece, per le miscele povere, risulta determinante la cinetica chimica della formazione (perché è quella che si congela)**.

**Confronto tra le tre miscele esaminate – massima produzione di NO**

(picco  $T \uparrow$ : legg. Ricco 3300 [K], stechiometrico 3200 [K], ricco 3000 [K], povero 2800 [K])

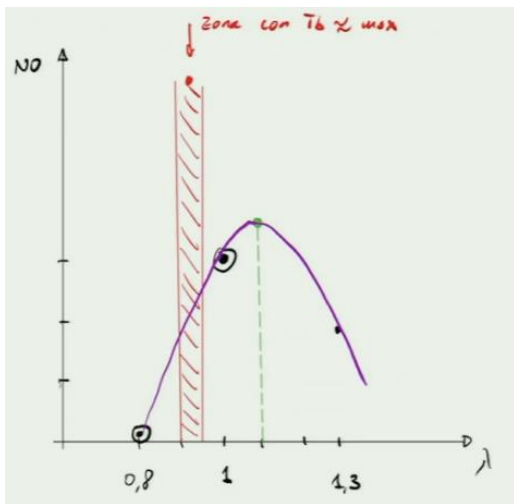
(picco  $NO_{eq} \uparrow$ : stechiometrico  $\sim 17500$  [ppm]  $\leftrightarrow$  povero  $\sim 17500$  [ppm], ricco  $\sim 4000$  [ppm])

Stechiometrico:  $\lambda = 1$  : Il livello medio di NO allo scarico  $\sim 3000$  [ppm]

Ricco:  $\lambda = 0.80$  : Il livello medio di NO allo scarico  $< 1000$  [ppm]

Povero:  $\lambda = 1.3$  : Il livello medio di NO allo scarico  $\sim 2500$  [ppm]

Tipico andamento della produzione di NO in funzione della dosatura  $\lambda$ :



Uno studente ipotizza che la produzione massima di NO sia nel leggermente ricco, per via della alta temperatura. Però bisogna tener conto del secondo parametro, l'ossigeno.

Chi prevale tra temperatura e ossigeno? Abbiamo **massima produzione di NO nel povero, per  $\lambda = 1.1$**

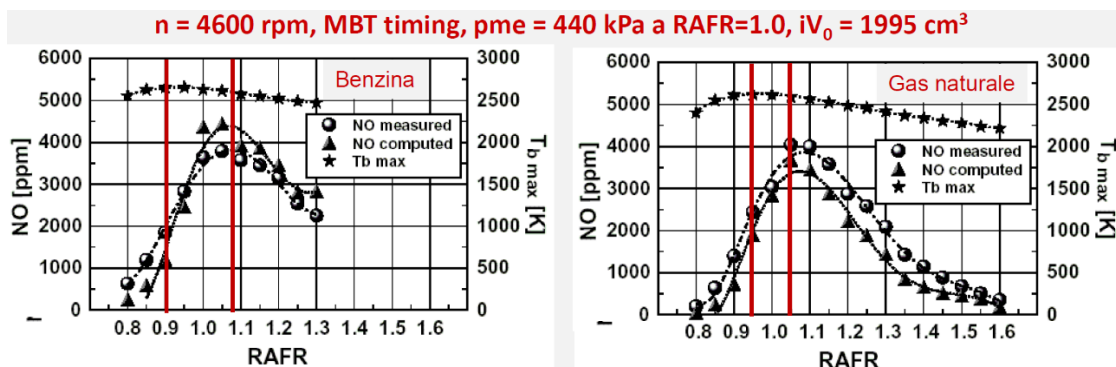
[Domanda (7) per il Prof.: se stiamo considerando la linea media a me sembra che i valori medi allo scarico siano 3000,  $< 1000$ , 2500 [ppm] anziché 300,  $< 100$ , 250 [ppm] (valori sentiti durante la videolezione). Stiamo forse esaminando i valori dell'ultima zona?] [No; i valori corretti sono 3000,  $< 1000$ , 2500 [ppm]]

[Domanda (8) per il Prof.: il livello medio è quel che otteniamo all'incirca allo scarico? Non dobbiamo sommare i prodotti di tutte le zone NO?] [Non dobbiamo sommare i prodotti in quanto stiamo ricercando un valor medio di quel che fuoriesce istantaneamente dallo scarico (una zona "segue" l'altra)]



### 1) Dosatura

$$\lambda = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = \frac{Air/Fuel}{Air/Fuel_{st}} = \frac{Fuel_{st}}{Fuel} : \text{RAFR: Relative Air Fuel Ratio (o dosatura)}$$

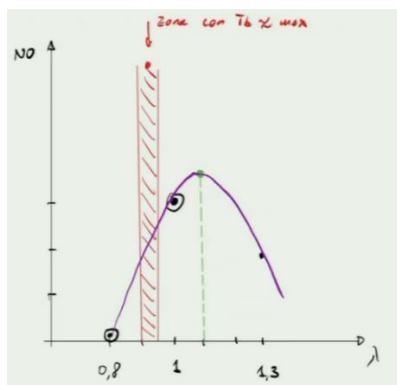


Il grafico riporta la curva della temperatura massima, la curva degli NO misurati e la curva degli NO calcolati con il modello analizzato.

La variazione dell'indice di eccesso d'aria  $\lambda$  della miscela (indicato anche con RAFR), o del suo reciproco  $\phi$  detto rapporto di equivalenza, influisce sia sulla temperatura dei gas in camera sia sulla concentrazione di ossigeno nei gas combusti.

I valori massimi della temperatura dei gas combusti si raggiungono per miscele leggermente ricche ( $\lambda \approx 0.9$ ), per le quali le concentrazioni di ossigeno sono basse. Al crescere di  $\lambda$  la temperatura dei burned gas scende ma l'aumento della concentrazione di ossigeno prevale inizialmente su questo effetto. Di conseguenza le emissioni di NO hanno un massimo per miscele leggermente povere ( $\lambda \approx 1.1$ ). Una variazione di  $\lambda$  del 10% nell'intorno del massimo di NO porta ad una diminuzione dal 30% al 40% delle concentrazioni di NO.

Anche per il gas naturale il massimo della produzione di NO si trova nel leggermente povero ( $\lambda \approx 1.1$ ).



Miscela povere ( $\lambda = 1.3$ ): livello di NOx più basso. Tuttavia:

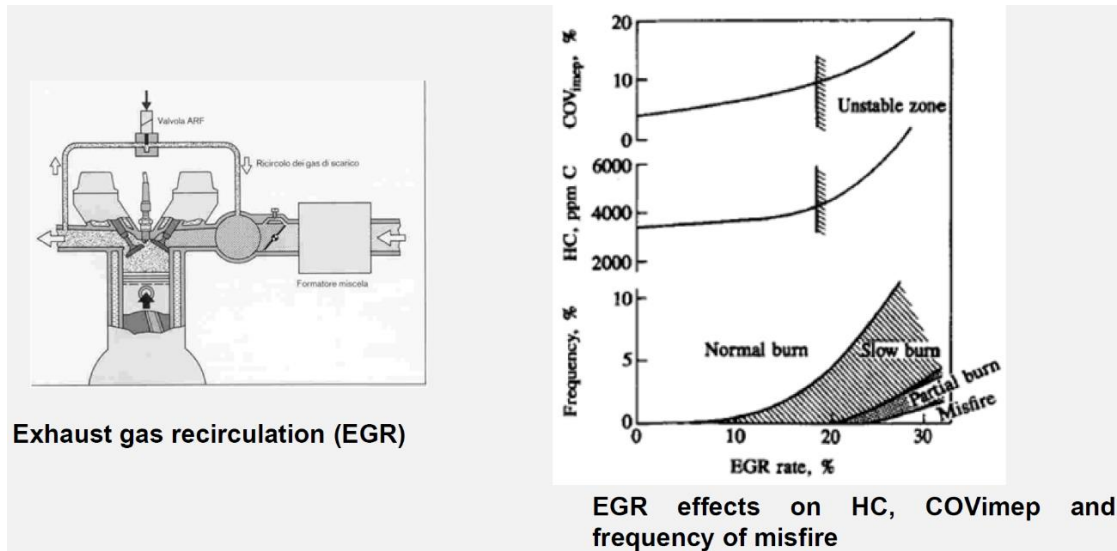
- Con miscele povere è richiesta l'adozione di specifici sistemi di post-trattamento dei gas di scarico in grado di ridurre gli NO in ambienti caratterizzati da eccesso di ossigeno, che richiedono tecnologie diverse da quelle dei convenzionali TWC (Three Way Catalysts).
- L'adozione di miscele povere comporta minori valori della velocità di propagazione del fronte di fiamma ed il conseguente aumento dell'angolo di combustione, con conseguente riduzione del rendimento. Per compensare tale effetto occorre adottare accorgimenti specifici per promuovere la velocità di propagazione del fronte di fiamma come, ad esempio, aumentare la turbolenza in camera (=> camera "fast burn").

Il concetto è che a ogni variazione dei parametri di controllo, e quindi di funzionamento, consegue la necessità di apportare modifiche dal punto di vista di progettazione del motore (no plug and play).

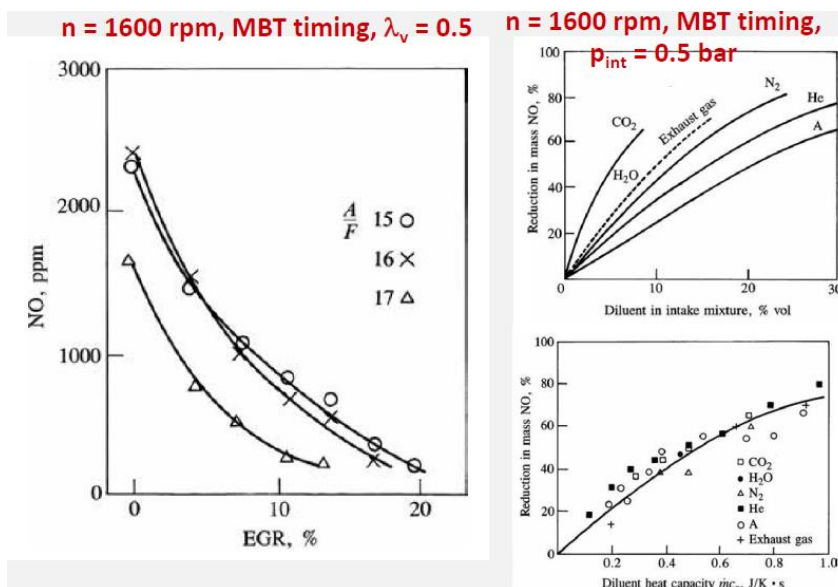
## 2) Frazione di gas residui

I **gas residui**, costituiti da gas combusti del ciclo precedente ed eventualmente da EGR = Exhaust Gas Recirculation = gas di scarico riciclati, **si mescolano con gli «unburned gas»** e agiscono come diluenti, contribuendo a ridurre le temperature di combustione. Di conseguenza, **un aumento della frazione di gas residui riduce il livello di emissioni di NO.**

La % massima di EGR è normalmente limitata al **20%** per scongiurare il deterioramento della qualità di combustione (**aumento di HC e della CoV di pmi**), come si nota nel diagramma di destra sottostante.



Dallo scarico del motore parte un **piccolo condotto** che porta i gas di scarico al **collettore di aspirazione** tramite una **valvola di controllo**. Quindi la quantità di EGR dipenderà da un  $\Delta p$  tra scarico e aspirazione e dalla sezione di passaggio della valvola. Ci sono casi in cui mettiamo in serie alla valvola uno **scambiatore di calore (EGR Cooler)** per abbassare la temperatura dei gas di scarico: se aumenta la temperatura dell'aria aspirata il motore respira peggio. Il problema del Cooler è il fenomeno del **"fouling"**, ovvero che dopo un po' potrebbe sporcarsi e così **perdere in efficienza**.

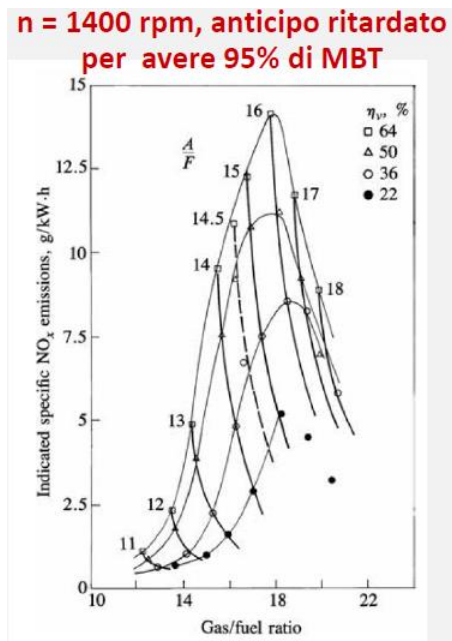


Il fattore determinante è la capacità termica della massa complessiva di diluenti in camera (non il metodo con cui tale massa viene introdotta: %EGR, variazione incrocio valvole, variazione del rapporto di compressione, ...)

Se aumentiamo l'EGR gli NO diminuiscono, **indipendentemente dalla dosatura con la quale sta funzionando il motore** (15, 16, 17: il trend è lo stesso). Quindi l'EGR, abbassando la T raggiunta in camera, agisce da diluente.

**Effetto dell'EGR per diversi livelli di dosatura:**

L'EGR, come già detto, può essere utilizzato con qualsiasi livello di dosatura. Vogliamo capire qual è l'effetto della diluizione della carica se dovessimo avere un motore lean burn. Analizziamo il successivo grafico:



Il grafico riporta sull'asse delle ordinate lo EI (Emission Index) e, sull'asse delle ascisse, il Gas/Fuel Ratio;

$$\frac{G}{F} = \frac{\text{massa totale in camera}}{\text{massa di combustibile in camera}} = \frac{A}{F} \left( 1 + \frac{x_b}{1 - x_b} \right)$$

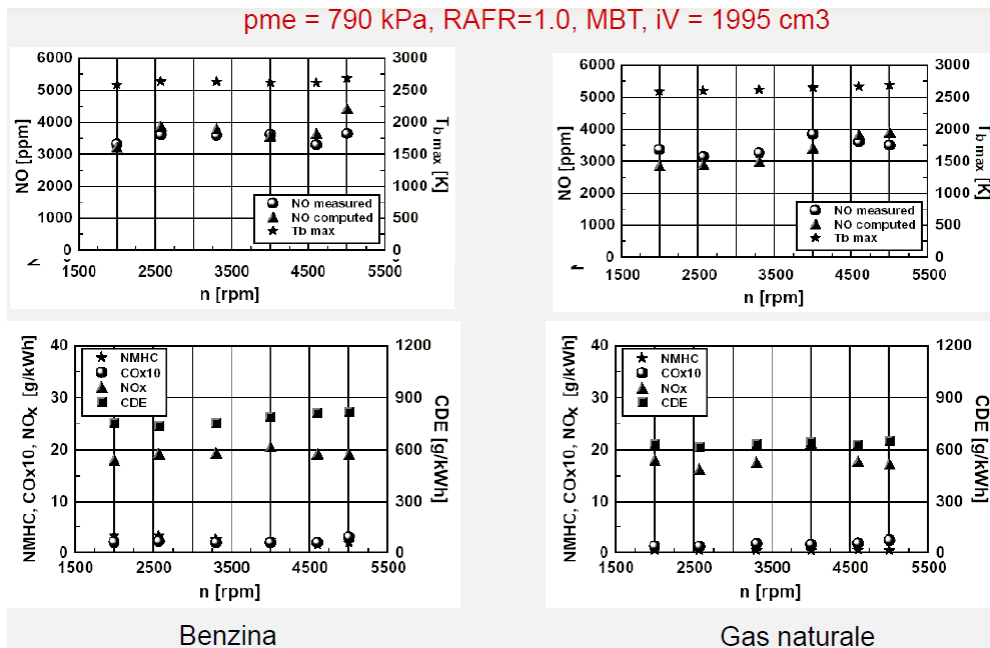
$$\frac{G}{F} = \frac{m_c}{m_f}, \text{ with } m_c = m_a + m_f + m_{\text{gas residui}} + m_{EGR}$$

$$\frac{A}{F} = \frac{m_a}{m_f} = \alpha = \lambda \alpha_{st}$$

$\frac{A}{F} = 14.5$  rappresenta la curva del **caso stechiometrico**; se aumentiamo  $\frac{G}{F}$ , ovvero  $m_{EGR}$ , la curva scende rapidamente e i livelli di NO si riducono in maniera sensibile. Se facciamo lo stesso discorso nel povero, per esempio per il **caso**  $\frac{A}{F} = 18$ , notiamo che la curva è un po' meno estesa e un po' meno piatta: quindi **l'effetto dell'aumento di  $\frac{G}{F}$ , a seguito dell'introduzione di più o meno EGR, nel povero** porta a una **riduzione inferiore di NOx**. L'effetto sullo stechiometrico è molto più sensibile che sul povero poiché più andiamo nel povero più la composizione dei gas di scarico è simile all'aria: **ricircolare e impoverire è quasi la stessa cosa** e quindi l'effetto di introdurre lo EGR è più significativo a quelle dosature stechiometriche o eventualmente ricche in cui il gas di scarico ha una composizione molto diversa rispetto all'aria introdotta per la combustione.

#### 4) Velocità angolare

Trend degli NO in funzione della velocità angolare a carico costante (perché la pme è la stessa):



(\*) Dipende anche da cosa si intende per carico costante:

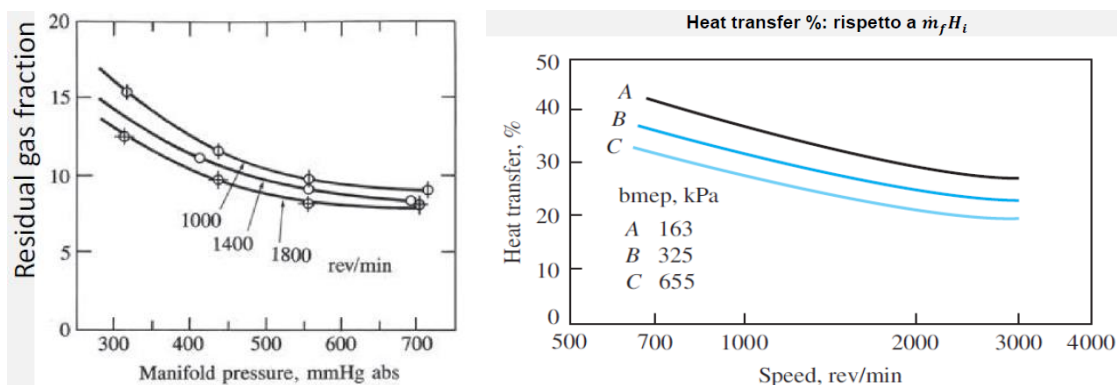
- Pressione nel collettore di aspirazione fissa o pme fissa (1)
- Posizione fissa dell'organo di regolazione (1bis)

**Trend non ben definito:** al variare della velocità angolare è difficile prevedere cosa fanno gli NO. Si può intravedere un trend in leggera crescita. Il trend è così complesso perché la velocità angolare agisce su tutta una serie di fattori che possono avere effetti contrastanti.

Se aumentiamo la velocità angolare a carico costante ( $n \uparrow pme = const$ ) normalmente avremmo una **diminuzione della frazione di gas residui (fattore 1 -EG)**: questa diminuzione porta a un **aumento di temperatura (+T)** e quindi a un **aumento di NOx (effetto 1 +NO)**.

(\*) Se però aumentiamo la velocità angolare ( $n \uparrow pme \neq const$ ), **tenendo ferma la farfalla**, ne consegue un **aumento della frazione di gas residui (fattore 1bis +EG)**: questa aumento porta a una **diminuzione di temperatura (-T)** e quindi a una **riduzione di NOx (effetto 1bis -NO)**.

L'aumento della velocità angolare comporta anche una **diminuzione degli scambi termici (fattore 2 -HT)**: questa diminuzione porta a un **aumento delle temperature (+T)** e a un **aumento di NOx (effetto 2 +NO)**.

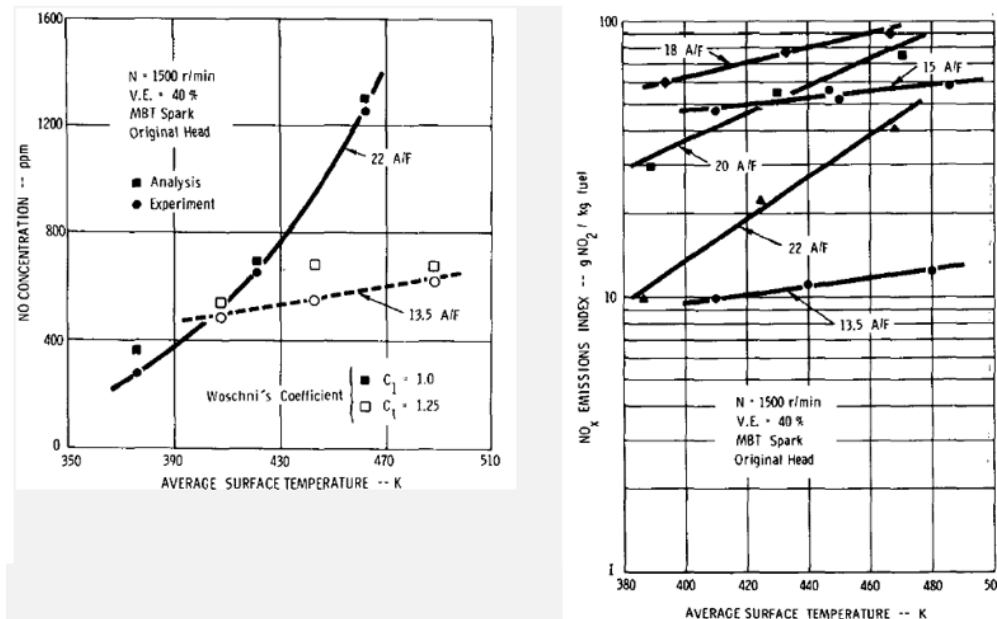


Tuttavia se aumentiamo la v. angolare avremmo una **diminuzione del tempo a disposizione (fattore 3 -t)**: questa diminuzione porta a una **riduzione dei livelli di NO (effetto 3 -NO)**.

Quale fattore prevale? Non si sa, dipenda dalla condizione di funzionamento. In generale, pur non essendo così chiaro il trend, **all'aumentare della velocità angolare (+) si ha globalmente una crescita dei livelli di NO (+)**. Quindi, diciamo che gli effetti della regolazione della velocità angolari non sono così predeterminanti.

## 6) Temperatura delle pareti

Trend degli NO in funzione della temperatura media (facendo la media delle misure prese in vari punti).



Notiamo un **trend ben definito**: all'aumentare della temperatura media alle pareti la produzione di NO aumenta in modo significativo.

L'aumento della temperatura di parete determina un aumento della temperatura massima in camera di combustione per effetto dell' aumento della temperatura media della carica all'inizio della compressione. Infatti, durante la fase di aspirazione, la temperatura della carica è di molto inferiore a quella delle pareti, perciò gli scambi termici tra pareti e gas diventano importanti: se la temperatura di parete cresce, aumenta la temperatura media della carica.

**Nota:** Le maggiori temperature di parete (e dunque in camera), nel caso di miscele ricche, portano ad un aumento delle reazioni di formazione e decomposizione di NO, con parziale compensazione dell'effetto finale. Nel caso di miscele povere, contano soprattutto i processi di formazione, dunque l'effetto della temperatura di parete è diretto (**le miscele povere hanno pendenze maggiori: L'aumento di temperatura è più incidente nel povero**).

## **2.4 SI: Idrocarburi incombusti (HC)**

- Introduzione sugli HC
- Reattività fotochimica
- Formazione degli HC
- Meccanismo di spegnimento della fiamma e ossidazione
- Generazione dei meccanismi di occultamento di HC
- Ossidazione di HC nel cilindro e nei condotti di scarico
- Analisi dei meccanismi di occultamento

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1) Interstizi                        | 5) Bulk Quenching                                |
| 2) Olio lubrificante                 | 6) Combustibile liquido                          |
| 3) CCD (Combustion Chamber Deposits) | 7) Trafilamenti attraverso la valvola di scarico |
| 4) Wall Quenching                    |  |

- Analisi del processo di ossidazione
- Considerazioni riassuntive
- Effetto dei principali parametri motoristici sulla formazione di HC

- 1) Dosatura
- 2) Anticipo di accensione
- 3) Velocità angolare
- 4) Carico
- 5) Temperatura delle pareti
- 6) Geometria del sistema di combustione
- 7) EGR

### **- Introduzione sugli HC**

Le **emissioni di idrocarburi** (indicati globalmente con il termine HC oppure UHC: Unburned Hydrocarbons), o più propriamente **emissioni organiche**, allo scarico di un motore derivano dall'**incompleta combustione degli idrocarburi costituenti il combustibile**. Le emissioni di HC engine-out di un **motore SI** ammontano a **1%-2%** della **massa di combustibile introdotta**.

La **benzina** è composta da circa **70 idrocarburi**. Il **gasolio** è composto da circa **100 idrocarburi** (quelli in più sono tutti a peso molecolare maggiore). In generale in il combustibile è formato da **alcani, alcheni, alchini, alcoli** (potrebbe esserci del **benzene**). Gli **idrocarburi incombusti** deriveranno da questi ma avranno una **struttura diversa per via delle ossidazioni**, se pur parziali, che ne cambiano la composizione.

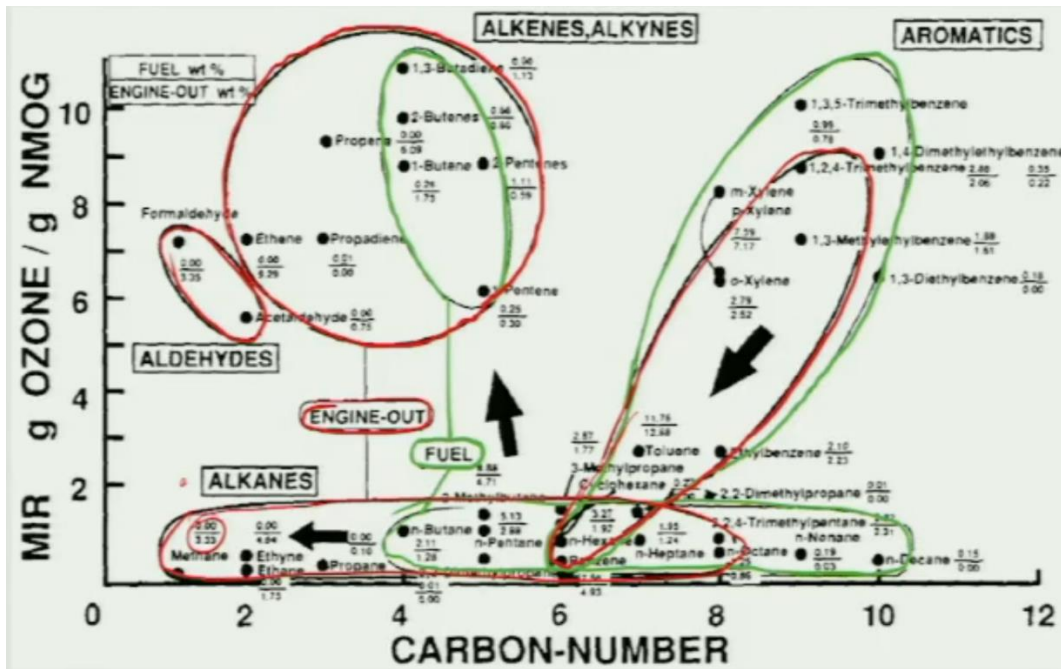
Misuriamo complessivamente tutti i composti organici presenti allo scarico. Per quantificare gli HC si conta il **numero di atomi di carbonio (C)** che ci sono allo scarico; immaginiamo che ogni atomo di carbonio derivi da una **molecola di idrocarburo di riferimento**, per esempio il metano o il propano, e quantifichiamo in termini di **[ppm] di metano equivalente** o propano equivalente contando gli atomi di carbonio (C), tramite l'utilizzo di un **forno catalitico**, chiamato **FID: Flame Ionization Detector**. Gli idrocarburi incombusti allo scarico vengono bruciati e gli **ioni sprigionati vengono contati**; sulla base del numero di ioni si risale al numero di atomi di carbonio.

Alcuni di questi sono **inerti** dal punto di vista fisiologico e virtualmente **non reattivi dal punto di vista della formazione dello smog fotochimico**. Altri sono **altamente reattivi** e contribuiscono in modo consistente alla formazione dello **smog fotochimico**. Altri sono **cancerogeni**. In base al potenziale di ciascun idrocarburo a concorrere alla formazione di ozono e smog fotochimico, è possibile definire delle **opportune scale di reattività** e classificare in questo modo i diversi HC emessi allo scarico.



**- Reattività fotochimica**

Gli idrocarburi incombusti allo scarico, in termini di composizione, sono figli del combustibile utilizzato.



Sull'asse orizzontale: **Carbon Number**: numero di atomi di carbonio (C) dell'idrocarburo considerato.

Sull'asse verticale: **MIR, Maximum Incremental Reactivity** [ $gO_3/NMOG$ ]

Sono riportati tutti gli **idrocarburi del combustibile (Fuel)** e gli **idrocarburi allo scarico (Engine Out)**.

Considerando la famiglia degli alcani (metano, etano, propano, butano, pentano, esano, eptano ... Legami singoli): il combustibile è rappresentato dall'insieme di idrocarburi racchiusi nel cerchio verde che è più spostato verso **numeri alti di carbonio**, mentre gli idrocarburi incombusti HC prodotti sono quelli contenuti nel cerchio rosso, più spostato verso numeri bassi di carbonio.

I **numeri indicano le % in peso**: sopra la linea c'è la percentuale in peso a **livello di combustibile (Fuel)**, sotto c'è la percentuale in peso a **livello di emissioni (Engine Out)**.

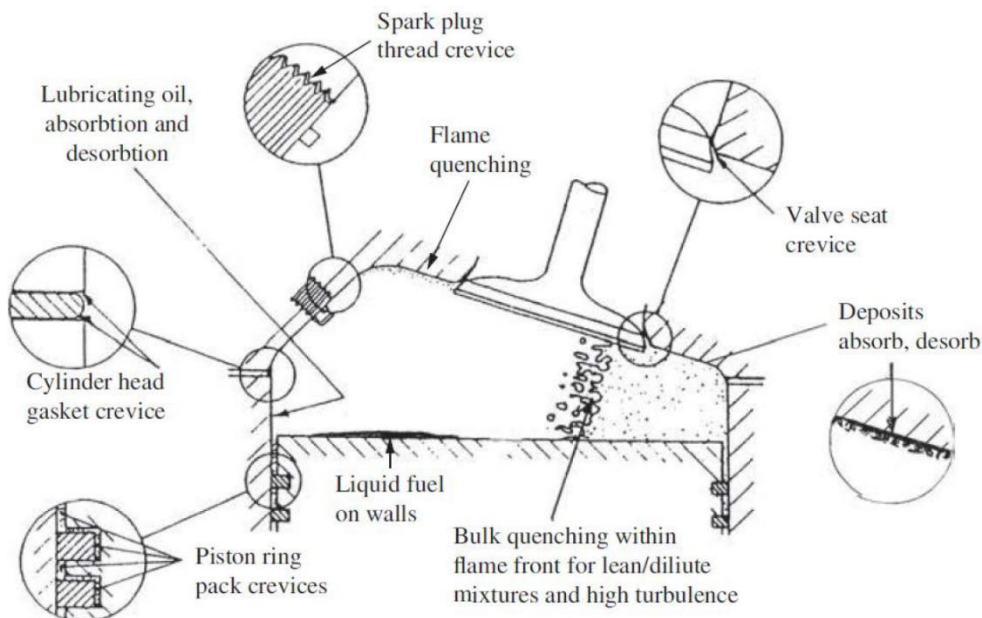
La formazione di HC prevede dei **meccanismi di occultamento**: una parte del combustibile che c'è in camera viene occultato (negli interstizi, nell'olio lubrificante ...) e **non reagisce**. Quando vengono rilasciati, a combustione finita, date le alte temperature subite, subiscono delle reazioni, che danno origine a **nuovi composti**. Anche le **temperature nei condotti di scarico sono elevate** e **innescano reazioni di ossidazione, originando nuovi prodotti (la cui reattività spesso è più elevata)**. Quindi le varie zone verdi si espandono nelle zone rosse. Gli **idrocarburi incombusti HC** hanno dunque una **reattività specifica (RS) più alta** rispetto a quella del combustibile poiché **contengono elementi aventi una Maximum Incremental Reactivity (MIR) più elevata**.

## - Formazione degli HC

La formazione degli HC consta di due fasi:

(A) **Generazione degli HC** (occultamento degli idrocarburi): una serie di meccanismi (di spegnimento della fiamma) fanno sì che una frazione degli idrocarburi costituenti il combustibile sfugga del tutto, o in parte, al processo di combustione.

(B) **Ossidazione e trasporto degli HC**: gli HC così generati possono essere tutti, o in parte, ossidati durante il processo di combustione e scarico.



(A) Alcuni idrocarburi vengono intrappolati negli **interstizi** della camera di combustione e o si diffondono nell'**olio lubrificante** e o vengono intrappolati dai **depositi carboniosi** e o rimangono **incombusti a parete** o **in seno alla carica** e o scappano **attraverso la valvola di scarico**, e conseguentemente **non partecipano al processo di combustione**.

- **Interstizi**: zone molto ridotte in termini di volume caratterizzati da rapporti superficie-volume molto grandi. Si trovano: **tra il pistone e il cilindro**, dove ci sono gli **anelli di tenuta**; tra la **testa motore e il basamento** (la guarnizione può lasciare alcuni spazi vuoti); nei **filetti della candela**; tra gli **elettrodi**; tra il piattello e la **sede della valvola**; nei **corrugamenti della camera di combustione**.

- L'**olio lubrificante** è composto da **idrocarburi** che possono essere affini a quelli del combustibile. Per cui gli idrocarburi del combustibile si possono diffondere anche nello strato di olio lubrificante.

- Sulla parete, ci possono essere dei **depositi carboniosi** e anch'essi possono intrappolare alcuni idrocarburi.

- Ci possono essere degli **spegnimenti a parete (Wall quenching)**: la fiamma può non arrivare a parete;

- Inoltre ci possono essere degli **spegnimenti in seno alla carica (Bulk quenching)**: per cui possiamo ritrovarci ulteriori HC a seguito della mancata combustione (**caso limite di questo fenomeno è il miss fire**).

+ **Attraverso la valvola di scarico** ci possono essere dei trafiletti che comportano la fuga di alcuni idrocarburi (capita se il motore è vecchio e mal tenuto).

### 1) One-wall quench distance

Analizziamo il caso più semplice: la fiamma arriva in direzione perpendicolare su una superficie piana.

$$Pe_1 = \frac{\rho_u S_L c_{p,u} (T_f - T_u)}{k_u (T_f - T_u) / d_{q1}} = \frac{\rho_u S_L c_{p,u} d_{q1}}{k_u} \approx 8$$

$d_{q1}$ : distanza alla quale la fiamma si spegne rispetto alla parete. Inizialmente è stata misurata sperimentalmente e si è cercato di trovare delle correlazioni analitiche che oggi ci hanno consentito di creare un modello che ci possa dire quanto questa distanza può variare al variare delle condizioni di funzionamento.

**$Pe_1$ : numero di Peclét: numero adimensionale** rappresentante il rapporto tra il rilascio termico all'interno della fiamma e il flusso termico verso la parete. Il numeratore rappresenta il rilascio termico dallo strato di reazione allo strato di preriscaldamento (a):  $\rho_u S_L c_{p,u} (T_f - T_u) = dm_b/dt$ , con  $\rho_u$ : densità degli unburned gas;  $S_L$ : velocità laminare;  $c_{p,u}$ : capacità termica degli unburned gas. Il denominatore rappresenta il flusso termico verso la parete (b) con  $k_u$ : conduttività termica degli unburned gas. Considerando il denominatore, troviamo  $T_u$  e non  $T_w$  perché sulla parete si crea un boundary layer di unburned gas avente una temperatura leggermente diversa da quella della parete; questo è corretto quando, come accade,  $d_{q1}$  risulta inferiore alla dimensione del boundary layer. **Nelle condizioni tipiche dei motori, il numero di Peclét è circa uguale a 8.** Considerando i vari parametri si ricava che **la distanza di spegnimento dalla parete  $d_{q1}$  ha un valore normalmente compreso tra 0.04 e 0.15 [mm].**

### 2) Two-plate quench distance

Lo stesso discorso si può fare per il calcolo della **distanza tra due piani.**

$$Pe_2 = \frac{\rho_u S_L c_{p,f} (T_f - T_u)}{k_f (T_f - T_u) / d_{q2}} = \frac{\rho_u S_L c_{p,f} d_{q2}}{k_f}$$

La distanza  $d_{q2}$  rappresenta la dimensione che un interstizio deve avere per non essere penetrato dalla fiamma. Questa distanza è stata inizialmente calcolata con misure sperimentale che hanno portato alla seguente formula empirica:

$$d_{q2} = 14.8 \cdot p_{max}^{-0.9} \cdot T_w^{-0.5}$$

Dove  $p_{max}$ : pressione massima in camera;  $T_w$ : temperatura di parete; 14.8: rapporto di equivalenza (o **dosatura?**). Si è ricavato che la distanza tipica,  $d_{q2}$ , che ci deve essere tra due pareti affinché la fiamma non possa penetrarvi, ha un valore normalmente **compreso tra 0.2 e 0.6 [mm].**  $d_{q2}$  risulta essere (mediamente) **circa 5 volte  $d_{q1}$** : nel diagramma successivo si nota che, **per diverse condizioni operative di funzionamento di un motore, il rapporto  $d_{q2}/d_{q1} = 5$  è abbastanza ben rispettato**: i quadratini rappresentano i punti sperimentali e sono opportunamente interpolati da una retta di regressione lungo la quale vale rigorosamente questo rapporto.

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**- Generazione dei meccanismi di occultamento di HC (A)**

| Meccanismo di generazione  | % THC (a regime termico)   |
|--|--|
| INTERSTIZI (crevices): miscela compressa di vapori di combustibile e aria intrappolata all'interno dei volumi degli interstizi della camera di combustione   | 30%-60%  |
| STRATO OLIO LUBRIFICANTE (oil layer): gli HC del combustibile diffondono nello strato d'olio lubrificante sulla parete del cilindro  | 5%-30%   |
| DEPOSITI IN CAMERA DI COMBUSTIONE (CCD: Combustion Chamber Deposits): combustibile intrappolato all'interno dei depositi presenti in camera (sulle valvole, sulla testa del cilindro e sulla superficie dello stantuffo) | 0%-25%   |
| WALL QUENCHING: strati di carica non combusta in prossimità delle pareti della camera di combustione generati dallo spegnimento della fiamma vicino alla parete  | 5%-20%   |
| BULK QUENCHING e INCOMPLETA COMBUSTIONE: porzioni di carica non combusta per effetto dello spegnimento della fiamma prima che questa raggiunga la parete   | Significativo per cariche magre o diluite                                |
| COMBUSTIBILE LIQUIDO (liquid fuel) nel cilindro che non evapora e non si mescola con aria sufficiente per bruciare completamente prima della fine della combustione  | Significativo durante le partenze a freddo                               |
| TRAFILAMENTO della carica fresca attraverso la valvola di scarico (nominalmente chiusa)  | Significativa dopo percorrenze significative senza adeguata manutenzione |

Fatti 100 gli idrocarburi totali emessi, il 30% deriva dagli interstizi, ...

Nella colonna di destra vi è l'impatto di queste sorgenti rispetto agli idrocarburi incombusti totali rilasciati. Sono state ordinate in funzione dell'impatto nelle **condizioni di normale funzionamento di un motore SI PFI (Port Fuel Injection)**. Vedremo che per motori a iniezioni diretta cambierà l'ordine di importanza in termini di impatto.

Le percentuali riportate sono in funzione degli HC totali emessi allo scarico. È interessante anche valutare quanto viene occultato di HC rispetto al combustibile che introduciamo. (È un'altra percentuale.)

I meccanismi descritti fanno sì che, in genere, dal **5% al 10% del combustibile introdotto sia occultato** e non partecipi al normale processo di combustione. Questa percentuale, **oltre che a contribuire alla formazione dei THC engine-out rappresenta una significativa perdita in termini di coppia ed efficienza del motore.**

Tali processi (ad eccezione delle mancate accensioni) occultano i THC in prossimità delle pareti della camera piuttosto che all'interno del cilindro. Ne consegue una distribuzione non uniforme dei THC in camera. Infatti, **al termine della combustione** (che si raggiunge dopo il picco di pressione in camera e durante la corsa di espansione dello stantuffo), **la maggior parte delle sorgenti rilascia gli idrocarburi immagazzinati**. Questi si diffondono e si mescolano con i gas combusti nel cilindro e, se la temperatura locale diventa sufficientemente alta, iniziano un **processo di ossidazione** (che può continuare fino ai condotti, collettori e sistema di scarico).

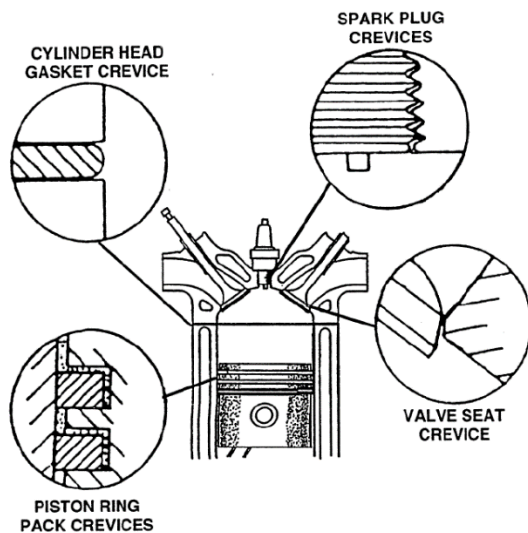
Dunque non si può dire che gli HC allo scarico saranno effettivamente il 5-10% come il combustibile occultato (se no sarebbe un'enormità); **bisogna tener conto del processo di ossidazione** che si ha nel cilindro e nei condotti di scarico. Tuttavia questo 5-10% è molto importante e bisogna tenerne conto perché rappresenta un'inefficienza netta di combustione.

**- Ossidazione di HC nel cilindro e nei condotti di scarico (B)**

Cosa succede agli idrocarburi dopo che sono stati occultati?

- Finita la combustione, durante la fase di espansione, **gli unburned gas**, costituiti da una **miscela di combustibile e aria**, escono dagli interstizi, **si mischiano con i burned gas** e alcuni di essi vengono ossidati;
- La stessa cosa può avvenire per gli idrocarburi che sono stati **assorbiti dallo strato d'olio alla parete**; la **principale differenza è che lo strato di olio lubrificante non assorbe una miscela di aria e combustibile ma solo combustibile**: vengono rilasciati HC puri, quindi devono prima raggiungere una zona nel cilindro a più alta temperatura e in cui possano trovare aria con cui mischiarsi prima di potersi ossidare.
- I **depositi carboniosi** si possono comportare **un po' come gli interstizi e un po' come l'olio lubrificante** (i depositi che creano volumi più piccoli assorbono solo gli idrocarburi del combustibile e non l'aria).

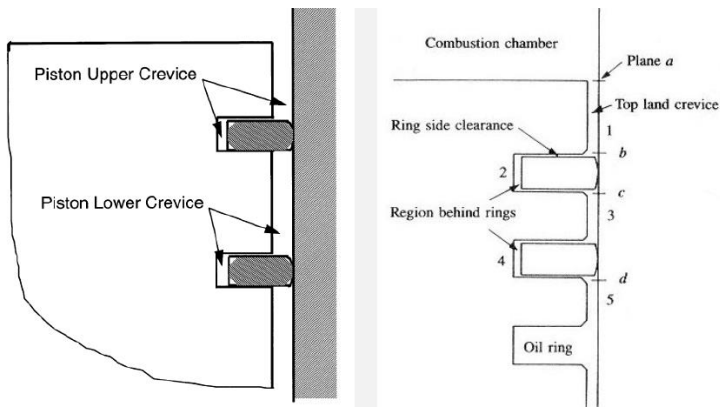
## 1) Interstizi



Gli interstizi si trovano:

- Tra stantuffo e pareti del cilindro;
- Tra testa motore e basamento dove c'è la guarnizione;
- Tra i filetti della candela e la sua sede;
- Tra l'elettrodo centrale e il corpo della cella candela;
- Tra la valvola e la sua sede.

- I più importanti sono gli interstizi che si trovano **tra lo stantuffo e le pareti del cilindro**:



Distinguiamo tra:

- **Top Land Crevice**: è l'interstizio che c'è tra la prima fascia elastica, la parte alta del pistone e la parete del cilindro;
- **Interstizio dovuto al gioco delle fasce elastiche**. (Dobbiamo tener conto anche di un aspetto dinamico in quanto questi interstizi si modificano durante la corsa del pistone.)

In particolare quelli creati dal primo anello di tenuta poiché sono quelli che, finita la combustione, possono rilasciare effettivamente il loro contenuto nel cilindro.

Tuttavia sono importanti anche gli interstizi compresi tra i due anelli di tenuta in quanto sono in comunicazione con i precedenti attraverso il taglio del primo anello e grazie ai giochi variabili dettati dal moto del pistone. Questi possono drenare parte della miscela incombusta facendo diminuire gli HC che vengono rilasciati. Hanno dunque un effetto indiretto. Ci possono essere **fughe anche più in basso**, verso il carter/basamento. Tramite un sistema di ricircolo i vapori **vengono ricircolati nel collettore di aspirazione**. **Resta comunque un flusso verso il basamento, detto blow-by**. Questo blow-by potrebbe avere un effetto positivo, poiché, se controllato, ridurrebbe gli idrocarburi nascosti negli interstizi (magari per portarli altrove, per esempio anch'essi nel collettore di aspirazione).

Il calcolo degli HC intrappolati da questa tipologia di interstizio è piuttosto complesso in quanto prima di trarre delle conclusioni dobbiamo definire tutti i piccoli volumi rappresentanti questa sorgente e quindi calcolare per ciascuno la pressione interna.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

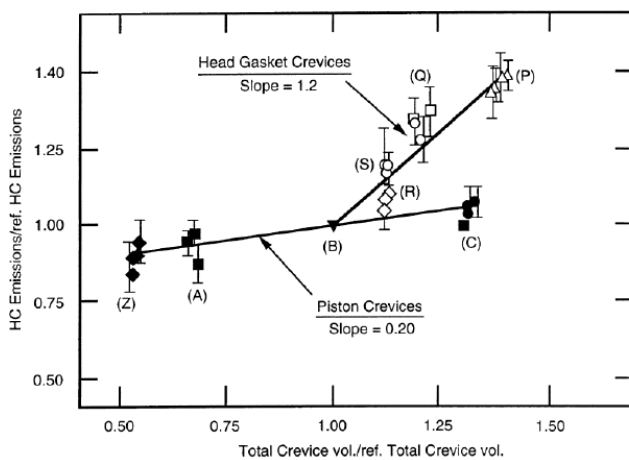
Dal momento che gli unburned gas intrappolati sono caratterizzati da una temperatura inferiore, sono più densi; il volume è piccolo, ma il peso, in termini di massa, rispetto a quello che c'è in camera, è maggiore, proprio perché c'è una temperatura più bassa a denominatore. Quindi non possiamo aspettarci che gli HC rilasciati siano proporzionali al volume. In definitiva si trattano di volumi piccoli ma che possono rilasciare quantitativi di HC che sono molto più importanti di quanto il volume che li contiene ci fa pensare.

**Nota: nel caso di un motore a freddo la % di HC provenienti dagli interstizi, durante la fase di avviamento, risulta più importante.** È un po' compensato dal fatto che il carico è minore e quindi anche le pressioni.

- Adesso analizziamo un altro interstizio: **tra la testa motore e il basamento.**

Il volume tra la testa motore e il basamento è relativamente meno importante perché la dimensione caratteristica è piuttosto grande (se confrontata con la distanza  $d_{q2}$ ) quindi **normalmente la fiamma riesce a penetrare e quindi non produce quantitativi significativi di HC.** In letteratura sono stati fatti alcuni studi su motori particolari per cui l'interstizio tra testa motore e basamento risulta essere di dimensione inferiore a  $d_{q2}$ : in questo caso bisogna tener conto che **l'interstizio si trova in una posizione particolare: è molto vicino alla valvola di scarico.** Quindi **se diventasse una sorgente importante di HC** potrebbe essere un problema in quanto **gli HC non avrebbero il tempo di ossidarsi prima di subire lo scarico spontaneo.**

Il seguente grafico mostra alcuni risultati di questi studi:



Larghezza spazio tra testa e basamento = 0.3 [mm]

Se aumentiamo il volume degli interstizi tra pistone e cilindro, gli HC aumentano seguendo la linea più piatta; se invece aumentiamo il volume tra testa motore e basamento, gli HC aumentano con una pendenza più importante. **Normalmente gli spazi liberi tra la testa e il basamento sono larghi 1-1.5 [mm], maggiore della  $d_{q2}$  (0.2-0.6 [mm]), per cui la fiamma riesce a penetrarvi.**

- Analizziamo il fenomeno del : **blow-by**

È il gas che fluisce dalla camera di combustione, attraverso gli anelli di tenuta, verso il basamento; viene poi ricircolato nel collettore di aspirazione. Nel diagramma successivo vediamo come il **blow-by dipende dal ring gap area** che è la **dimensione caratteristica del taglio degli anelli.**



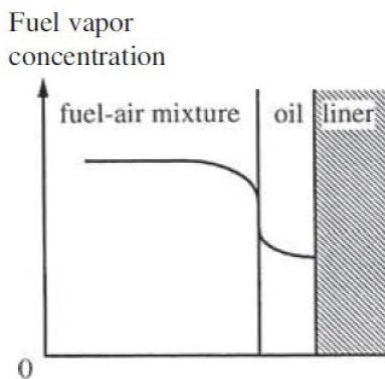
## 2) Olio lubrificante

È noto che la presenza di olio lubrificante nel combustibile e/o sulle pareti della camera di combustione determina un aumento delle emissioni di idrocarburi incombusti.

Per spiegare tale fenomeno è stato proposto un meccanismo basato sull'assorbimento dei vapori di combustibile nello strato d'olio a parete e sul rilascio del combustibile da parte dello stesso strato d'olio.

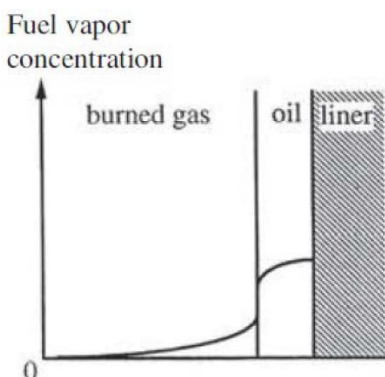
Durante le corse di discesa dello stantuffo, sulla camicia del cilindro è presente uno **strato di olio**, dello **spessore di pochi micrometri**, che rimane **esposto ai gas presenti nel cilindro** fino a quando non viene progressivamente ricoperto dalla risalita dello stantuffo nel corso delle successive fasi motore.

**Durante le fasi del ciclo motore che precedono la combustione**, lo strato di olio lubrificante sulle pareti del cilindro è quindi esposto alla miscela incombusta di vapori di combustibile, aria e gas residui (ed eventualmente, durante il processo di aspirazione, anche al combustibile liquido). **Gli idrocarburi del combustibile vengono assorbiti dagli idrocarburi dell'olio lubrificante, in fase vapore o in fase liquida** (per urto delle goccioline).



La **concentrazione di HC che c'è in camera**, prima della combustione, **è decisamente maggiore dell'eventuale concentrazione che c'è nell'olio lubrificante**; quindi c'è una differenza di concentrazione che fa sì che ci sia una **diffusione di HC verso l'olio lubrificante**.

**Durante la combustione**, la concentrazione dei vapori di combustibile nella carica si riduce praticamente a zero, perciò lo strato d'olio a parete inizia a rilasciare nel cilindro i vapori di combustibile. **Tale rilascio prosegue per tutta la fase di espansione e scarico**. Una parte dei vapori di combustibile rilasciati si mescolano con i prodotti della combustione ad alta temperatura e viene ossidata.

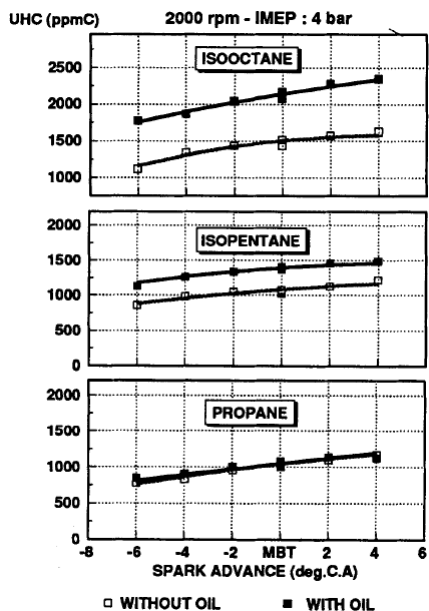


Dopo la combustione in camera troviamo i burned gas, caratterizzati da una bassa concentrazione di HC; l'olio che precedentemente aveva assorbito gli HC per via della differenza di concentrazione, adesso rilascia gli HC.

**La diffusione cambia il verso della sua direzione.**

Quindi, l'olio lubrificante assorbe e intrappola alcuni HC prima della fase di combustione e li rilascia al suo termine, quando la concentrazione in camera risulta più bassa. **La differenza principale con il caso degli interstizi è che l'olio assorbe solo idrocarburi e non aria**. Quindi, gli HC rilasciati dall'olio sono diversi in termini di composizione da quelli rilasciati dagli interstizi. Agli HC rilasciati dagli interstizi è sufficiente trovare una zona calda per ossidarsi mentre quelli rilasciati dall'olio **devono trovare anche l'aria necessaria**.

Analizziamo l'influenza del combustibile:



Per “with oil” si intende che è stato aggiunto un quantitativo rispetto al quantitativo base (“without oil”) per evidenziare maggiormente l'effetto.

Sono considerati tre oli: in questo caso il peso molecolare dell'olio ( $M_f$ ) aumenta dal grafico più basso a quello più alto. Notiamo infatti che l'effetto dell'olio introdotto in aggiunta (che si può valutare come la distanza tra le due curve) aumenta all'aumentare del peso molecolare del combustibile. **Quindi l'olio assorbe meno HC quando il motore utilizza un combustibile più leggero come il propano.**

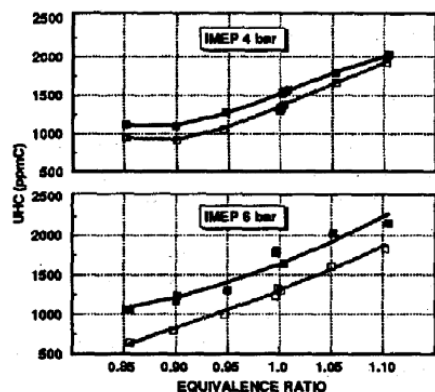
Combustibile più leggero:  $M_f \downarrow : HM_{oil} \uparrow \omega_{interface} \downarrow m_{f,oil} \downarrow HC_{oil} \downarrow HC_{exit} \downarrow$

Combustibile più pesante:  $M_f \uparrow : HM_{oil} \downarrow \omega_{interface} \uparrow m_{f,oil} \uparrow HC_{oil} \uparrow HC_{exit} \uparrow$

Questo grafico ci dà anche un'altra informazione: l'aumento dell'anticipo di accensione (SA +) aumenta la pressione in camera che determina un maggior assorbimento di HC nell'olio lubrificante.

Effetto dell'anticipo:  $SA \uparrow : p \uparrow \omega_{interface} \uparrow m_{f,oil} \uparrow HC_{oil} \uparrow HC_{exit} \uparrow$

Analizziamo l'influenza del carico:



IMEP (Indicated Mean Effective Pressure)  
= PMI (Pressione Media Indicata)

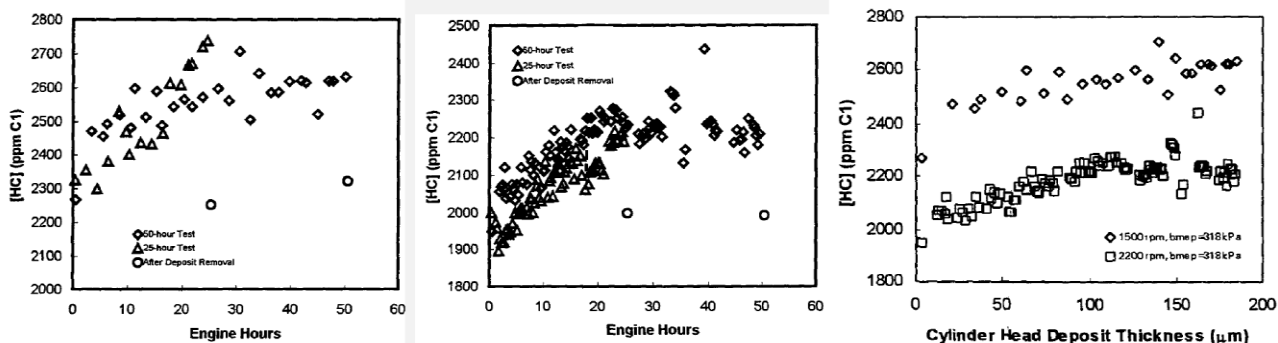
$$\Phi = \frac{1}{\lambda} : \text{equivalence ratio}$$

La **pressione** aumenta non solo aumentando l'anticipo di accensione ma anche **aumentando il carico**:

Effetto del carico:  $\Phi \uparrow : p \uparrow \omega_{interface} \uparrow m_{f,oil} \uparrow HC_{oil} \uparrow HC_{exit} \uparrow$

Analizziamo quindi i **risultati in termini di produzione di HC in funzione del tempo**:

1500 rpm @ bme<sub>p</sub> = 318 kPa    2200 rpm @ bme<sub>p</sub> = 318 kPa



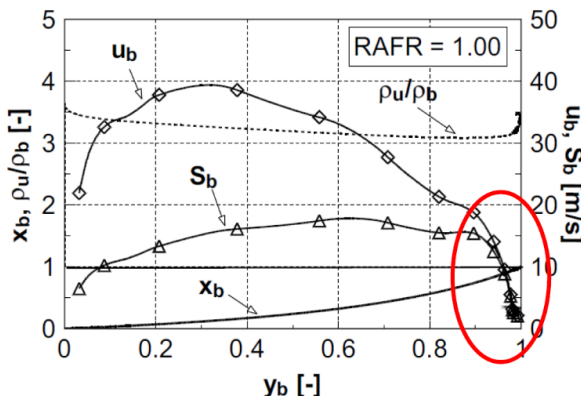
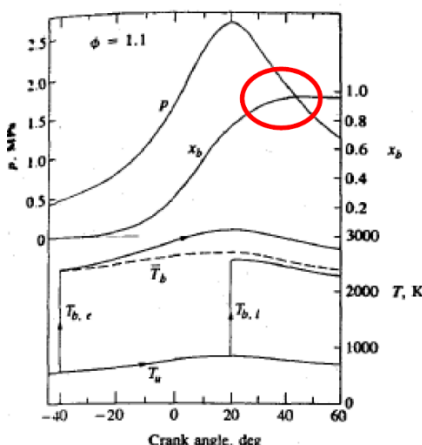
Una volta rimossi i CCD, le emissioni di HC tornano al livello di un motore “pulito”.

#### 4) Wall Quenching

Per quanto riguarda lo spegnimento a parete avevamo già presentato la situazione nel capitolo inerente allo spegnimento della fiamma: la fiamma arrivata in prossimità della parete non procede oltre per via degli scambi termici; esaurito l’ossigeno tende a spegnersi; si creano quindi degli strati di spegnimento a parete che dovrebbero essere quindi sorgenti di idrocarburi incombusti (HC) al netto della percentuale che si ossida. Questa percentuale di idrocarburi ossidati è spesso piuttosto elevata e quindi non è detto che, in un motore in condizioni di normale funzionamento, l’effetto di questi strati di spegnimento a parete sia particolarmente importante sulla produzione di HC. Tuttavia **esistono delle condizioni di funzionamento in cui l’effetto può essere rilevante: ricordiamo infatti che la dimensione di questi strati di spegnimento cambia con il rapporto di equivalenza ( $\Phi$ ) e anche con la diluizione della carica. Per cariche particolarmente diluite lo spessore di questi strati diventa rilevante e quindi il quantitativo di HC che non riesce a ossidarsi aumenta.**

#### 5) Bulk Quenching

Precedentemente avevamo anticipate che **se la fiamma trova una zona più fredda o troppo povera per poter procedere si spegne. La velocità di propagazione della fiamma è di svariate decine di metri al secondo e dipende dalle zone che incontra (non è costante).**



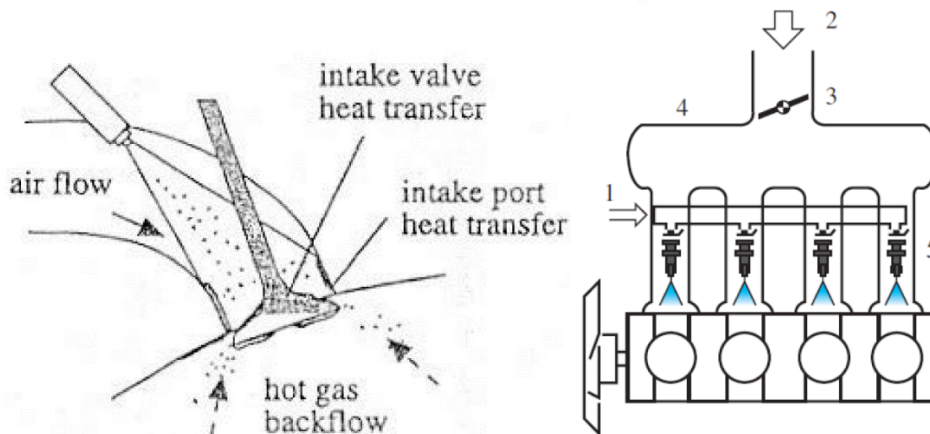
$$x_b = \frac{m_b}{m_{tot}}$$

$$\frac{dm_b}{dt} = \rho_u A S_b$$

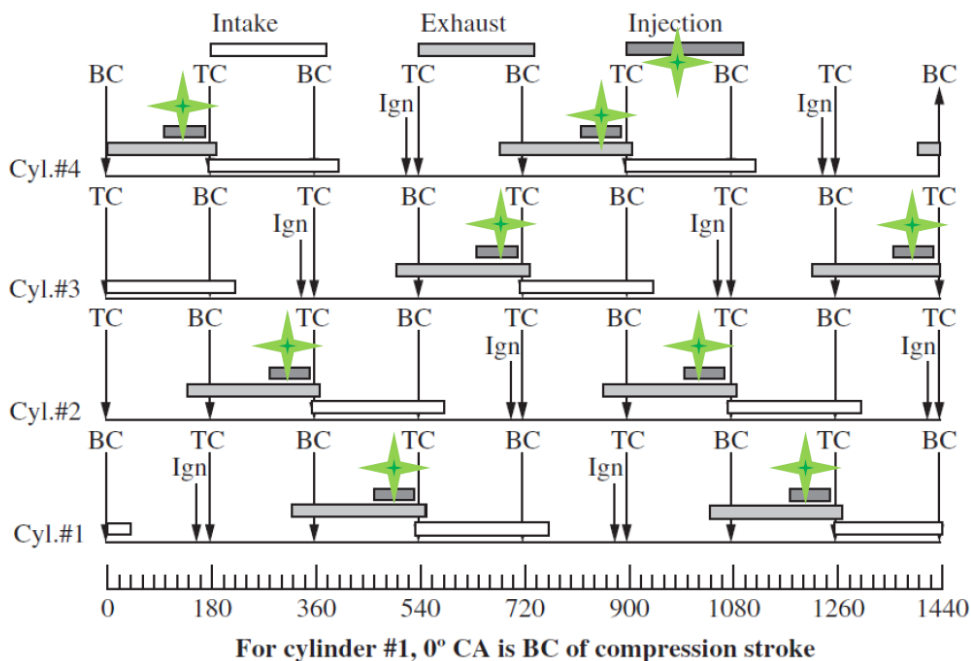
Al progredire dell’angolo di manovella il quantitativo di massa che è coinvolta nel processo di combustione ( $m_b$ ) progressivamente aumenta **con una velocità sempre più bassa**: la velocità ( $S_b$ ) è legata alla derivata della curva  $x_b$ . Notiamo come la **velocità  $S_b$  verso la fine del processo di combustione tende a zero**. Quindi **una zona particolarmente soggetta a questo processo di spegnimento è l’ultima a bruciare**.

## 6) Combustibile liquido

### PFI: Port Fuel Injection



L'Inlet Manifold viene collegato alla testa motore in corrispondenza dei runner che sono dei condotti ricavati nella testa motore: all'interno dei runner viene iniettato il combustibile (3 rappresenta il corpo farfallato di aspirazione)



Nel grafico viene riportato l'angolo di manovella: 0 rappresenta il Crank Angle del Bottom Dead Center di un cilindro. Analizziamo come si sovrappongono le varie corse di aspirazione e scarico. Prendendo in esame per esempio il cilindro 4: l'iniezione avviene a **valvola chiusa (sempre) poco prima che si apra in modo da potergli dare il tempo di evaporare** (se vogliamo aumentare il combustibile si anticipa l'iniezione ma la valvola si apre sempre allo stesso istante, allo stesso angolo di manovella). Targeting: notiamo dalla prima figura che **l'iniettore cerca di mandare il combustibile sul piattello della valvola** poiché è il **punto più caldo del condotto dove quindi l'evaporazione è favorita**.

**Questo fenomeno risulta importante quando avviamo il motore a freddo.** Diventa importante perché le pareti sono fredde; alcuni idrocarburi, specialmente i più pesanti, componenti la benzina, a bassa temperatura non evaporano. **Considerando che vorremmo iniettare una miscela stechiometrica, dal momento che alcuni idrocarburi non evaporano, dovremmo iniettare più combustibile.**

Quindi in un motore PFI a caldo il livello di combustibile liquido in camera non è importante ma lo può diventare molto all'avviamento a freddo e **anche durante i transitori lenti** (per transitori lenti intendiamo quelli per il raggiungimento del regime termico e per transitori veloci quelli per la regolazione del carico). Può diventare importante **anche quando il motore è a regime termico se ci sono dei transitori veloci.** Durante un transitorio di carico, la quantità di combustibile iniettata cambia; se, per esempio, aumenta, può succedere che, per dei fenomeni legati all'evaporazione e condensazione del combustibile, parte del combustibile in più iniettato vada a depositarsi liquido sui condotti (aumenta la pressione nel collettore di aspirazione, aumenta la pressione parziale degli idrocarburi che stiamo iniettando e questo fa sì che più combustibile liquido si depositi sui condotti). **Quindi, durante un transitorio veloce, dobbiamo iniettare non solo quel di più che ci serve per aumentare il carico ma anche una parte aggiuntiva per tener conto di questo aumento di deposizione.**

Il motore, a livello di centralina, ha tutta una serie di accorgimenti per ridurre al minimo questo fenomeno. In ogni caso il problema per questo tipo di motore PFI persiste .

### **Motore GDI: Gasoline Direct Injection**

Anziché avere gli iniettori nel collettore di aspirazione, **gli iniettori si trovano direttamente in camera.** Il combustibile liquido entra direttamente in camera e per via delle alte temperature evapora. Se il motore è a regime termico non si depositano quantitativi rilevanti di combustibile liquido. **Poiché l'iniezione avviene in camera tutti gli effetti legati all'evaporazione, alla deposizione sui condotti, non ci sono: le fasi di warm up e la gestione delle fasi di transitorio veloce sono più semplici.** Quindi in questi termini la tecnologia GDI ci dà dei vantaggi.

[Del resto anche la storia dell'evoluzione dei motori racconta come si è cercato di gestire questo problema di depositi di combustibile liquido a parete. I primi motori erano a **carburazione**: l'iniettore non c'era. Vi era un **carburatore a monte del corpo farfallato** dove il combustibile veniva mescolato con l'aria; come questa miscela si distribuisse tra i vari cilindri era lasciato alla termodinamica. **Comportava superfici estese dove si poteva depositare il combustibile liquido.** Quindi durante i transitori lenti e veloci la probabilità che arrivasse del combustibile liquido in camera era importante. Il carburatore è stato sostituito da un **unico iniettore a livello del corpo farfallato.** Anche in tal caso vi erano superfici estese su cui poteva depositarsi il carburante liquido ma era possibile, tramite regolazioni dell'iniettore, fare delle compensazioni. Lo step successivo è stato portare gli **iniettori ancora più vicini alle camere,** quindi nei collettori di aspirazione. Le superfici si sono ridotte e inoltre è così stato possibile **separare la progettazione dell'iniettore dalla progettazione del Intake Manifold che ora aspira solo più aria.** Infine siamo giunti a questa **tecnologia del GDI**].

Il motore GDI ha due accezioni: distinguiamo tra **GDI a carica omogenea** e **GDI a carica stratificata.** Se abbiamo un motore GDI a **carica omogenea** l'iniezione avviene con largo anticipo rispetto alla combustione: spesso avviene durante la fase di aspirazione; per cui ha il tempo di mescolarsi per bene con l'aria e il problema di "wall wetting" è ridotto. Se invece abbiamo un **motore a carica stratificata** la situazione è diversa: se la stratificazione della carica è "wall guided", l'iniezione avviene durante la fase di compressione e quindi i tempi per l'evaporazione sono decisamente ridotti e potremmo avere problemi di "wall wetting". **Stratifichiamo la carica quando vogliamo utilizzare una miscela povera:** con una miscela povera le temperature diminuiscono quindi abbiamo minor ossidazione di HC, abbiamo maggiori problemi di spegnimento della fiamma perché lo strato di spegnimento a parete diventa più spesso... inoltre se aggiungiamo questo ulteriore problema rappresentato dal minor tempo di evaporazione del combustibile durante la fase di compressione, il livello di HC allo scarico sale molto.

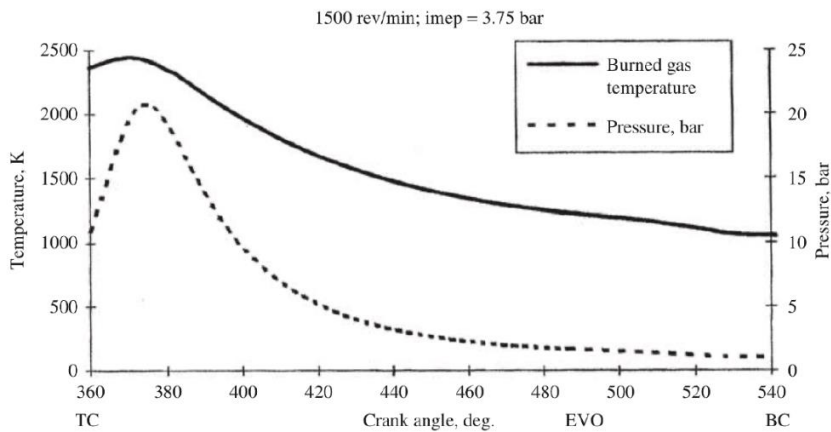
### - Analisi del processo di ossidazione

L'ossidazione dipende da:

- **Disponibilità di ossigeno;**
- **Temperature sufficientemente elevate** compatibilmente con il **tempo a disposizione.**

(Se avessimo ossigeno e tutto il tempo che vogliamo allora basterebbero temperature leggermente elevate perché gli HC si ossidino)

Il diagramma riporta la **temperatura media dei prodotti della combustione** nel cilindro in funzione dell'angolo di manovella:



Dall'EVO: Exhaust Valve Opening, inizia lo scarico spontaneo: la temperatura è superiore ai **1000-1200 [K]**

### Velocità di formazione degli HC:

$$\frac{d[HC]}{dt} = -6.7 \cdot 10^{15} \exp\left(\frac{-18735}{T}\right) \tilde{x}_{HC} \tilde{x}_{O_2} \left(\frac{p}{RT}\right)$$

$\tilde{x}_{HC}, \tilde{x}_{O_2}$ : concentrazioni dei reagenti

Qui non scriviamo costante di Arrhenius per  $= -6.7 \cdot 10^{15} \exp\left(\frac{-18735}{T}\right)$  poiché ogni idrocarburo dovrebbe avere la sua costante ma qui stiamo considerando tutti gli HC.  $6.7 \cdot 10^{15}$ ,  $-18735$  sono parametri da identificare, non sono propriamente un fattore sterico e un'energia di attivazione; “-” poiché, stando ossidando, gli HC diminuiscono.

Utilizzando leggi di questo tipo, la cui formula è giustificabile con la teoria e i cui valori numerici delle costanti sono ottenibili tramite opportuni processi di Tuning, possiamo studiare il fenomeno e andare a calcolare un:

### Tempo caratteristico dei processi di ossidazione:

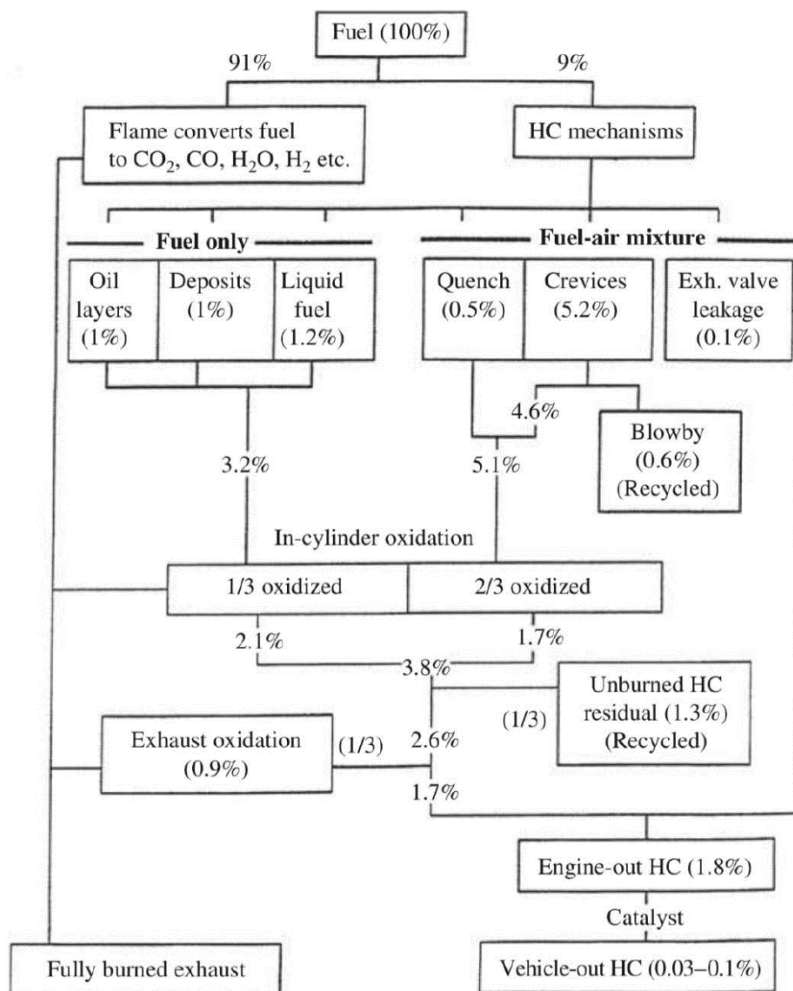
$$\frac{1}{\tau_{HC}} = \frac{1}{[HC]} \frac{d[HC]}{dt}$$

Questo **tempo caratteristico di ossidazione ( $\tau_{HC}$ )** è inferiore a **1 [ms]** per temperature superiori a **1250 [K]**. Quando la temperatura scende al di sotto dei **1000 [K]**, allora il tempo può superare i **50 [ms]**. Arriviamo a questa bassa temperatura **alla fine dello scarico forzato** oppure nel collettore di scarico. Se il tempo caratteristico è inferiore a 1 [ms] l'ossidazione è istantanea di fatto, o meglio **la cinetica dell'ossidazione non è il fattore controllante ma lo è il mescolamento con l'ossigeno.**

**Quindi nel cilindro dove le temperature sono superiori ai 1250 [K] il fattore controllante è il mescolamento con l'ossigeno: gli HC già mescolati con l'ossigeno ossidano quasi tutti (circa 2/3); gli HC prodotti da olio lubrificante, combustibile liquido in camera, parte dei CCD, devono prima mescolarsi con l'ossigeno, quindi di questi se ne ossideranno molti meno (circa 1/3).**



**- Considerazioni riassuntive**



Fuel = gasoline  
 Stoichiometric A/F  
 Speed = 1500 rev/min  
 Inlet pressure = 0.46 atm  
 Imep = 3.8 bar, bmep = 2.7 ba  
 Spark timing = MBT (20° BTC  
 Warmed-up coolant and oil

I numeri in parentesi tonda indicano il cosiddetto: "HC emission index", pari alla % in massa di HC rispetto alla quantità di combustibile iniettato.

Nota: Il 9% (considerando un certo carico; solitamente dal 5 al 9%, quindi diciamo che il 9% rappresenta il massimo) rappresenta la % degli idrocarburi costituenti il combustibile che viene occultata. Notiamo come si dividono i meccanismi in base a cosa occultano, se solo combustibile oppure un mix di aria-combustibile. I depositi in realtà dovrebbero stare da entrambe le parti.

Quello che troviamo alla fine "rappresenta" l'effetto ambientale mentre il **9% iniziale rappresenta l'effetto sulla coppia.**

**- Effetto dei principali parametri motoristici sulla formazione di HC [LEZIONE 11: 25/10/19]**

- 1) Dosatura
- 2) Anticipo di accensione
- 3) Velocità angolare
- 4) Carico
- 5) Temperatura delle pareti
- 6) Geometria del sistema di combustione
- 7) EGR

Rispetto ai parametri sulla formazione di NO:

- 1) Dosatura
- 2) ~~Frazione di gas residui~~
- 3) Anticipo di accensione
- 4) Velocità angolare
- 5) Carico
- 6) Temperatura delle pareti
- 7) Geometria del sistema di combustione
- 8) ~~Umidità aria ambiente~~
- + EGR

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

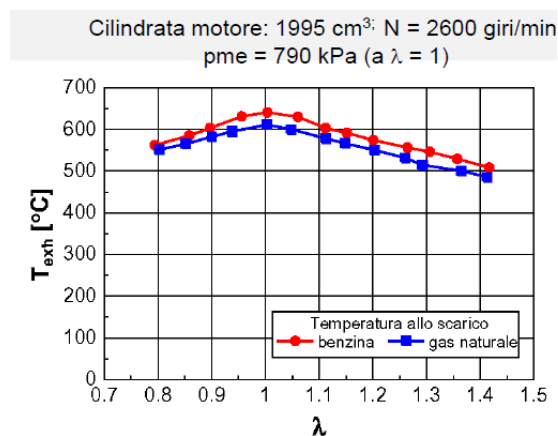
I livelli di HC allo scarico sono influenzati in modo significativo dai fenomeni di ossidazione che avvengono in camera e nel Sistema di scarico. I principali fattori che influenzano tale ossidazione e che dipendono dalla dosatura sono:

- La temperatura dei gas combusti;
- La concentrazione di ossigeno.

Infatti, l'incremento della temperatura dei gas o della disponibilità di ossigeno nelle fasi di espansione e scarico nel cilindro e nel sistema di scarico, comporta una maggiore ossidazione degli incombusti e dunque una tendenza alla diminuzione delle emissioni di HC.

La massima temperatura dei gas combusti in camera si raggiunge per miscele leggermente ricche (all'inizio della fase di espansione, cioè poco dopo il PMS di combustione).

-> Al termine dell'espansione e durante il processo di scarico, i valori massimi di temperatura si raggiungono invece per miscele stechiometriche. Diminuiscono andando verso il ricco (perché c'è l'effetto di diluizione del combustibile) o verso il povero (perché migliora l'efficienza del sistema)



### Miscela ricca:

Considerando il primo grafico: andando verso il ricco, dove le temperature al termine dell'espansione e durante il processo di scarico sono più basse, aumenta la produzione di HC. Ma non è l'unico parametro di cui tener conto.

Le principali cause delle elevate concentrazioni di HC allo scarico per miscele ricche sono (↑HC):

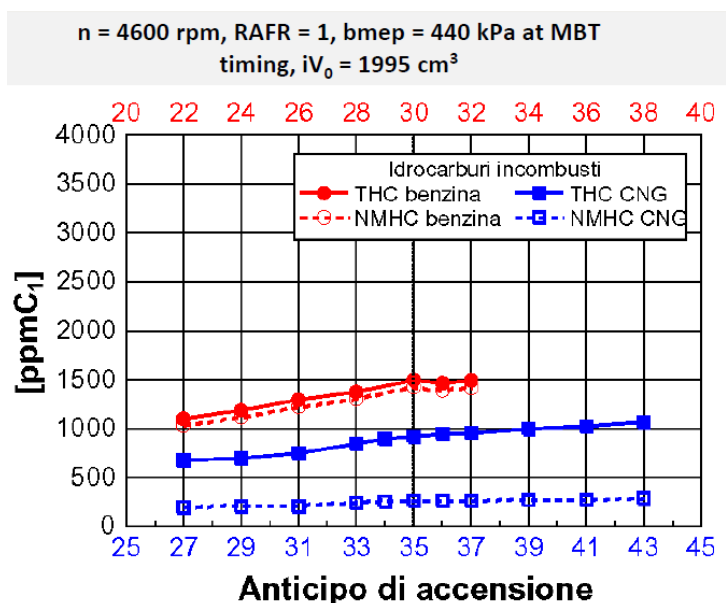
- a) Maggiore spessore dello strato di spegnimento a parete e maggiore concentrazione di HC al suo interno e negli interstizi (lo strato di spegnimento a parete è minimo nel leggermente ricco; aumenta man mano che arricchiamo);
- b) Maggiore diffusione degli HC nello strato di olio a parete (aumenta infatti la pressione parziale del combustibile durante la fase di compressione);

$$\omega_{interface} = \frac{m_{f,oil}}{m_{oil}} = \frac{M_{gas}}{M_{oil}} \frac{p}{H} Y_{in.}, \text{ con } Y_{in.} = \frac{m_{f,cyl}}{m_{gas,cyl}}; \text{ quindi } Y_{in.} \uparrow: \omega_{in.} \uparrow m_{f,oil} \uparrow HC_{oil} \uparrow HC_{exit} \uparrow$$

- c) Maggiore contributo degli strati di spegnimento a parete;
- d) Mancanza di ossigeno nel cilindro e nel sistema di scarico che riduce l'ossidazione degli HC che sfuggono al processo di combustione in combinazione con le più basse temperature.
- e) Inoltre bisogna tener conto che nel campo del ricco il CO presente entra in competizione con gli HC per ossidarsi e, specialmente nel caso di molecole difficili da ossidare come il metano, determina un ulteriore aumento di HC.

I livelli di HC diminuiscono avvicinandosi alla dosatura stechiometrica (↓HC): si riducono infatti gli effetti a-c) precedenti, mentre l'aumento della concentrazione di O<sub>2</sub> nei gas combusti, accompagnata dall'aumento delle temperature dei gas in camera e durante l'espansione e lo scarico, favorisce l'ossidazione degli HC.

## 2) Anticipo di accensione



[Domanda (9) per il Prof.: nella “didascalia” non dovrebbe esserci  $\lambda=1$  anziché “at MBT Timing”?] [No, è corretto;  $p_{me} \leftrightarrow$  MBT;  $RAFR = 1 \leftrightarrow \lambda=1$ ]

L’anticipo di accensione è misurato come gradi prima del TDC.

Notiamo che ci sono due scale diverse: rossa per la benzina e blu per il gas naturale.

Uno di questi punti è rappresenta lo **MBT Timing: 30 per la benzina e 35 per il gas naturale (il metano brucia un po' più lentamente per cui dobbiamo aumentare l’anticipo)**.

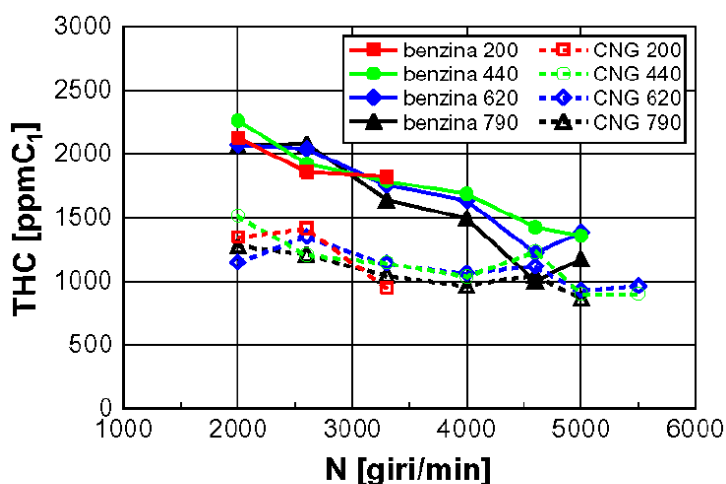
Nel caso del gas naturale la curva si interrompe perché non serve andar oltre (la coppia diminuisce troppo); Nel caso della benzina la curva si interrompe prima, perché altrimenti il motore detonerebbe.

**Aumentando l’anticipo di accensione le emissioni di HC aumentano.** Quindi se volessimo limitare la produzione di HC dovremmo diminuire l’anticipo di accensione. Potremmo fare una considerazione del genere: nel punto di MBT Timing abbiamo coppia massima; ritardiamo leggermente l’anticipo (= diminuiamo l’anticipo), abbiamo sempre una coppia alta, quindi una minima penalità sull’efficienza, ma una considerevole riduzione di HC ( e di NOx).

Un ritardo dell’accensione rispetto all’MBT timing determina:

- a) **Minori picchi di pressione e quindi un minore immagazzinamento di HC negli interstizi e una minore diffusione nello strato d’olio a parete (↓HC);**
  - b) **Picco di pressione ritardato**, per cui gli HC fuoriescono dagli interstizi con un getto meno intenso e in una fase ritardata del ciclo, caratterizzata da minori temperature, e sono così meno soggetti all’ossidazione nel cilindro (↑HC);
  - c) **Una combustione ritardata**, cioè spostata verso la corsa di espansione dello stantuffo, che determina a sua volta:
    - **Maggiori temperature dei gas combusti nel cilindro durante le fasi di espansione/scarico** nonché dei gas nel sistema di scarico (per effetto della minore efficienza del sistema) e quindi una maggiore ossidazione degli HC in camera e nel sistema di scarico (↓HC);
    - **Lo sviluppo della combustione in una fase del ciclo in cui il rapporto superficie/volume della camera è minore** e quindi contribuisce a ridurre le emissioni di HC (↓HC); (vedi punto sulla Geometria).
- Gli effetti a) e b) tendono a compensarsi, mentre il c) prevale; pertanto un ritardo dell’anticipo di accensione determina minori concentrazioni di HC allo scarico (↓HC).

### 3) Velocità angolare

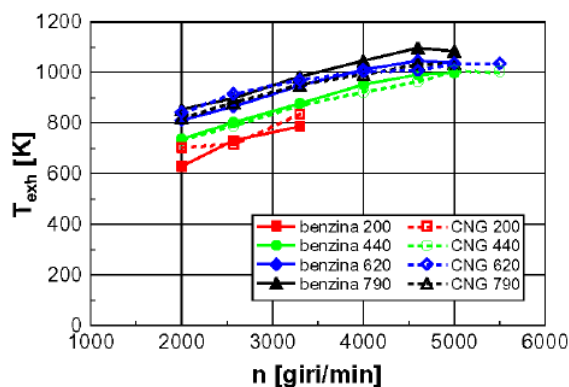


Cilindrata motore: 1995 cm<sup>3</sup>;  $\lambda = 1$ , anticipo di MBT

Le concentrazioni di HC allo scarico tendono a ridursi all'aumentare della velocità angolare. Come mai?

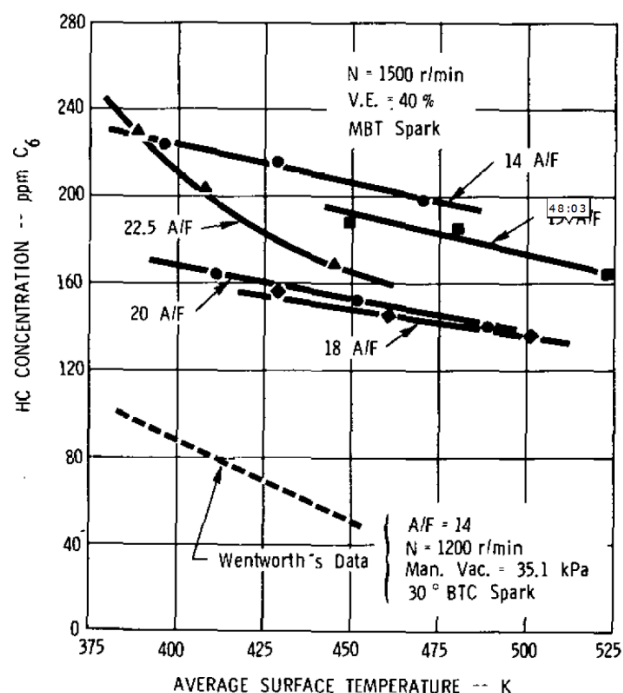
Un aumento della velocità angolare:

- Aumenta il mescolamento turbolento** e la diffusione degli eddies, **migliorando il processo di propagazione del fronte di fiamma**; inoltre, la maggior turbolenza promuove l'ossidazione degli HC provenienti dagli strati di spegnimento in camera ( $\downarrow$ HC);
- Aumenta la turbolenza nei condotti di scarico**, producendo un migliore mescolamento che, a sua volta, promuove le reazioni di ossidazione (se, ovviamente, è presente sufficiente tenore di ossigeno nei gas di scarico) ( $\downarrow$ HC);
- Aumenta le temperature durante le fasi di espansione e scarico per effetto della riduzione degli scambi termici con le pareti**: vengono quindi favorite le reazioni di ossidazione degli HC ( $\downarrow$ HC);
- Riduzione del tempo di residenza** ( $\uparrow$ HC);
- Riduzione della frazione di gas residui** (responsabile della ritenzione di HC in camera); ne consegue un aumento della frazione di HC che dal cilindro raggiunge lo scarico ( $\uparrow$ HC).



Al crescere della velocità angolare gli effetti di diminuzione degli HC prevalgono: dunque le emissioni di HC si riducono (lievemente) al crescere della velocità angolare ( $\downarrow$ HC);

### 5) Temperatura delle pareti



(Combustibile: propano ( $Air/Fuel_{st} = 15.6$ ))

Le concentrazioni di HC allo scarico **tendono a ridursi** all'aumentare della temperatura alle pareti. Come mai?

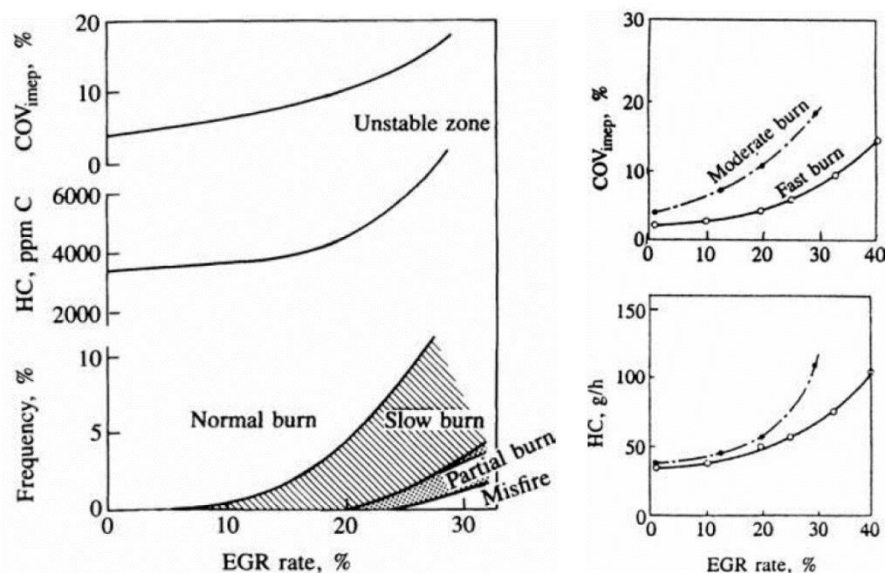
Un aumento della temperatura di parete determina:

- a) **Minor immagazzinamento negli interstizi (diminuisce la densità del gas immagazzinato) (↓HC);**
- b) **Minor assorbimento di HC negli strati di olio lubrificante (diminuisce lo spessore di olio e aumenta il termine HM) (↓HC);**
- c) **Temperature maggiori in camera che aumentano l'ossidazione degli HC (↓HC);**
- d) **Minor spessore dello strato di spegnimento a parete (↓HC);**

Le temperature del refrigerante hanno quindi influenza significativa sulle prestazioni del motore e sulle emissioni di HC: un **aumento della temperatura del refrigerante** comporta complessivamente una diminuzione dell'indice di emissioni di HC di circa **0.4-1.0% al [K]** (con un effetto negativo contenuto sulle emissioni di NO). Inoltre, aumentando la temperatura del refrigerante, e dunque la temperatura di parete, **si riducono le perdite per attrito e si migliora il consumo di combustibile.**

Nota: La temperatura media delle pareti non influenza le reazioni di ossidazione allo scarico.

## 7) EGR



Un aumento dello EGR determina un aumento delle emissioni di HC (↑HC).

**Aumentando lo EGR la qualità della combustione peggiora:** aumenta la frequenza di cicli che bruciano troppo lentamente (peggiorando quindi anche la guidabilità del veicolo, poiché la COV della coppia aumenta). L'intensità dell'effetto negativo è influenzata dalla tipologia della camera adottata: **una camera di combustione "fast burn"**, rispetto a una camera "moderate burn", ha un andamento simile ma è confinato più verso destra e questo significa che le emissioni aumentano ma con un ritardo, **quindi la curva degli HC rimane più bassa a lungo**. Tradotto in altri termini, **un motore ha una tolleranza all'EGR che normalmente è intorno al 20%: questo valore dipende appunto dalla tipologia di camera di combustione adottata (più del 20% per una "fast burn" e meno per una "slow burn", per esempio)**. **Attenzione al "misfiring"** perché, anche se si tratta di pochissimi cicli in cui la carica non brucia, riversa all'esterno tutti gli HC (non è un problema solo di inquinanti ma anche di catalizzatore: si può scaldare molto per via dell'aumento improvviso dell'ossidazione che avviene esotermicamente, e l'eccessivo calore può portare danni).

**Ricapitolando:**

- 1)  $\lambda \sim 1.15$  : HC min (NOx max);
- 3) Anticipo ↓ : HC ↓ (NOx ↓);
- 3)  $n \uparrow$  : HC ↓ (NOx ↑);
- 4) IMEP ↑ : HC ↓ (NOx ↑);
- 5)  $T_w \uparrow$  : HC ↓ (NOx ↑);
- 6)  $\frac{A_c}{V_c} \downarrow$  : HC ↓; Rapporto di compr. ↓ HC ↓ (NOx ↓ ↑); Ang. incr. valv. ↓ HC ↓ (NOx ↑ poiché EGR ↓);
- 7) EGR ↓ : HC ↓ (NOx ↑);



Proseguiamo con un approccio analogo a quello che abbiamo fatto per gli NO:

$$\frac{d[CO]}{dt} = k_1^- [CO_2]_e [H]_e - k_1^+ [CO][OH]_e + k_2^+ [CO_2]_e [O]_e - k_2^- [CO][O_2]_e$$

La velocità di formazione del CO può essere calcolata in modo accurato assumendo che la concentrazione di tutte le altre specie chimiche nelle equazioni (B) e (B') sia pari al valore corrispondente all'equilibrio chimico.

$$\frac{d[CO]}{dt} = R_1 - R_1 \frac{[CO]}{[CO]_e} + R_2 - R_2 \frac{[CO]}{[CO]_e} = (R_1 + R_2) \left( 1 - \frac{[CO]}{[CO]_e} \right)$$

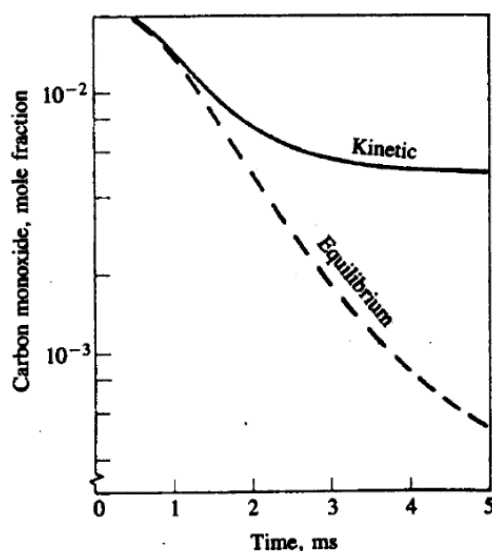
$$R_1 = R_1^+ = k_1^+ [CO]_e [OH]_e = k_1^- [CO_2]_e [H]_e = R_2^-$$

$$R_2 = R_2^+ = k_2^+ [CO_2]_e [O]_e = k_2^- [CO]_e [O_2]_e = R_2^-$$

$R_1, R_1^-$ : velocità di reazione all'equilibrio chimico.

Questo modello di cinetica chimica deve essere abbinato a un opportuno modello termodinamico (che ci fornisce le temperature delle varie zone, in funzione dell'angolo di manovella) (lo stesso fornito durante la spiegazione della formazione degli NOx). Applicando il modello di cinetica chimica ricaviamo i livelli di CO in funzione dell'angolo di manovella o del tempo.

Analizziamo i risultati:



La linea tratteggiata rappresenta l'andamento della formazione di CO se seguisse la legge di equilibrio: dopo un certo tempo avremmo un livello di CO trascurabile in seguito alla riassociazione. In realtà, poiché in camera di combustione al passare del tempo si riducono anche le temperature, si riducono le velocità delle reazioni, la cinetica chimica diventa importante, le reazioni di associazione del CO in  $CO_2$  si congelano e quindi il CO rimane plafonato a un certo livello.

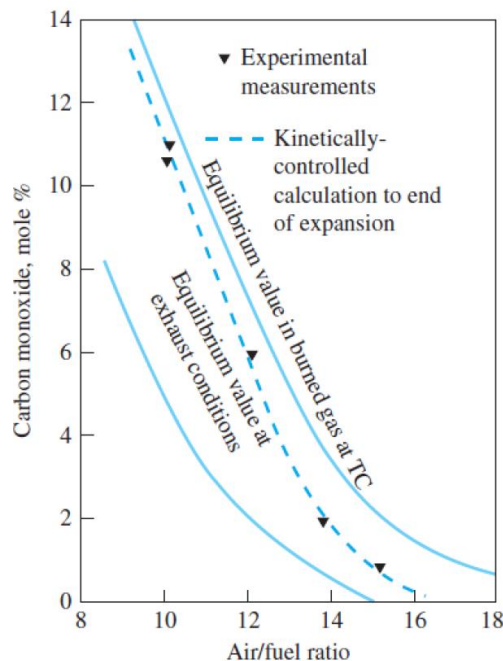
#### - Effetto di alcuni parametri sulla formazione del CO

- 1) Dosatura  $\alpha, \lambda$  e combustibile
- 2) Variazione della dosatura da cilindro a cilindro (ICE unbalance)
- 3) Gradiente di temperatura in camera e allo scarico
- 3) Partenza a freddo (cold start)
- 4) Transitori veloci

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

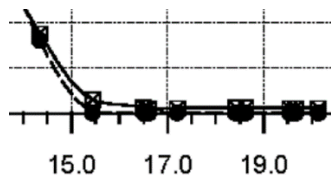
Notiamo che andando verso il ricco la produzione di CO aumenta molto mentre diminuisce spostandoci nel povero. La curva tratteggiata rappresenta l'andamento generale che notiamo coincidere con i punti sperimentali. Ci sono poi **due curve di confine**: la curva continua limite superiore rappresenta il livello di CO calcolato ipotizzando gli equilibri alla temperatura in camera al TDC (per ogni valore di  $\lambda$  è stato calcolato il livello di CO alla Temperatura che si ha al TDC); la curva limite inferiore rappresenta il livello di CO calcolato nelle condizioni allo scarico.

Anche qui notiamo che andando verso il ricco il livello di CO aumenta. Notiamo che le condizioni di formazione del CO sono ben approssimabili nel molto ricco alle condizioni di equilibrio che si hanno in corrispondenza della temperatura dei gas in camera; **le condizioni di formazione del CO sono approssimabili nel molto povero più alle condizioni di equilibrio che si hanno in corrispondenza della temperatura dei gas allo scarico.**



Per  $\lambda < 1$  le concentrazioni allo scarico di CO sono abbastanza prossime alle concentrazioni di equilibrio dei gas combusti durante il processo di espansione;  
 Per  $\lambda = 1$  le concentrazioni allo scarico di CO sono significativamente inferiori alla concentrazione di equilibrio nei gas combusti al PMS e superiori alla concentrazione di equilibrio nei gas nel collettore di scarico;  
 Il modello proposto calcola con soddisfacente accuratezza le emissioni di CO allo scarico per  $\lambda \leq 1$ .  
 Per  $\lambda > 1$  le concentrazioni allo scarico di CO sono sensibilmente superiori ai valori calcolati dal modello. Un contributo significativo alla concentrazione di CO deriva infatti dall'incompleta ossidazione degli HC che dalle sorgenti rifluiscono in camera durante l'espansione.

Considerando nuovamente il secondo grafico:



L'accordo tra modello e risultati sperimentali nel campo del ricco è abbastanza buono.  
 L'accordo tra modello e risultati sperimentali nel campo del povero sembra abbastanza buono: la curva del modello è quasi al livello dello zero mentre la curva sperimentale si mantiene poco più sopra. **La differenza è piccola in valore assoluto ma percentualmente è molto elevata.**  
 Come mai nel povero abbiamo un errore così grande? Questo è dovuto al fatto che **nel campo del povero ci sono altre fonti che possono generare CO**: Man mano che ci spostiamo nel povero diventa importante il CO che si produce per effetto dell'ossidazione parziale degli idrocarburi incombusti (HC).

Le reazioni in camera che portano all'ossidazione degli HC sono più o meno complete: quelli che non si ossidano rimangono così come sono e ce li ritroviamo allo scarico. **Nel collettore di scarico i processi di ossidazione degli HC sono parziali e possono portare come risultato il CO.** Quindi possiamo avere del monossido di carbonio prodotto allo scarico che non deriva dal meccanismo che stiamo trattando ora, ovvero dall'equilibrio congelato del sistema CO e CO<sub>2</sub> ma deriva dal processo di ossidazione degli HC che non si completa restituendo del CO.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Preview: Un motore Diesel può lavorare dallo stechiometrico al povero. Sullo stechiometrico di fatto non lavora mai se non nelle condizioni di carico “full load”. Quindi nella maggior parte dei casi lavora nel povero, per cui le emissioni di CO sono praticamente trascurabili (tranne casi di combustioni molto particolari in presenza di elevata premiscelazione: ci possono essere delle zone con elevato CO che tuttavia dovrebbe consumarsi poco dopo).

### 4) Partenza a freddo (cold start)

A freddo la produzione di CO è più elevata. Abbiamo visto precedentemente che quando facciamo un **avviamento a freddo è necessario arricchire la miscela** (poiché il combustibile evapora di meno, quindi per poter garantire una dosatura reale e avere dei vapori di combustibile che mescolati con l'aria diano una dosatura stechiometrica, **dobbiamo introdurre più combustibile**, perché sappiamo già che una parte di questo combustibile non brucia). Quindi questo arricchimento iniziale comporta una maggior produzione di CO all'avviamento che successivamente andrà a diminuire.

### 5) Transitori veloci

Lo stesso problema del caso precedente si può avere nei **momenti di transitori veloci**: anche in questi momenti **siamo costretti ad arricchire per compensare la deposizione del combustibile sulle pareti e sui condotti**. Di conseguenza riscontriamo in queste fasi una maggior produzione di CO. Per ridurre al minimo questo effetto bisogna fare un opportuno controllo dell'introduzione di combustibile (**ci sono una serie di modelli che tengono conto del fatto che, in funzione delle condizioni, il combustibile iniettato può depositarsi, quindi calcola esattamente di quanto bisogna arricchire durante una fase di accelerazione e di quanto bisogna impoverire nella fase subito dopo; poiché il combustibile depositato a parete durante la fase di accelerazione, finita questa fase, può evaporare e quindi arricchire aumentando quindi il CO**).

Nota: abbiamo finito il discorso sugli inquinanti prodotti da motori SI. Dovremmo esaminare ancora il particolato (includente gli ossidi di zolfo). La maggior parte dei motori ad accensione comandata (SI) sono di tipo PFI (iniezione nel port); non producono particolato, tanto che la normativa non prevede neanche la misura del particolato in questa tipologia di motori.

### - Formazione e caratteristiche del PM

Recentemente sono stati introdotti i motori SI a iniezione diretta (motori GDI: Gasoline Direct Injection). Un motore SI a iniezione diretta, se è **nella configurazione che prevede carica omogenea, può produrre un quantitativo di PM pari a circa 10 volte il PM prodotto dai motori SI di tipo PFI. Se invece il motore è nella configurazione che prevede carica stratificata se ne può avere ancora di più.** Ecco che quindi diventa importante il controllo del PM.

La principale differenza con i motori SI di tipo PFI è rappresentata dal fatto che nei motori SI a iniezione diretta **introduciamo in camera parte del combustibile sottoforma di goccioline liquide.**

a) Questo liquido introdotto in camera bagna in modo significativo la corona del pistone e il cilindro?

Può succedere in certe condizioni che questo capiti.

b) **C'è tempo affinché questo combustibile liquido che ha bagnato le pareti possa evaporare prima che parta il processo di combustione?**

**Evidentemente no.** Se evaporasse si comporterebbe come un motore di tipo PFI.

Le risposte di queste due domande sono in qualche modo collegate. Per esempio, se siamo in una condizione in cui l'evaporazione è lenta, non sono soltanto le gocce di liquido a parete che evaporano lentamente ma vi è anche una maggior penetrazione del getto che quindi può andare a toccare le pareti. Quindi le condizioni che rendono più lenta l'evaporazione sono anche le condizioni che rendono più significativo l'impatto del combustibile liquido con le pareti.

Considerando un motore SI a iniezione diretta **il particolato (PM) si forma secondo due modalità: Nucleation Mode e Accumulation Mode. A parete si formano degli strati di liquido che evaporano e si mescolano con i prodotti della combustione poveri di ossigeno** (più che con l'aria, dato il ritardo). **Di conseguenza è facile che si creino delle zone ricche** dove avviene il mescolamento che diventa sede della formazione del Soot.

**Qualora avessimo una miscela più ricca il fenomeno si amplificherebbe:** anche nei motori che lavorano con miscela stechiometrica, a volte arricchiamo, per aumentare il carico e raggiungere la massima coppia – con conseguente riduzione della T allo scarico che può aiutare a non deteriorare la turbina o il catalizzatore.

Un'altra situazione che può favorire la formazione di particelle carboniose è rappresentata dalla situazione in cui **decidiamo di ritardare l'iniezione di combustibile per fare una carica stratificata: il tempo a disposizione per l'evaporazione del combustibile liquido che va a parete è molto più basso e quindi si possono creare molte più particelle carboniose.**

Nei motori SI, la quantità di combustibile iniettato che porta alla formazione di particolato (PM) è piccola rispetto alla quantità complessiva, ma questa piccola quantità produce molto particolato in proporzione. Quindi in un motore GDI a carica omogenea, in cui riusciamo a far evaporare bene il combustibile e quindi mescolarlo con l'ossigeno, abbiamo una piccola produzione di Soot (10 volte maggiore rispetto a un PFI ma ancora contenuta); **nella configurazione a carica stratificata, quella piccola quantità restituisce molto Soot, in quanto anche se evaporasse tutta non troverebbe ossigeno sufficiente per ossidarsi ma solo burned gas.** Inoltre il problema del wall wetting, in particolare per i motori a carica stratificata, si amplifica durante la fase di avviamento a freddo.

Esistono dei **combustibili contenenti ossigeno** che riducono il problema. Benzine che contengono **etanolo** producono meno Soot rispetto alle benzine che non contengono etanolo. **Oggi tutte le benzine possono contenere ossigeno fino al 7% (al distributore queste benzine sono siglate E7)** in quanto tutti i motori moderni riescono a funzionare bene se il quantitativo di etanolo non supera appunto il 7%. **Alcuni motori possono funzionare con benzine con concentrazioni di etanolo fino all'80%, ma solo alcuni.** L'evoluzione del motore va di pari passo con l'evoluzione del combustibile – battuta infelice: "Guardando alla storia dell'evoluzione del combustibile, ci abbiamo messo 20 anni a ridurre il tenore di zolfo nei gasoli (da 1000 a 10 [ppm]) e adesso in 10 anni vogliamo fare la conversione all'elettrico".

## 3. Motori CI: Compression Ignition

### 3.1 Processo di combustione nei motori CI

#### 3.2 CI: Emissioni primarie

#### 3.3 CI: Ossidi di Azoto (NO<sub>x</sub>)

#### 3.4 CI: Particolato (PM)

#### 3.5 CI: Idrocarburi incombusti (HC)

### 3.1 Processo di combustione nei motori CI

- Processo di combustione
- Sistema di iniezione
- L'iniettore
- Legge di alzata dello spillo
- Descrizione delle fasi del getto
- Forma e composizione del getto dopo 10°
- Ordini di grandezza
- Common Rail
- Parametri di ott. del getto

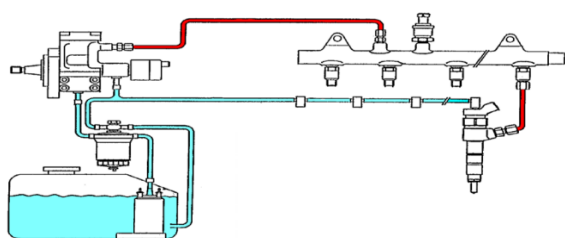
#### - Reazione di combustione

Nei motore ad accensione comandata SI (Spark Injection) la carica viene premiscelata e la combustione avviene con la propagazione del fronte di fiamma, innescata dalla scintilla di una candela in determinate condizioni in funzione del tipo di combustibile.

Nel motore ad accensione spontanea CI (Compression Injection) il combustibile è diverso: ha un'alta reattività e la capacità di autoaccendersi. Viene compressa dell'aria e quando quest'aria raggiunge livelli di temperatura sufficienti il combustibile viene iniettato e si autoaccende.

I combustibili ad alta reattività sono caratterizzati normalmente da un elevato numero di cetano mentre quelli a bassa reattività sono caratterizzati da un alto numero di ottano. Il cetano è un idrocarburo di riferimento che viene utilizzato per descrivere il grado di reattività. In generale il combustibile dei motori CI sono caratterizzati da catene lunghe e dritte (non ramificate) che riescono ad autoaccendersi abbastanza facilmente. L'alta reattività non va confusa con l'alta volatilità. Questi combustibili, che sono altamente reattivi, sono poco volatili, quindi a differenza di quello che capita con la benzina che evapora anche a temperatura ambiente, non evaporano facilmente (per mescolarsi con l'aria deve essere allo stato gassoso) per cui dobbiamo in qualche modo creare una situazione favorevole per permettere il mescolamento con l'aria. Si procede iniettando il combustibile atomizzandolo: si inietta in camera ad alta pressione facendolo passare attraverso un orificio molto piccolo.

#### - Sistema di iniezione



Una pompa di bassa pressione preleva il combustibile dal serbatoio e lo manda a una pompa di alta pressione che comprime il combustibile e lo manda, attraverso un tubo, in un condotto, chiamato "Rail": al condotto sono collegati, attraverso dei tubi, gli iniettori di ciascun cilindro. Il combustibile arriva nel condotto a ~3000[bar] (p modulabile in funzione del carico); arriva un comando elettrico che apre uno stadio pilota che governa una serie di eventi fluidodinamici che determinano l'apertura dello stadio principale. Lo stadio principale è formato da uno spillo: quando lo spillo si apre il polverizzatore si apre e il combustibile entra in camera di combustione. Il combustibile, prima di essere iniettato, passa in un piccolo volume, chiamato "sacco": qui ci aspettiamo di avere temperature dell'ordine dei 350 [K]. Questa temperatura è raggiunta grazie allo scambio termico dello spillo con la camera di combustione.

**- Descrizione delle fasi del getto**

**A.** Un getto di combustibile liquido fuoriesce dalla punta dell'iniettore. **L'aria viene trascinata** formando una miscela di aria e gocce di carburante.

**B.** La miscela vapore del combustibile / aria inizia a svilupparsi lungo i lati del getto (arancione).

**C.** Il getto di liquido raggiunge la massima estensione: vaporizzazione mediante aria calda trascinata.

**D.** Viene visualizzata la **chemiluminescenza**. Incominciano ad avvenire le **preazioni chimiche che non danno luogo a rilascio termico** (facendo un indagine ottica vedremo una piccola tenue luminosità che ci farebbe capire che le reazioni sono partite).

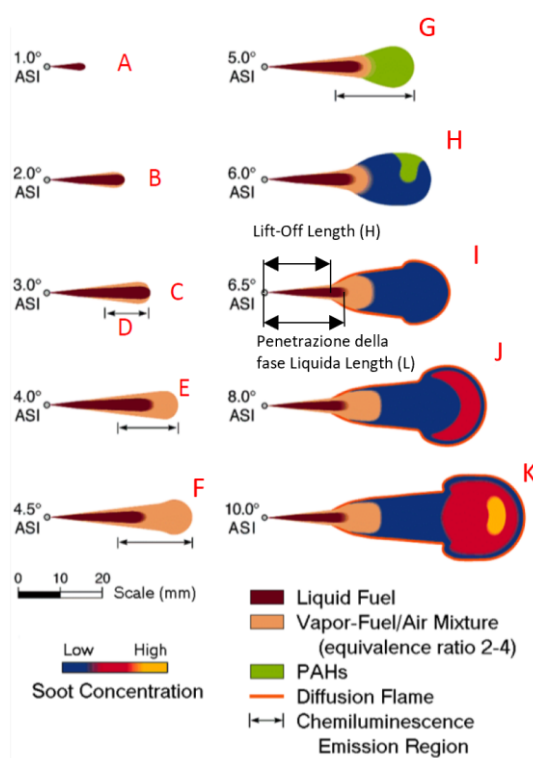
**E.** Corrisponde al **SOC (Start Of Combustion)**. Inizia un **rapido aumento della pressione**. La miscela contenuta nella zona arancione è **globalmente ricca**: non si riesce a raggiungere lo stechiometrico ( $\Phi = 2 \div 4$  all'interno: va bruscamente a zero al confine con l'aria). **L'auto accensione avviene qui dentro** in certe condizioni di temperature e pressioni: **una prima massecola si autoaccende**.

**F.** La **temperatura sale e le massecole intorno vengono coinvolte nel processo**. Tutto il combustibile che si è accumulato tra 1° e 4° (tra punto A e punto E), anche se non ha raggiunto le stesse condizioni della prima massecola, si ossida come questa prima incomincia a bruciare. Quindi questa ossidazione non è di una massecola sola ma è di una **porzione importante di combustibile, tanto più importante quanto è lungo lo "ignition delay"**.

**G.** I prodotti di questa **combustione** (zona verde) **premiscelata** sono tipici di una **combustione ricca**: **rilevanti quantità di CO**, perché il combustibile viene ossidato a CO; **poco di questo CO riesce a diventare CO<sub>2</sub>**; Il resto del combustibile che non è stato toccato direttamente dall'ossigeno, poiché le temperature stanno salendo, potrebbe iniziare dei processi di **"cracking"**, **rottura in idrocarburi intermedi**. **Troviamo quindi CO, H<sub>2</sub>, molti fuel fragment (frammenti di combustibile)**. Tra questi ultimi ce ne sono alcuni particolari, chiamati **PAH: Policiclici Aromatici**: idrocarburi dalla struttura particolare, **ricordante la grafite**, che, come vedremo, sono i precursori del particolato (la zona verde non vuole indicare che all'interno ci sono solo PAH, ma anche questi).

**H.** All'interno della zona verde di ossigeno non ce n'è più perché quel che c'era è servito a formare il CO. Dunque i **policiclici aromatici sono soggetti a reazioni in assenza di ossigeno, reazioni di deidrogenazione e di addizione di atomi di carbonio**, che fanno sì che si creino delle **particelle carboniose (nella zona blu), i precursori del particolato** (che non vuol dire incominci a formarsi già qui).

**I.** La linea rossa rappresenta una nascente **fiamma di tipo diffusivo** che circonda tutto il getto. Nella zona blu ci sono **particelle carboniose, altri frammenti di combustibile, monossido di carbonio e idrogeno** che rappresentano dei potenziali reagenti, avendo molta energia chimica da rilasciare. **Per poter rilasciare questa energia chimica manca, non la temperatura (che sta crescendo e adesso è a circa 1600 [K]), l'ossigeno**. **Allora l'ossigeno diffonde verso i prodotti della combustione e viceversa**: si crea un **sottile strato di reazione**: la fiamma diffusiva (non come quello della propagazione della fiamma nei motori SI, poiché qui è uno strato di diffusione). Questa fiamma diffusiva ha una **dosatura naturale circa stechiometrica, quindi brucia grossomodo con  $\Phi = 1$** .



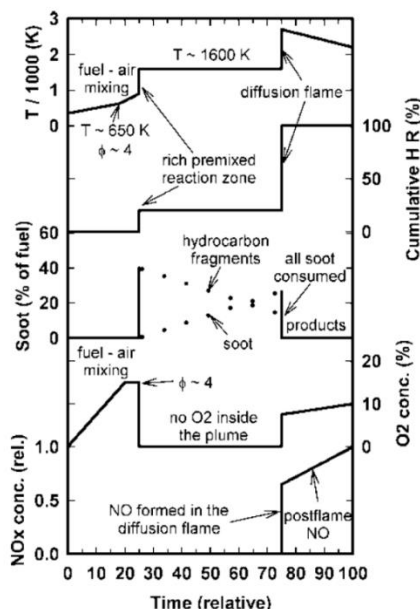
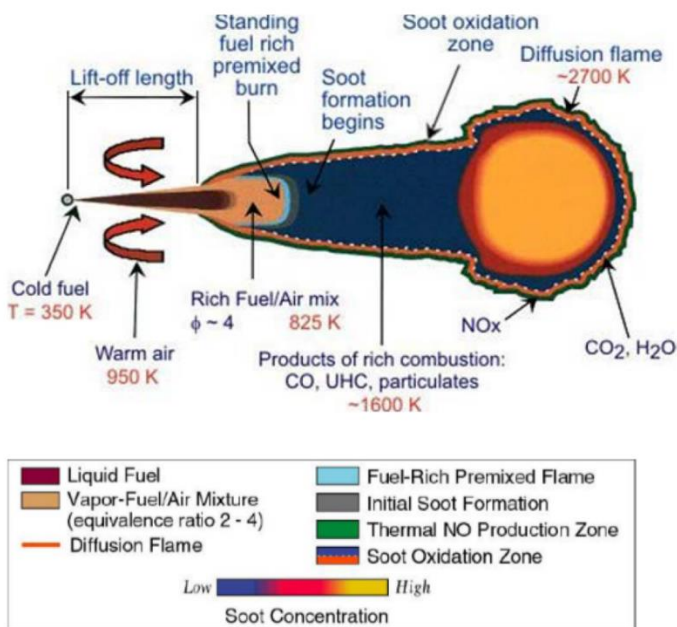
ASI: After Start of Injection



**- Considerazioni sul getto**

- Siccome questo ambiente è tutto circondato da aria, in teoria ci sarebbe tutto l'ossigeno necessario per ossidare tutto quello che si è generato e dunque, in teoria, ci aspetteremmo di ottenere solo  $CO_2$  e  $H_2O$  (vedremo che non è così per via di diverse ragioni).
- Le particelle carboniose, che genereranno il particolato (PM) allo scarico, incominciano a formarsi all'interno della zona grigia (a seguito della trasformazione in assenza di ossigeno dei policiclici aromatici).
- Gli ossidi di azoto (NOx) si formano nella zona verde esterna per effetto del meccanismo termico.
- Trade Off tra NOx e PM: se cerchiamo di modificare questa struttura in modo da ridurre la formazione di PM fatalmente andiamo a favorire le condizioni per cui si formano gli NOx.
- Ci resta da capire dove si formano HC e CO.

**- Ordini di grandezza**



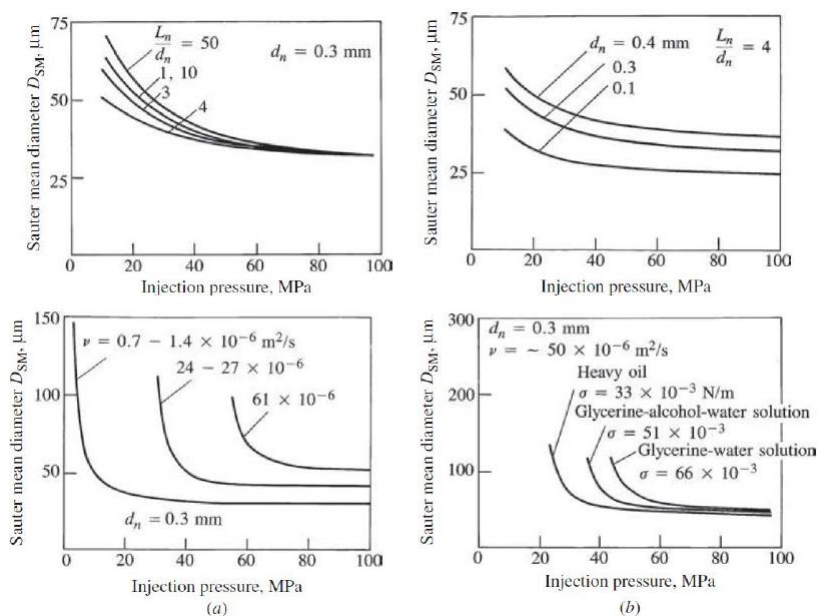
Il grafico sulla destra riporta una serie di andamenti temporali: Temperatura locale, il rilascio termico accumulato, la % di particelle carboniose che si formano (Soot) espresse come % di combustibile introdotto, la concentrazione di ossigeno e i livelli di NOx. L'asse orizzontale rappresenta il tempo che passa da quando una particella considerata esce dall'iniettore. Questo tempo è stato reso relativo: **0 indica lo start e 100 l'uscita dal getto (quindi dalla zona verde)**. È un tempo ma, fissata la velocità della particella, può essere anche una distanza.

La particella entra alla **temperatura del combustibile:  $T \cong 350 [K]$** ; si mescola con **l'aria calda che è a  $T \cong 950 [K]$**  che la fa evaporare (l'aria, durante la fase di compressione, viene riscaldata per effetto della compressione, una parte eventualmente anche dallo scambio termico con le pareti). Si forma una **zona di aria-combustibile a una  $T \cong 825 [K]$** . Notiamo che la pendenza della curva della T cambia, per via delle pre-azioni iniziali che rilasciano una piccola quantità di energia termica, e si raggiungono le condizioni dell'autoaccensione: la miscela si autoaccende (tratto verticale) e avviene la **combustione di tipo premiscelato**; come mai sembra istantanea? Avevamo visto prima nel grafico della legge di alzata che la pendenza della curva blu, corrispondente alla combustione premiscelata, non era proprio una retta verticale. La combustione qui è istantanea perché stiamo considerando una sola particella. **I prodotti della combustione premiscelata sono a  $T \cong 1600 [K]$** ; perché non  $\cong 3000 [K]$  come nei motori SI? Perché  $\phi = 4$ : abbiamo introdotto 4 volte il combustibile che poteva bruciare, quindi non tutto brucia e quel che non brucia si comporta da diluente. Questa temperatura si mantiene costante per il tratto che la particella percorre nella zona dove ci sono tutti i prodotti della combustione premiscelata.

Noi per il momento abbiamo esaminato un caso in cui avviene un'iniezione singola. Quando abbiamo un'iniezione multipla cambia qualcosa? Se la Main è sufficientemente lunga può essere descritta allo stesso modo di quella esaminata. **La Pilota dura meno: può capitare che duri meno dell'ignition delay**, per cui la struttura del getto cambia molto. In quella esaminata, quando parte la combustione (F) l'iniezione continua: la durata dell'iniezione è maggiore dell'ignition delay; **la pilota può durare anche solo 2 gradi del CA**: al punto B potrebbe già finire: **ci sarà meno combustibile da mescolare con l'aria: spesso la combustione della pilota riusciamo a farla con  $\Phi = 1$  anziché 4**.

Possiamo fare anche **un'iniezione** (diversa da quella che stiamo studiando dei motori diesel tradizionali) **ad alta premiscelazione**: iniettiamo non a pochi gradi prima del TDC, ma molti gradi prima, **tipo 60 gradi**. **Diamo il tempo al combustibile di miscelarsi. La combustione è completamente diversa con  $\Phi$  prossimo a 1, che non produce particolato ed eventualmente neanche NOx**. Questo tipo di combustione ha però una serie di inconvenienti, tant'è che dal punto di vista commerciale gli esempi sono molto pochi (**la Mazda**).

**- Parametri che agiscono sul sistema di ottimizzazione del getto**



Dal primo grafico sulla sinistra vediamo che **all'aumentare della pressione di iniezione il diametro medio delle particelle diminuisce**. Aumentando la pressione di iniezione (nel sacco, parente della pressione che c'è nel rail) aumentiamo la caduta di pressione  $\Delta p$ : **questo  $\Delta p$  incide sulla velocità di uscita del combustibile che va a determinare il break up del getto**. Quindi **aumentando la pressione migliore l'atomizzazione**. Possiamo anche agire sulla dimensione dei fori: **al diminuire del diametro di un foro diminuisce il diametro medio delle particelle iniettate**. Ci sono poi altri parametri come per esempio la viscosità. (Questi grafici non sono da studiare nel dettaglio; verranno approfonditi nel corso di propulsori termici. Il concetto è che, a dispetto dei motori SI, abbiamo anche altri parametri quali quelli che agiscono sulla variazione della polverizzazione del getto.)

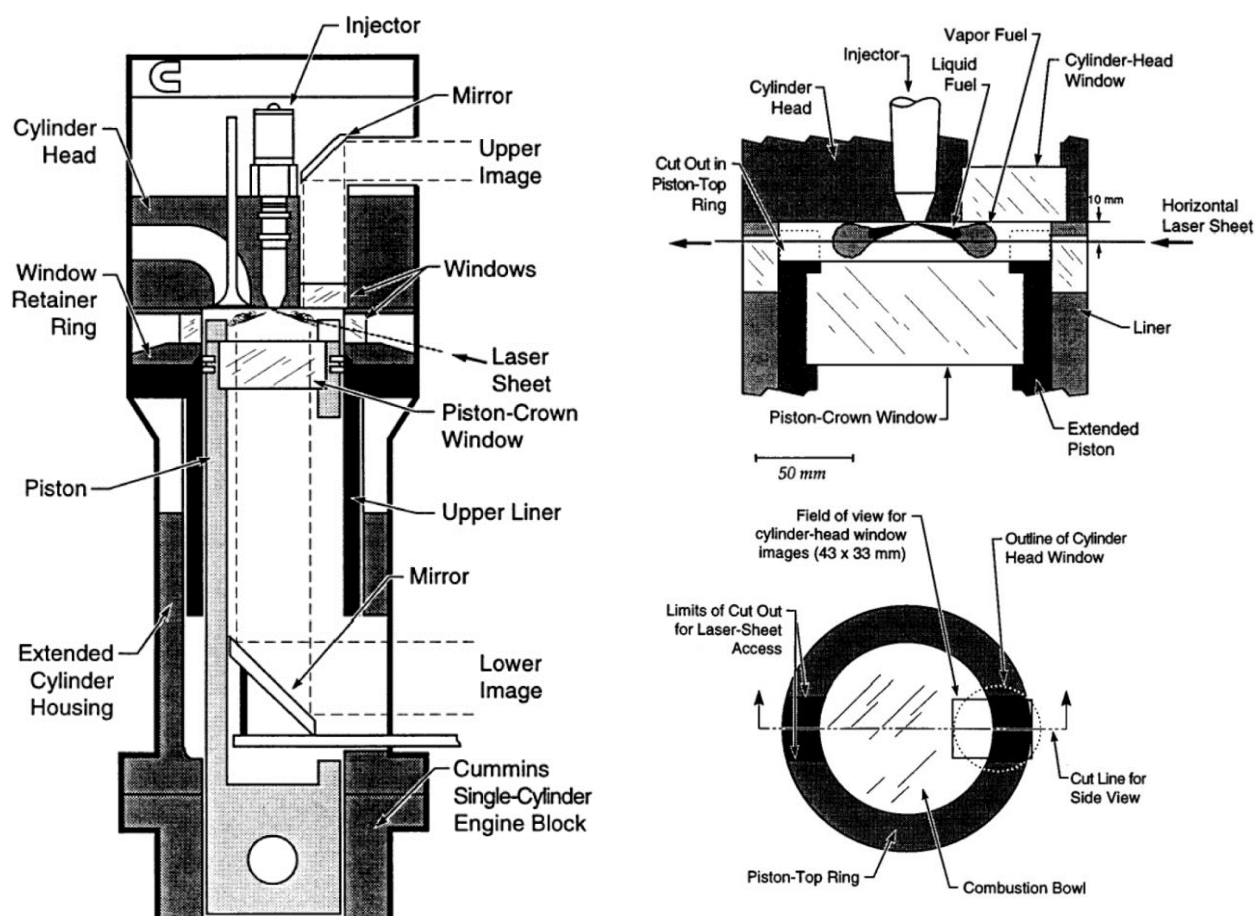
### 3.3 CI: Ossidi di Azoto (NOx)

- Analisi sperimentale della formazione degli NOx mediante diagnostica ottica
- Meccanismi di formazione degli NOx
- Modello di cinetica chimica
- Modello termodinamico e dello spray
- Fenomeni fisici in camera che influenzano la formazione degli NOx
- Effetto dei principali parametri motoristici sulla formazione degli NOx

- 1) Rapporto di equivalenza (carico)
- 2) Anticipo di iniezione
- 3) Diluizione della carica

- **Analisi sperimentale della formazione degli NOx mediante diagnostica ottica**

**Motore con accesso ottico:**

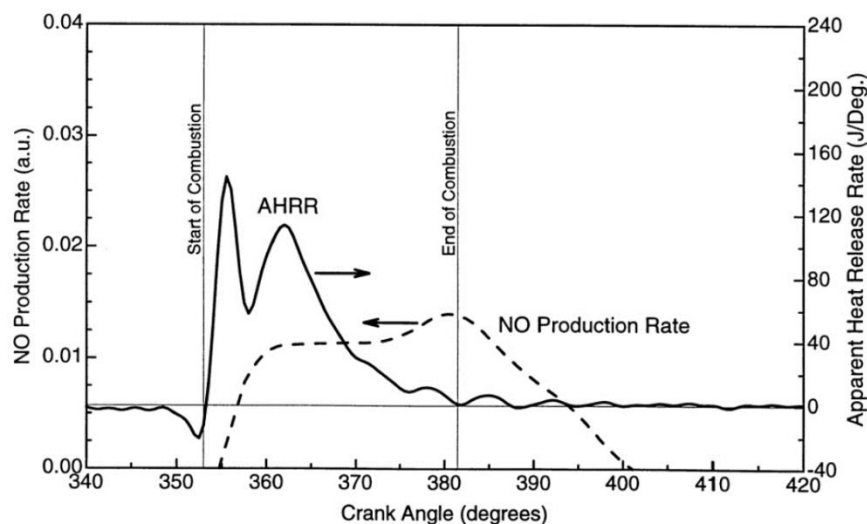


Notiamo: il **pozzetto ricavato nel cielo dello stantuffo**, tipica camera di un motore diesel; un iniettore centrale; **due getti** rappresentati come sbuffi neri (ce ne sono almeno altri 4 intorno); una **finestra di quarzo ottico ricavata nello stantuffo**, **una finestra ricavata nella testa e due finestre laterali** (lo stantuffo è stato anche fresato in modo che la luce possa entrare per permettere la vista da una di queste due finestre laterali). Quindi abbiamo una **serie di finestre** attraverso cui introduciamo dei **raggi laser**: la luce viene raccolta dalla finestra in basso, **riflette su uno specchio** e viene raccolta da una **camera esterna**.

**Attraverso la finestra di destra facciamo passare un raggio laser** che colpisce uno dei getti producendo degli effetti; la luce che passa attraverso la finestra superiore viene analizzata.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Con tecniche ottiche di questo tipo, si ha la **conferma che gli NOx si formano alla periferia del getto**, e utilizzandole in modo opportuno, è possibile quantificarne la concentrazione, ottenendo il **“NO Production Rate”** in funzione dell’angolo di manovella:



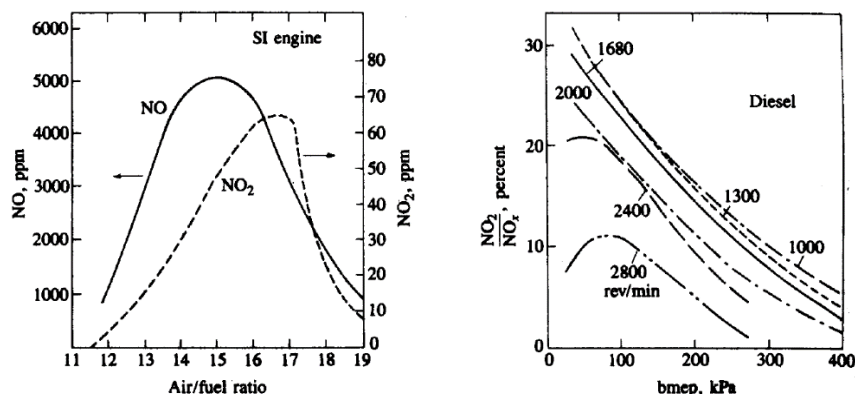
**Sovrapponendo il “NO Production Rate” all’andamento del rilascio termico**, si nota che la maggior parte degli NOx si formano durante la **combustione di tipo diffusivo**. Buona parte del processo di formazione continua anche dopo la fine della combustione poiché **continua nei gas combusti**.

Questo risultato è leggermente fuorviante poiché il motore esaminato è un **motore monocilindrico**, con **corsa molto lunga**, modificato per permettere l’analisi; il **rapporto di compressione**, per far funzionare il tutto, è **ridotto**: ne consegue il problema che **potrebbero cambiare le condizioni termodinamiche di combustione**. Allora si compensa modificando l’alimentazione: il motore monocilindro viene alimentato da un **compressore esterno** e la temperatura dell’aria di intake può essere condizionata: si scelgono la pressione e la temperatura dell’aria in modo tale che la pressione e la temperatura al TDC motore siano uguali a quelle del motore di riferimento che ha un rapporto di compressione più elevato. Così riusciamo a compensare gli effetti per la fase di compressione, però durante la fase di espansione, **essendo il rapporto di compressione ridotto, l’espansione sarà ridotta, quindi le temperature saranno più alte (rispetto al caso reale) e dunque saranno riportate concentrazioni più alte di NOx**. Quindi la parte riportata nel grafico dopo la fine della combustione, qualitativamente va bene ma dal punto di vista quantitativo no. **Ci sarà una parte di formazione di NOx dopo la fine della combustione ma in misura minore rispetto ai risultati ottenuti con questa tecnica riportati nel grafico**.

Si possono fare degli studi simili per motori multicilindro ma la situazione è più complessa; bisogna prima capire bene come funziona la situazione del caso più semplice.



**Il meccanismo è coerente con il fatto che i più elevati rapporti  $NO_2/NOx$  nei Diesel si trovano ai bassi carichi, laddove sono più numerose le regioni più fredde che possono congelare la decomposizione di  $NO_2$ .**



Considerando il grafico sulla destra: BEMP cresce con  $\phi$  (il BEMP: Break Effective Mean Pressure, viene regolata con  $\phi$ ). Al ridursi del carico le curve aumentano, quindi la % di  $NO_2$ , poiché il fenomeno di raffreddamento è più importante: **se il carico è più basso la temperatura in generale è più bassa; inoltre c'è molto ossigeno. Non si tratta tanto delle temperature della fiamma diffusiva, in quanto questa brucia sempre con  $\phi=1$ , quindi anche la temperatura con cui avviene non cambierà molto; se il carico è basso nel suo intorno troviamo molta più aria, il mescolamento avviene più facilmente e di conseguenza anche il raffreddamento.** Inoltre vediamo che queste **curve sono anche influenzate dalla velocità angolare: all'aumentare della velocità, la durata del processo si riduce quindi anche il tempo per la formazione di  $NO_2$ .**

**- Modello di cinetica chimica**

**Meccanismo termico (ZM, EZM, SEZM):**

- (1)  $N_2 + O \leftrightarrow NO + N$
- (2)  $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$
- (3)  $N + OH \leftrightarrow NO + H$
- (4)  $N_2 + OH \leftrightarrow H + N_2O$
- (5)  $N_2 + O_2 \leftrightarrow O + N_2O$
- (6)  $O + N_2O \leftrightarrow NO + NO$

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2 \left\{ 1 - \left( \frac{[NO]}{[NO]_e} \right)^2 \right\} \left( \frac{R_1}{1 + \frac{[NO]}{[NO]_e} \frac{R_1}{R_2 + R_3}} + \frac{R_6}{1 + \frac{R_6}{R_4 + R_5}} \right)$$

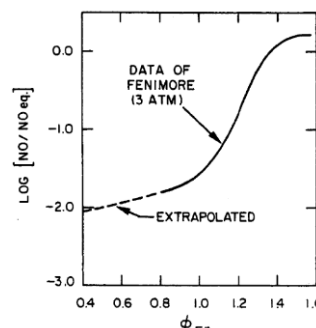
EZM     $N_2O$

Nota: tutto ciò, nei motori SI, andava applicato nelle varie zone; adesso, cambiando il modello termodinamico, andrà applicato ad altre zone.

**Meccanismo Prompt ed effetto dei gas residui:**

- (8)  $CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$
- (9)  $HCN \xrightarrow{+O} NCO \xrightarrow{+H} NH \xrightarrow{+H} N \xrightarrow{+O_2+OH} NO$

Nota: per il meccanismo prompt possiamo dire che, a livello di fiamma, si crea un piccolo quantitativo di NO, per effetto prompt, quindi il meccanismo termico parte da lì e non parte da zero.



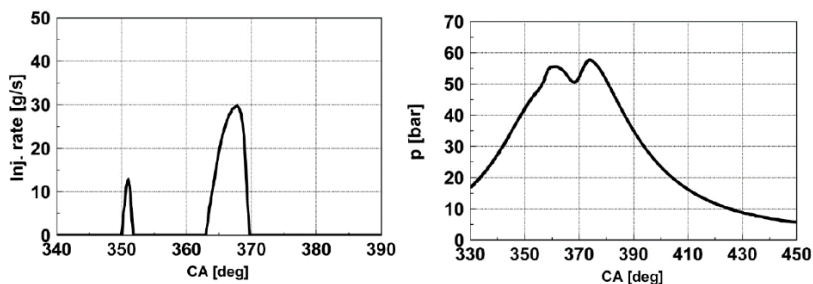
L'effetto dei gas residui nei motori CI è di rilievo poiché usiamo spesso importanti valori di EGR:

$$[NO]_{i,t} N_{i,t} = [NO]_{i,t-dt} N_{i,t-dt} + \frac{d[NO]_i}{dt} N_{i,t} dt + \frac{\left( [NO]_r \frac{M_{b,j}}{M_u} + [NO]_{prompt} \right) \cdot m (x_{b,i,t} - x_{b,i,t-dt})}{M_{b,j}}$$

Devono quindi essere modificati, non le equazioni, ma i pesi che hanno le varie parti; **in un diesel possiamo avere anche il 40% di EGR** (nei benzina non raggiungiamo tali valori perché la combustione diventa instabile sopra il 20%).

Injection rate in funzione dell'angolo di manovella:

Operating point: 1500x5 – Nominal EGR rate = 33.7%



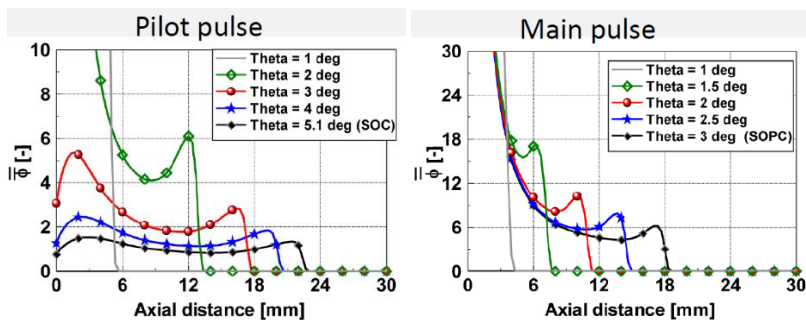
La durata dell'iniezione Pilota è di due gradi (da 350 a 352), quindi è minore dell'ignition delay (5.1°).

La durata dell'iniezione Main è di 7 gradi (da 363 a 370), quindi è maggiore dell'ignition delay (3°).

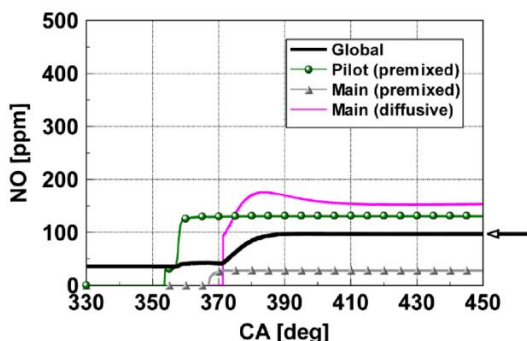
[l'ignition delay rappresenta il tempo in CA prima del SOC]

$\phi$  in funzione dell'angolo di manovella per le iniezioni Pilota e Main:

[VL 14: 15' 40"]



Concentrazioni di NO nei prodotti delle combustioni:



In questo caso l'iniezione Pilota ha durata inferiore all'ignition delay, quindi  $\phi=1$  e gli NO si formano (nei grafici precedenti, nella premiscelata  $\phi=4$  quindi gli NO non si formavano). la Pilota produce NO in quantità importanti dal punto di vista della concentrazione ma incide poco sulla concentrazione globale in quanto produce pochi prodotti della combustione. La concentrazione globale dipende soprattutto dalla concentrazione a seguito della combustione diffusiva dell'iniezione main.

Questi risultati sono ottenuti sperimentalmente.

Si vede come parte degli NO si formano nella seconda parte della combustione molto di meno rispetto a quello che abbiamo visto con le indagini ottiche in quanto nelle indagini ottiche l'effetto del raffreddamento era marginale perché era diverso il rapporto di compressione; qui stiamo considerando un motore reale per cui si sente molto l'effetto del raffreddamento: i livelli di NO a un certo punto si congelano. È vero che in parte continua la formazione degli NO ma l'effetto del congelamento legato al mescolamento con l'aria circostante è molto rilevante, per cui vediamo la curva plafonarsi.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Sono riportati dei rilasci termici apparenti (/energia chimica) al variare della temperatura all'aspirazione. Le curve in realtà si riferiscono ai valori di temperatura al TDC, che derivano però da determinate temperature all'aspirazione (vedi tabella). Notiamo che **riducendo la temperatura all'aspirazione**, e quindi al TDC, **l'ignition delay (ritardo di accensione) aumenta**: l'ignition delay è la distanza tra l'inizio dell'iniezione, SOI, corrispondente al ginocchio della curva Needle Lift, e l'inizio della combustione, SOC, corrispondente al ginocchio della curva considerata. Ricordiamoci che l'ignition delay è fatto di due contributi: uno fisico e uno chimico: il mescolamento con l'aria e la temperatura determinano l'evaporazione del combustibile; la temperatura influenza la velocità delle reazioni chimiche. Quindi **aumenta il tempo a disposizione per il combustibile di mescolarsi con l'aria** nello spray. Quando parte la combustione, il combustibile che si è mescolato con l'aria è molto di più, e questo determina un picco di rilascio termico apparente più importante. Che effetto ci aspettiamo sugli NO? **Da una parte, essendo diminuita la temperatura all'intake, ci aspettiamo una temperatura più bassa quando avviene la combustione premiscelata, ma dall'altra ci aspettiamo una combustione premiscelata più intensa e quindi un effetto di compressione maggiore.** Quale effetto prevale (sulla formazione di NO)? In genere prevale **l'effetto di raffreddamento della camera**: riducendo la temperatura della camera normalmente la formazione di NO si riduce.

Analizziamo il **rilascio termico apparente** in funzione della **pressione dell'aria all'intake**:

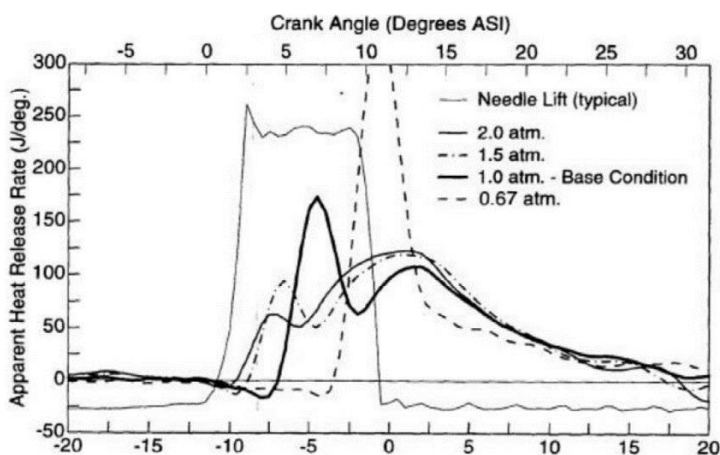


TABLE 6. Operating Conditions for TDC Density Variations

| Case | TTDC [K] | $P_{TDC}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $T_{int}$ [K] | $P_{int}$ [kPa] | $P_{int}$ (C.R.=16:1) [atm. absolute] |
|------|----------|--------------------------------|---------------|-----------------|---------------------------------------|
| P1   | 992      | 11.1                           | 433           | 138             | 0.67                                  |
| P2   | 992      | 16.6                           | 433           | 206             | 1.0                                   |
| BASE | 992      | 24.9                           | 433           | 309             | 1.5                                   |
| P3   | 992      | 33.2                           | 433           | 413             | 2.0                                   |

Ci aspettiamo degli aspetti analoghi: **riducendo la pressione in camera l'ignition delay aumenta**. Questo è dovuto al fatto che ridurre la pressione comporta una diminuzione della densità dell'aria. Il volume che entra in camera ha meno massa d'aria, quindi una capacità termica inferiore, trasferisce meno energia al combustibile che impiega più tempo a evaporare, e quindi si allungano i tempi. Da una parte, essendo diminuita la pressione all'intake, ci aspettiamo una pressione più bassa quando avviene la combustione premiscelata, ma dall'altra ci aspettiamo una combustione premiscelata più intensa e quindi un effetto di compressione maggiore. Quale effetto prevale? Anche in questo caso prevale il primo effetto, ovvero **la diminuzione della pressione di partenza**.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

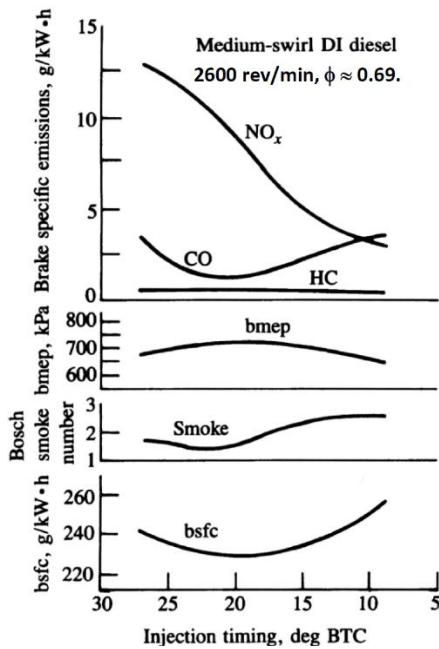
[Domanda (10) per il Prof.: Considerando che: “La fase di combustione premiscelata produce un rapido e spesso sostanziale aumento di HRR e della pressione in camera nell’intorno del TDC. Uno degli effetti di tale aumento di pressione è quello di comprimere la carica presente nel cilindro, aumentandone così la temperatura. La maggiore T della carica produrrà pertanto un aumento della T della fiamma diffusiva, determinando una maggiore produzione di NOx. Quindi ecco che la combustione premiscelata influenza la formazione degli NOx, in modo indiretto.” ... “Da una parte, essendo diminuita la temperatura all’intake, ci aspettiamo una temperatura più bassa quando avviene la combustione premiscelata, ma dall’altra ci aspettiamo una combustione premiscelata più intensa e quindi un effetto di compressione maggiore. Quale effetto prevale (sulla formazione di NO)? In genere prevale l’effetto di raffreddamento della camera: riducendo la temperatura della carica normalmente la formazione di NO si riduce.” ... Ma allora, l’effetto di questi picchi sempre più alti di HRR (a seguito di una carica “più esplosiva”, per via dell’aumento dell’ignition delay, a seguito della riduzioni di p e T all’intake) e che comportano un aumento della T della fiamma diffusiva, perché non sono così rilevanti? Non avevamo detto che il responsabile n1 degli NO è la fiamma diffusiva (quindi la sua T)? ] [Sì, ma se partiamo da T più basse, anche se la carica è più esplosiva, le T a valle della premiscelata saranno più basse]

### - Effetto dei principali parametri motoristici sulla formazione degli NOx [ ↓ LEZIONE 15: 06/11/19]

- 1) Rapporto di equivalenza (carico)
- 2) Anticipo di iniezione
- 3) Diluizione della carica

Analizziamo in prima battuta singolarmente gli effetti dei principali parametri motoristici sulla formazione degli NOx, tenendo presente del fatto che possono avere effetti contrastanti: quando modifichiamo alcuni parametri per limitare la produzione di un inquinante spesso questa operazione ha un effetto negativo su un altro. Per cui sarà importante fare un’analisi **trade off** per tener conto di questo aspetto, per trovare quindi il miglior compromesso per la riduzione della produzione totale degli inquinanti.

Da sempre, per ridurre gli NO<sub>x</sub>, si ritarda lo SOI, riducendo quindi l'ignition delay (il ritardo di accensione).

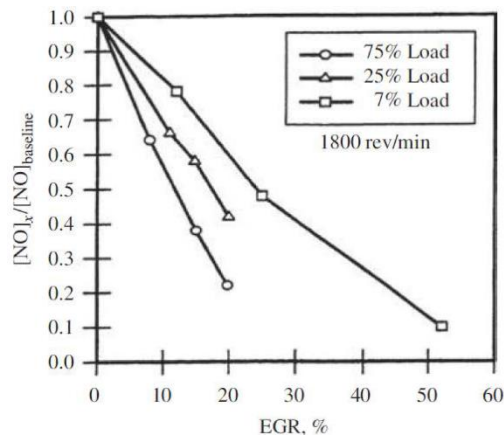


Lo svantaggio è che se abbiamo una condizione di rendimento ottimale che minimizza i consumi di combustibile (bsfc) ci sarà un corrispettivo valore di anticipo di SOI (è il corrispettivo del discorso dello MBT Timing per i motori SI), e dunque un corrispondente livello di NO<sub>x</sub>. **È chiaro che ritardando riduciamo gli NO<sub>x</sub>, ma dovremmo accettare una penalizzazione sui consumi.** Si fa e si accetta se non ci spostiamo di molto. Bisogna accettare il giusto trade off. Inoltre vedremo che aumentando il ritardo, si riducono gli NO<sub>x</sub>, aumenta il bsfc e aumentano anche il "fumo", un indicatore del particolato, e il CO.

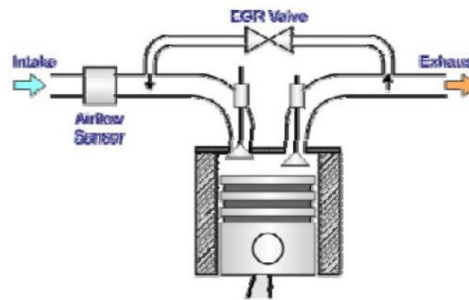
### 3) Diluizione della carica

Aumentando la diluizione della carica le emissioni di NO<sub>x</sub> si riducono.

La diluizione della carica normalmente si fa aumentando lo EGR. **Come nei motori SI, all'aumentare dello EGR le emissioni di NO<sub>x</sub> diminuiscono.** Lo EGR è una pratica molto utilizzata nei motori CI.



Schema funzionale:



Dallo scarico preleviamo una frazione di gas e tramite una valvola EGR li facciamo ricircolare all'aspirazione. Possiamo definire un **grado di EGR(%)** nel seguente modo:

$$EGR(\%) = 100 \cdot \frac{m_{EGR}}{m_i} = 100 \cdot x_{EGR} \quad , \text{ con } m_i: \text{ massa di aria aspirata all'intake}$$

Possiamo definire una **frazione complessiva** ( $x_{EGR+r}$  o  $x_b$ ) considerando la **concentrazione di EGR** ( $x_{EGR}$ ) insieme alla **concentrazione di gas residui** ( $x_r$ ):

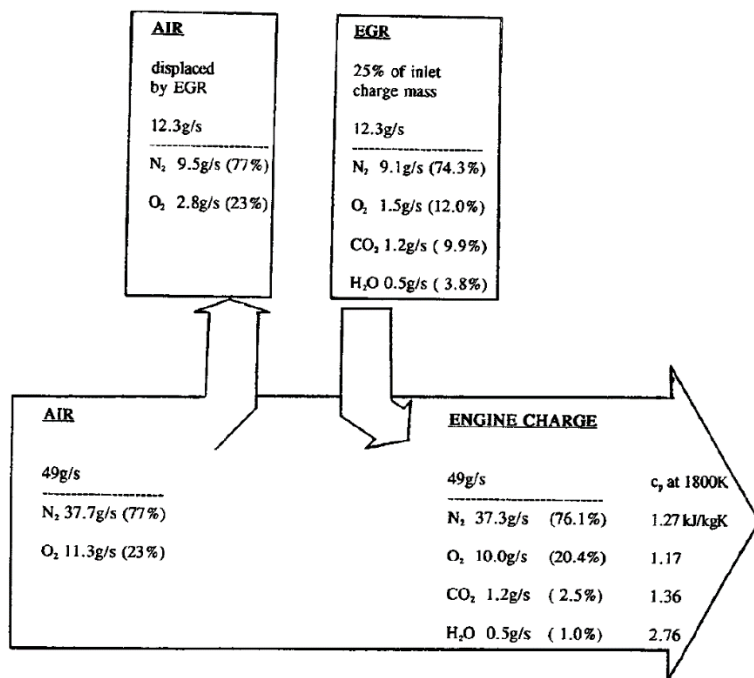
$$x_r = \frac{m_r}{m_c} = \frac{m_r}{m_r + m_i}$$

$$x_{EGR+r} = \frac{m_{EGR} + m_r}{m_r + m_i} = \frac{m_{EGR}}{m_r + m_i} + \frac{m_r}{m_r + m_i} = \frac{m_{EGR}}{m_i} \frac{m_i}{m_r + m_i} + x_r = x_{EGR}(1 - x_r) + x_r$$

### Considerazione: Cooled EGR

I gas di scarico visti precedentemente erano riciclati a 700 [K] e comportavano una riduzione in massa dello stesso volume introdotto in camera di combustione.

Esempio di composizione della carica considerando  $x_{EGR} = 25\%$ :  
(Diesel, 2500 [cm<sup>3</sup>], 2000 [rpm], bmep = 5.6 [bar])

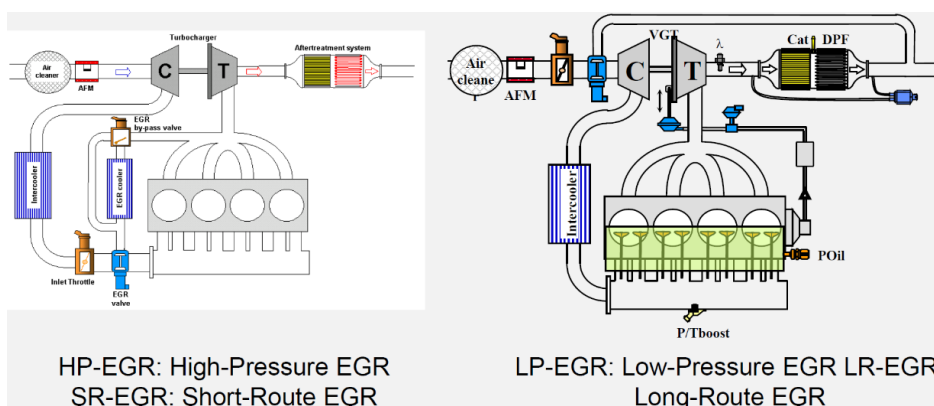


Raffreddando lo EGR abbiamo diversi vantaggi:

- A parità di volume possiamo introdurre una massa maggiore di gas riciclati; quindi, a parità di volume di aria tolta, il grado di EGR, se raffreddiamo, può essere molto più alto. Introduciamo più CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O quindi l'effetto termico aumenta.
- La temperatura della carica di partenza è più bassa; per l'effetto termico e per l'effetto di diluizione, si raggiunge una temperatura di fine combustione inferiore.
- Aumenta anche lo O<sub>2</sub> nei gas di scarico, che può aiutare per esempio a ossidare il particolato (PM) (il trade off tra NOx e PM ci dice che se aumentiamo il grado di EGR diminuiscono gli NOx, il particolato peggiora, ma peggiora un po' meno se refrigeriamo lo EGR in quanto il livello di O<sub>2</sub> allo scarico aumenta).

Quindi, in generale, raffreddare la carica è sempre conveniente.

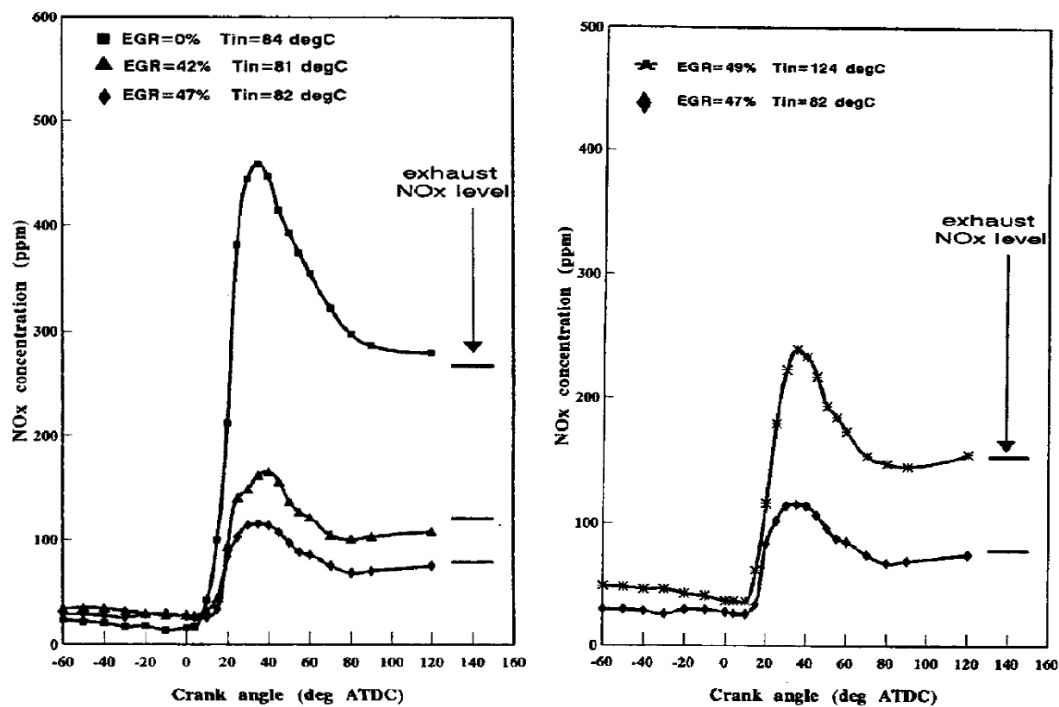
### Schema strutturale dello EGR: HP e LP EGR:



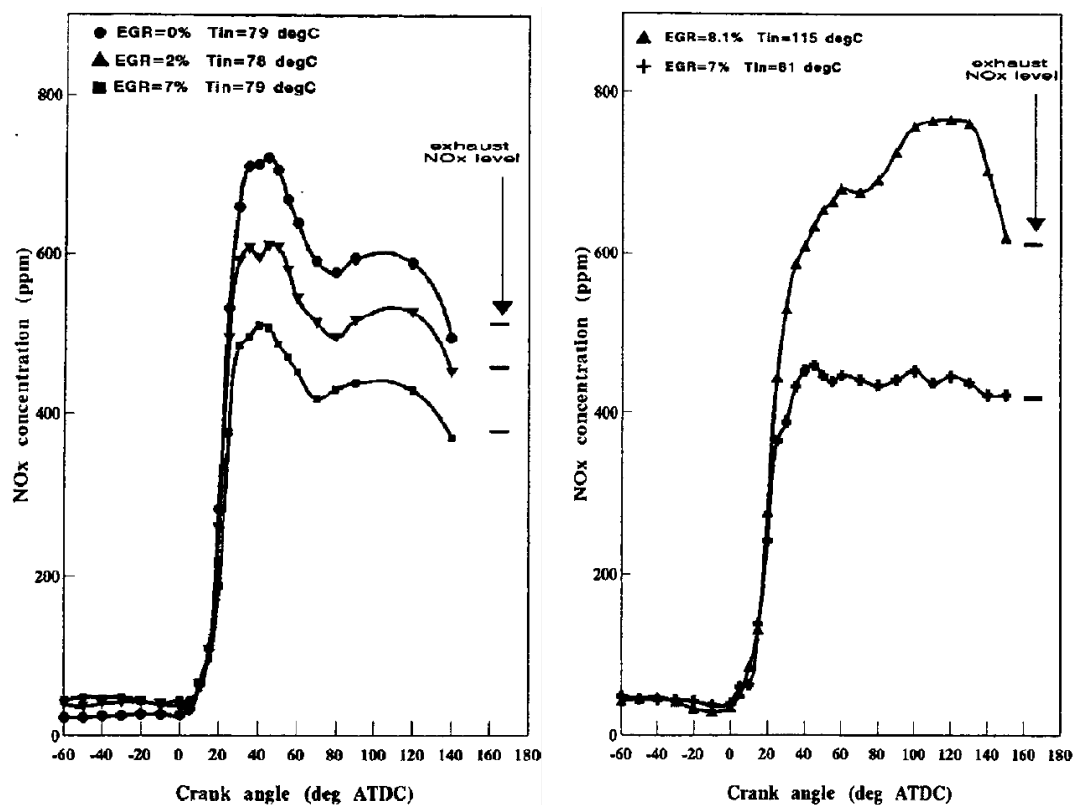
**Effetti dell'EGR a temperature diverse e carichi diversi**

Lo stesso grado di EGR a temperature diverse e a carichi diversi può avere effetti diversi.

(Diesel, 2500 [cm<sup>3</sup>], 2000 [rpm], bmep = 3 [bar])

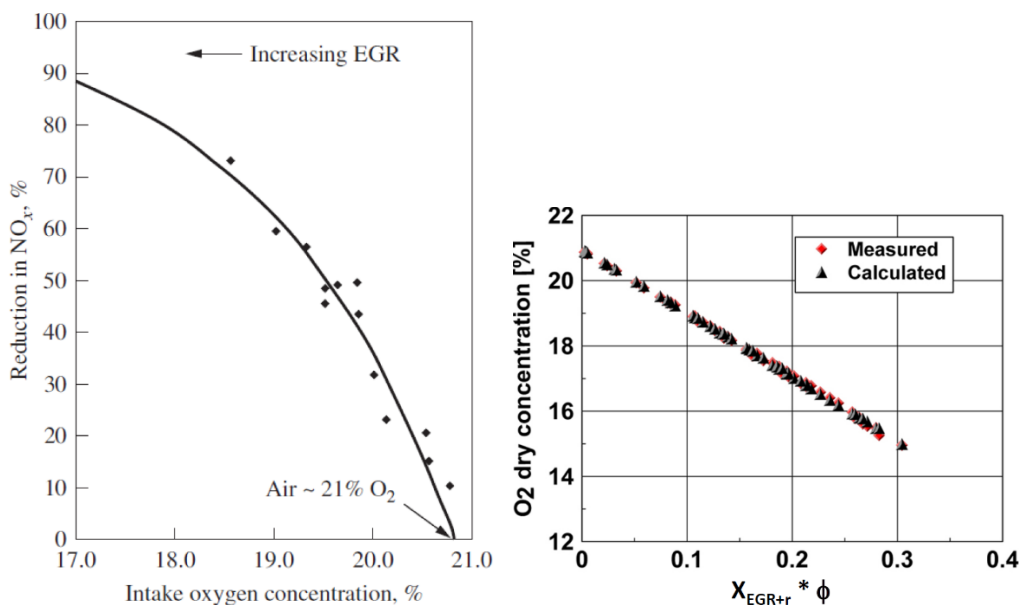


(Diesel, 2500 [cm<sup>3</sup>], 2000 [rpm], bmep = 8 [bar])



### Concentrazione di $O_2$ nel collettore di aspirazione

Notiamo quindi che ci sono degli andamenti generali (aumentando il quantitativo di EGR gli  $NO_x$  si riducono). Ci sono però degli aspetti puntuali che sono difficili da gestire (a parità di grado di EGR se cambia il carico motore cambia l'effetto); per un calibratore la situazione è piuttosto complessa. Allora si è visto che se si correla la riduzione degli  $NO_x$  con la concentrazione di  $O_2$  nel collettore di aspirazione l'analisi si semplifica. Quindi la concentrazione di  $O_2$  nel collettore di aspirazione diventa il parametro principale poiché è ciò che guida l'effetto della diluizione.



Considerando il grafico di sinistra: la freccia indica **aria pura, contenente 21% di  $O_2$** ; spostandoci a sinistra andiamo ad aumentare il grado di EGR: se aumentiamo l'EGR la concentrazione di  $O_2$  diminuisce. I punti, componenti la curva, possono essere trovati a carichi diversi: possiamo avere lo stesso grado di EGR a carichi diversi oppure % diverse di EGR per uno stesso carico o a carichi diversi. **Se guardiamo alla concentrazione di  $O_2$  e non alla concentrazione di EGR possiamo dimenticarci del carico e di altri parametri per valutare l'effetto sulla riduzione di  $NO_x$ .**

Considerando il grafico di destra: la concentrazione di  $O_2$  nel collettore di aspirazione, non solo è un ottimo parametro (metrica) per poter quantificare la riduzione di  $NO_x$ , ma è **inoltre facilmente misurabile, mettendo un sensore nel collettore di aspirazione (costoso)**, oppure ricavabile dalla conoscenza di altri parametri come la concentrazione di EGR e il rapporto di equivalenza. Oggi, essendo la normativa sempre più stringente, si preferisce l'utilizzo dei sensori.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Quindi il particolato è formato da una fase solida (SOL: Solid), formata principalmente da particelle carboniose, una fase solubile (SOF: Soluble Organic Fraction), detta SOF (Soluble Organic Fraction) che comprende i composti organici (idrocarburi) condensati e assorbiti sulle particelle carboniose e i composti organici che si sono condensati sotto forma di particelle liquide e infine dai Solfati ( $SO_4$ ).

Attenzione: questa composizione che troviamo sul filtro dipende fortemente da quel che avviene nel motore, quindi dalla combustione, e da ciò che capita dopo che i gas combusti vengono scaricati.

Il modo in cui viene effettuata la raccolta ha un effetto molto importante sul risultato perché cambia il quantitativo che raccogliamo sul filtro. Le normative sono molto precise in questo campo come vedremo più avanti; devono essere un compromesso tra essere estremamente precise e dare una procedura estremamente ripetibile in modo che laboratori diversi possano dare gli stessi risultati e allo stesso tempo devono mettere a punto una procedura che sia significativa di quel che capita quando il particolato viene emesso nell'ambiente.

Schematizziamo la composizione del particolato:

Fase Solida (SOL: Solid Fraction)

- Particelle carboniose (Soot)
- Ceneri

Fase solubile (SOF: Soluble Organic Fraction), derivanti da:

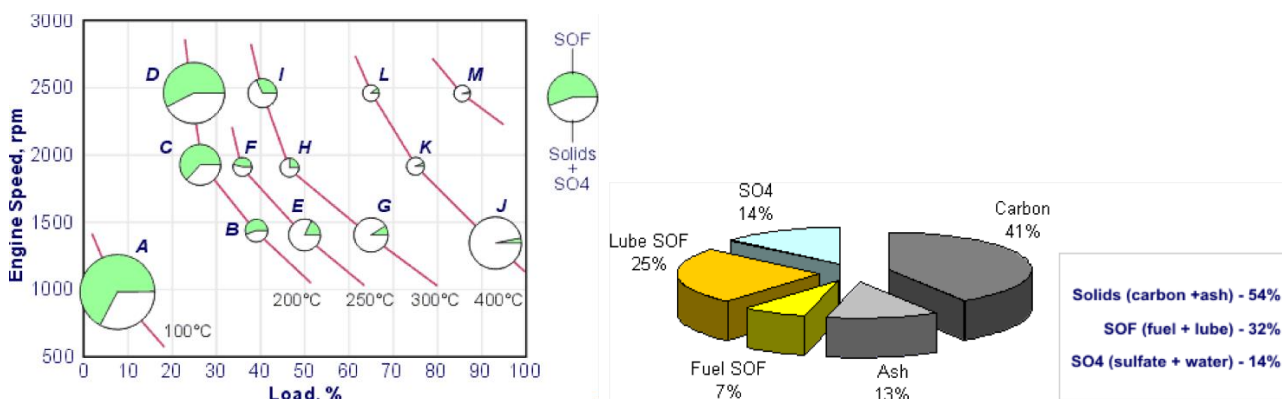
- Composti organici (idrocarburi) derivanti dall'olio lubrificante (Lube SOF)
- Composti organici (idrocarburi) derivanti dal combustibile (Fuel SOF)

Solfati ( $SO_4$ ), derivanti da:

- Acido solforico
- Acqua

In quale proporzione sono?

Non c'è una risposta in quanto la % relativa di questi elementi dipende moltissimo dalle condizioni di funzionamento. Un diagramma rappresentativo deve essere presentato nel seguente modo.



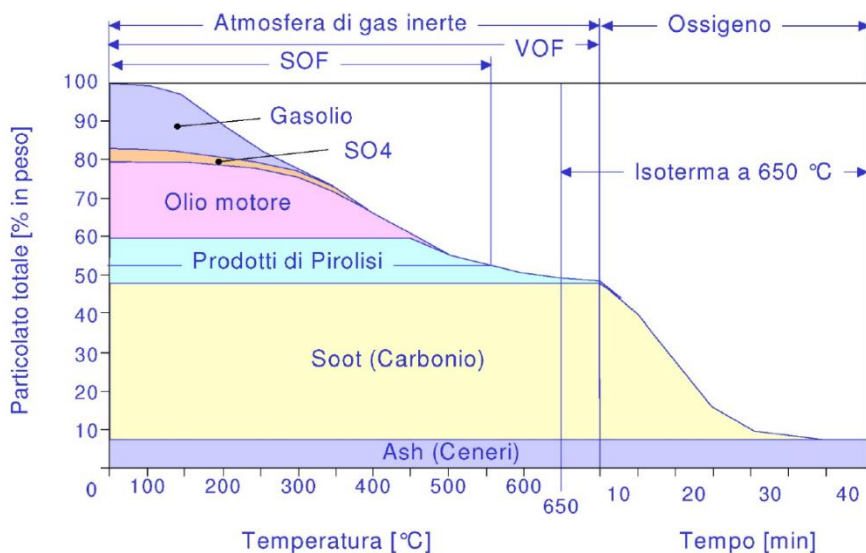
I valori cambiano a ogni punto diverso di funzionamento. I punti motori sono A -> J.

La grandezza delle torte è proporzionale alla massa raccolta sul filtro; il verde rappresenta la SOF; il bianco rappresenta tutto il resto (SOL e  $SO_4$ ).

Notiamo che a bassi carichi e a basse velocità, che comportano basse temperature, i fenomeni di condensazione possono essere rilevanti, mentre ad alti carichi e ad alte velocità sono meno importanti e il particolato risulta più secco, composto principalmente dalle particelle solide e dai solfati.

### Come è trattato il particolato?

Non esiste una composizione tipica; però, indipendentemente dal punto motore, queste sostanze ci sono più o meno tutte.



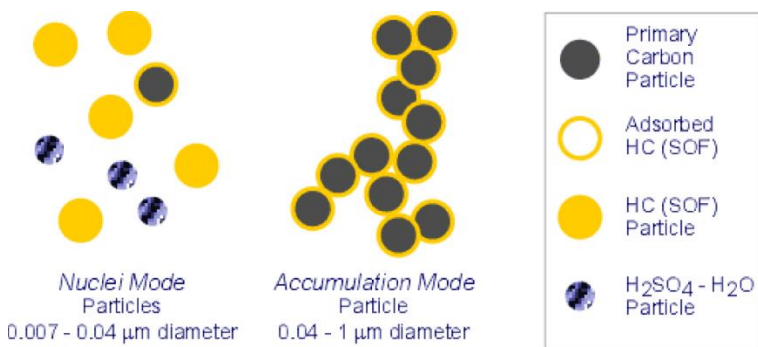
Sull'asse delle ascisse ci sono Temperatura [ $C^{\circ}$ ] e tempo [ $min$ ].

Al crescere della temperatura le varie parti che compongono il particolato scompaiono, perché evidentemente evaporano non facendo più parte del particolato. In particolare la prima a evaporare è la SOF che deriva dal gasolio (il gasolio è fatto normalmente da idrocarburi meno pesanti rispetto a quelli dell'olio lubrificante). Seguono gli  $SO_4$  e la SOF dell'olio motore. Rimane la parte carboniosa. Come facciamo a liberarci del Soot? Non possiamo solo portarli ad alta temperatura perché non evaporano; per cui dobbiamo farli reagire con l'ossigeno. Per poter ossidare le particelle carboniose dobbiamo tenerle in un ambiente ossidante a temperature di  $600 \div 650 [^{\circ}C]$  per un tempo nell'ordine delle decine di [ $min$ ]. A valle di questo processo rimangono le ceneri incombustibili.

Studieremo il filtro antiparticolato: si tratta di un filtro meccanico che raccoglie il particolato. Quando il filtro è saturo deve essere rigenerato: il motore deve essere in grado di farlo da solo. Per la SOF e i  $SO_4$  non sembrerebbe complicato, basta alzare la temperatura. Il grosso problema è eliminare il Soot che richiede alta temperatura, tempo e un ambiente ossigenato. Questo processo, piuttosto lungo, è regolato dal motore (non in modo semplice, perché, richiedendo tempo nascono complicazioni nel momento in cui viene a mancare il tempo: per esempio se spegniamo il motore prima che il processo sia terminato, quando riparte deve portare a ripartire anche il processo).

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Questa si chiama **distribuzione bimodali**: due modi, uno, chiamato **Nuclei Mode**, che fornisce il **picco del numero di particelle**, per controllare le nanoparticelle, l'altro, chiamato **Accumulation Mode**, il **picco della massa**. Troviamo anche il **Coarse Mode**.

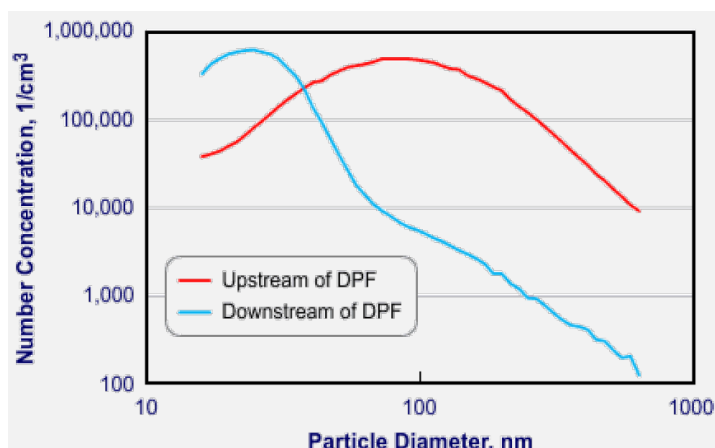


Considerando il **Nuclei Mode**: le nanoparticelle sono composte da **pochissime particelle carboniose** su cui si sono condensati i **composti organici (quindi non deriveranno tanto dal processo di combustione)**, da **SOF**, quindi composti organici che si sono condensati dando luogo a **goccioline**: per condensare devono esserci temperature basse, quindi non deriveranno dalla camera di combustione, piuttosto dallo **scarico**; e affinché possano condensare a se stanti e non andarsi a depositare su particelle carboniose vuol dire che **di particelle carboniose ce ne devono essere poche e molto disperse** e questo capita nelle **ultime parti dello scarico o addirittura a valle del filtro antiparticolato e nell'ambiente**. Troviamo inoltre alcuni solfati (nucleazione etero-molecolare) derivanti dallo zolfo presente nel combustibile.

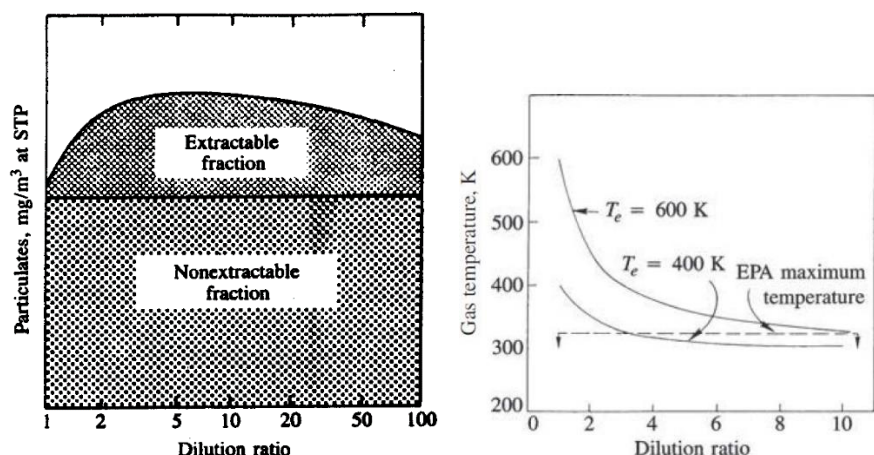
Considerando **l'Accumulation Mode**: troviamo **particelle carboniose** sulle quali vengono assorbiti dei composti organici. Queste particelle derivano soprattutto dal **processo di combustione**.

Considerando il **Coarse Mode**: troviamo le **particelle più grandi**. Si tratta di **particelle metalliche** che derivano **dall'usura del motore e dei condotti di scarico**. Hanno poca importanza sia dal punto di vista della massa che dal punto di vista del numero di particelle. Ecco perché parliamo di **distribuzione bimodale**.

Dunque, il modo di nucleazione può avvenire anche oltre il filtro antiparticolato: il filtro rimuove le particelle: tutto ciò che si è depositato sulla particella viene fermato con esse. **I composti organici che sono ancora allo stato gassoso passano il filtro e condensando danno luogo a goccioline**. Possiamo fare delle iniezioni molto ritardate, le cui cariche non bruciano in camera ma nel DOC, nel catalizzatore ossidante; questo crea alte temperature che favoriscono l'ossidazione del Soot. L'ossidazione del Soot produce idrocarburi incombusti, **CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O** anch'essa, quindi a valle del filtro produce particelle. Quindi attenzione che questo fenomeno, per il quale troviamo particelle a valle del filtro, durante la rigenerazione del filtro può essere ancora più evidente. Oppure alcuni catalizzatori ossidanti possono ossidare non solo gli idrocarburi incombusti, ma anche lo zolfo, creando dei solfati. Questi solfati potrebbero formarsi non al livello del filtro dove verrebbero fermati ma successivamente andando ad aumentare la concentrazione in Nuclei Mode.



Analizziamo il particolato in funzione del rapporto di diluizione:



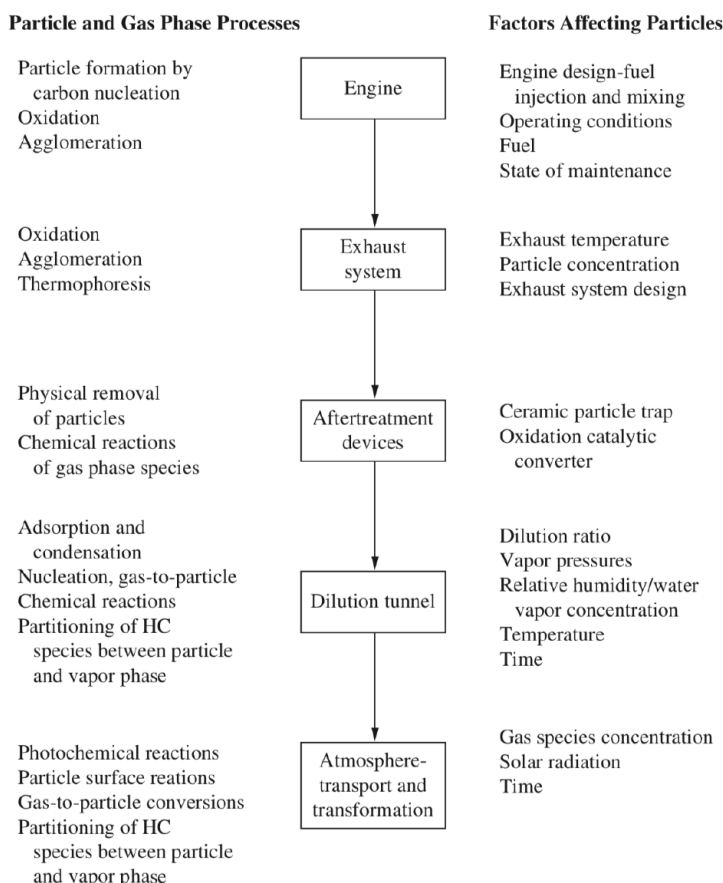
La frazione non estraibile è la frazione solida composta da particelle carboniose che una volta che vengono scaricate nell’ambiente li rimangono immutate. La frazione estraibile è la frazione solubile, composta dai composti organici che si depositano, **inizialmente aumenta aumentando il rapporto di diluizione (effetto della diminuzione di temperatura) e successivamente vanno a diminuire: la temperatura a un certo punto si stabilizza: diminuiscono le pressioni parziali e le particelle che si sono condensate ora evaporano.**

Che rapporto di diluizione scegliamo in laboratorio?

Dovremmo cercare di simulare quello che capita nell’ambiente. Nell’ambiente il rapporto di diluizione è altissimo. Dal momento che non è un fenomeno che riusciremmo a simulare in modo perfetto allora **imponiamo una diluizione per la quale i gas si portino a una certa temperatura per la quale ci ritroveremmo nell’intorno del picco.**

Da qui se ne deduce l’importanza della diluizione: **tutte le tecniche per la misura del particolato prevedono che il particolato non sia misurato nei gas grezzi ma nei gas diluiti.** Dobbiamo da un lato andare a **simulare quel che capita nell’ambiente**, dall’altro farlo in una maniera tale per cui **sia riproducibile da laboratorio a laboratorio.**

Preview: Vedremo, quando studieremo le tecniche di misura, che si prende il particolato scaricato dal veicolo lo si manda in un **tunnel di diluizione** (tubo grande caratterizzato da diametro dell’ordine del [m] e lunghezza dell’ordine di decine di [m]), **dove viene diluito con aria alle condizioni ambientali**, successivamente si fa il prelievo e si misurano la massa e il numero delle particelle.



### Formazione delle particelle carboniose

Nella combustione di un motore diesel, c'è una zona, particolarmente ricca, dove avviene la combustione premiscelata che produce % significative di frammenti di combustibile che ancora non hanno partecipato al processo, oppure **CO e H<sub>2</sub>**. Tra tutti i possibili **frammenti di combustibile** c'è una famiglia particolare, quella dei **policiclici aromatici**, che avviano il processo di formazione delle particelle. I policiclici aromatici già a basse temperature non eccessivamente elevate (**1600 [K]**) condensano il loro **anello aromatico** (l'aromatico base è il benzene, rappresentato con il sestetto aromatico) tra di loro (si uniscono) creando delle **strutture a piani**, che ricordano la grafite, generando le **particelle carboniose**. Questo fenomeno di accrescimento dei policiclici aromatici è stato studiato con un **meccanismo chiamato meccanismo diretto oppure HACA** (Hydrogen Abstraction C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> Addition) (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>: acetilene) (non è richiesta la sua conoscenza all'esame. Per approfondimenti: slide 32/96, L08-Formazione PM-CI del 2019).

La fiamma diffusiva dovrebbe ossidare tutte le particelle carboniose; essendo ad alta temperatura, **nei suoi dintorni**, prima che possano avvenire le reazioni di ossidazione, troviamo particelle carboniose circondate da combustibile ad alta temperatura: qui **si possono generare altri meccanismi per i quali**, non soltanto i policiclici aromatici ma **tutti gli idrocarburi possono essere soggetti a fenomeni di cracking interno**. **Questi fenomeni generano delle specie intermedie**, simili ai policiclici aromatici. Quindi le alte temperature che troviamo in prossimità della fiamma diffusiva inducono delle reazioni di frammentazione tali per cui tutti gli idrocarburi incombusti presenti possono generare prodotti intermedi, alcuni con caratteristiche simili a quelle dei policiclici aromatici e quindi generano, con un meccanismo simile all'HACA, le particelle carboniose. Con riferimento all'ultimo grafico, **questi meccanismi avvengono nel tratto di crescita di N**. Cosa avviene successivamente? La pendenza della retta è descritta dalla derivata di N nel tempo che possiamo esprimere nel seguente modo:

$$\frac{dN}{dt} = \dot{N}_n - \dot{N}_a$$

$\dot{N}_a$ : velocità alla quale i nuclei si possono aggregare

$\dot{N}_n$ : velocità alla quale i nuclei nuovi si generano

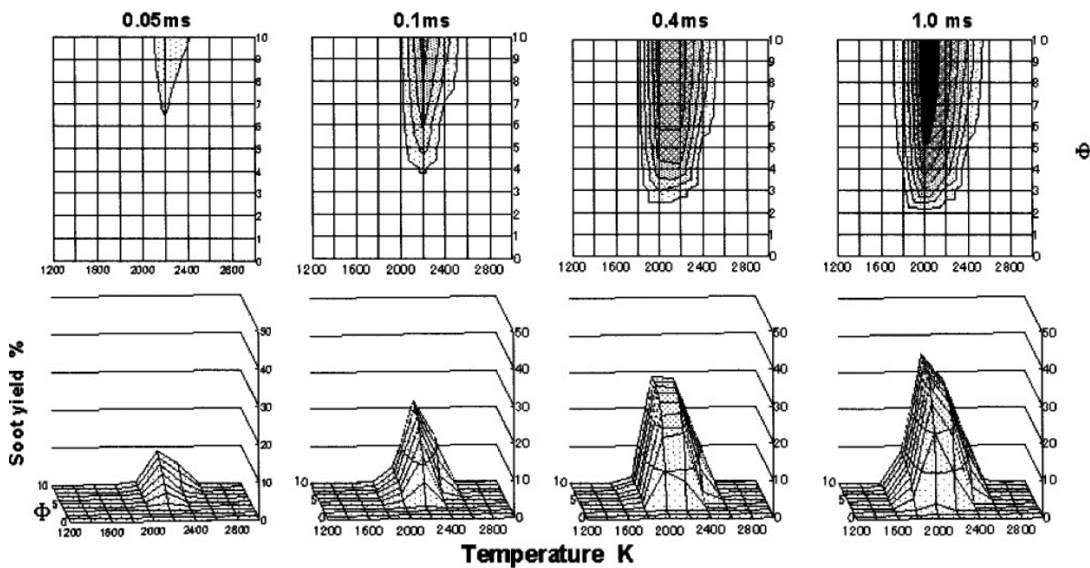
Quindi passando oltre il picco la probabilità che si formino nuove particelle è ampiamente diminuita rispetto alla probabilità che queste **particelle si possano aggregare l'una con l'altra**.

Inoltre succede che queste particelle, oltre a potersi aggregare, possono crescere: questi **due meccanismi, di agglomerazione e crescita superficiale**, avvengono abbastanza contemporaneamente. Questo lo capiamo guardando l'andamento di  $F_V$ : se le particelle si limitassero ad aggregarsi l'una all'altra non ci sarebbe crescita in volume. Dal grafico notiamo che il volume sta aumentando, quindi al meccanismo di agglomerazione si aggiunge il meccanismo di crescita superficiale. La crescita superficiale può avvenire perché ci sono delle reazioni tra le particelle in fase solida e i composti organici in fase gassosa. **L'agglomerazione invece può avvenire con due fenomeni diversi: le particelle possono coagulare** (cioè abbiamo delle particelle "mollie" che si "appiccicano" l'una con l'altra) oppure **particelle più secche** possono **aggregarsi** (si attaccano l'una con l'altra) per effetto, per esempio, di **azioni di Van der Waals o elettrostatiche**.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Combustibile: n-esano;  $p = 6$  [Mpa], EGR = 0%



Sull'asse delle ascisse per tutti i diagrammi troviamo la temperatura [K];

Sull'asse verticale per tutti i diagrammi troviamo  $\phi$ ;

Quando applicheremo il modello dal punto di vista motor.  $\phi$  e T rappresenteranno i valori locali delle zone.

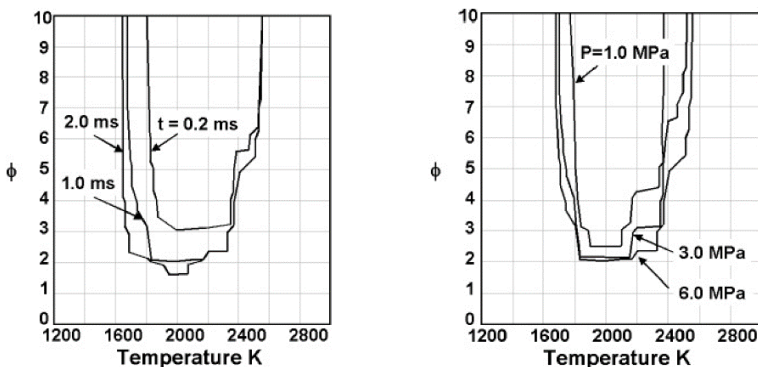
Il diagramma 3D aggiunge quantità di Soot che viene formata.

Ogni colonna riporta il tempo di reazione: rappresenta il tempo utilizzato per ottenere il risultato riportato.

Notiamo che il **tempo di reazione** ha un forte impatto sui risultati. Per un tempo di reazione pari a 0.05 [ms], perché si formi Soot, sono necessari  $\phi > 5$  e  $T > 2000$  [K]. Man mano che aumenta il tempo di reazione la zona di formazione del Soot diventa sempre più ampia. Notiamo che passando da 0.05 a 0.1 [ms] c'è una significativa variazione della zona di formazione del Soot; passando da 0.1 a 0.4 [ms] c'è una variazione ancora significativa, un po' più contenuta; passando da 0.4 a 1 [ms] (più che raddoppiato il tempo di reazione) la mappa cambia ma non più di tanto. Specialmente la parte esterna si mantiene pressoché invariata.

Se lasciamo un tempo di reazione sufficientemente lungo sembra che la mappa si stabilizzi.

Analizziamo la crescita delle linee di contorno:



le linee delimitano la zona contenente il 90% del PM, per tempi di r. diversi.

Anche qui notiamo che da 0.2 a 1.0 [ms] la situazione cambia abbastanza; da 1.0 a 2.0 [ms] molto meno.

Questo significa che, scelto un tempo di reazione sufficientemente elevato, la mappa dal punto di vista della forma è abbastanza universale.

Qual è un tempo di reazione caratteristico per un motore CI? Dipenderà dalla velocità angolare, però, normalmente i tempi di reazione caratteristici sono dell'ordine di qualche [ms].

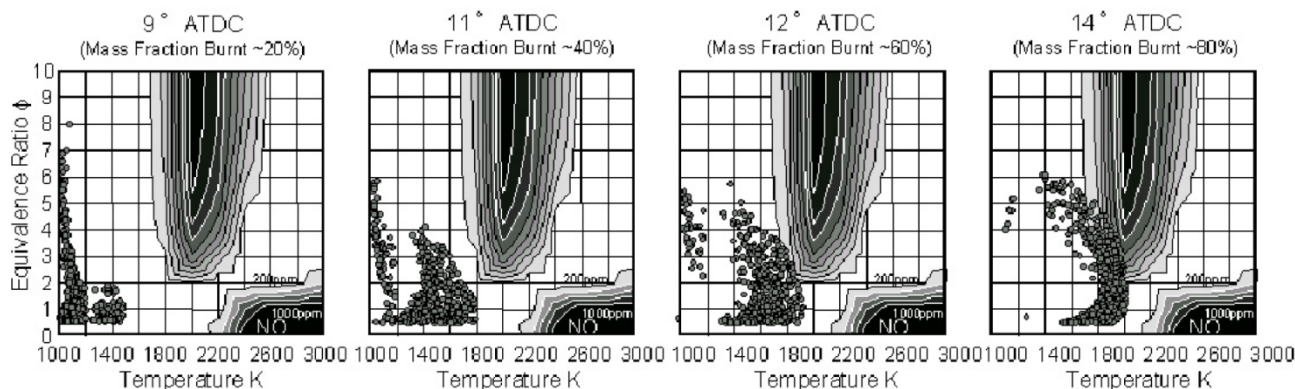
Scegliere un **tempo di reazione di 1 ÷ 2 [ms]** è una buona scelta. 1 [ms] è rappresentativo.

Si può fare lo stesso discorso anche per la pressione. Vediamo che tra 3 e 6 [MPa] la variazione è molto minore rispetto che tra 1 e 3 [MPa]. Anche in questo caso si sceglie un **valore di pressione rappresentativo che può essere di 60 ÷ 100 [bar]** e la mappa assume un valore abbastanza universale.

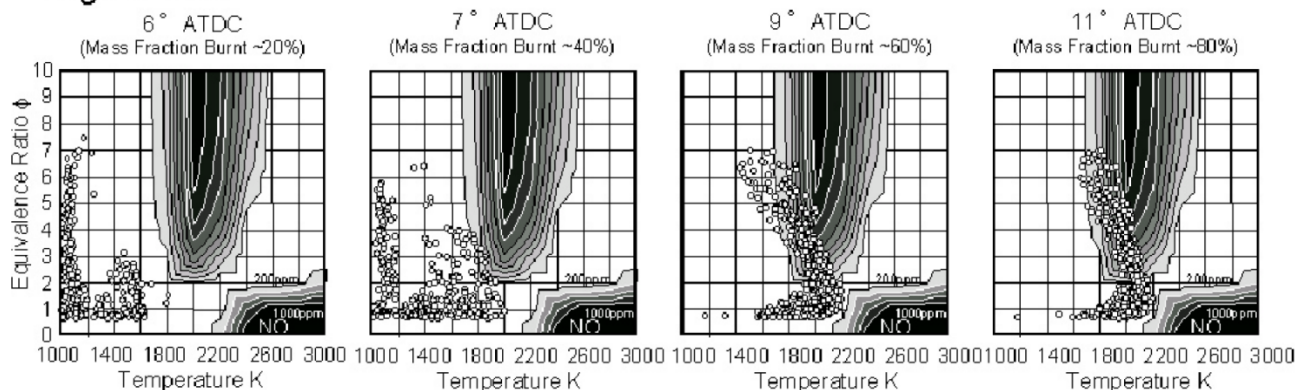


Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Smokeless**



**High Smoke**



In questi risultati finali analizziamo due tipi di combustione diversi:

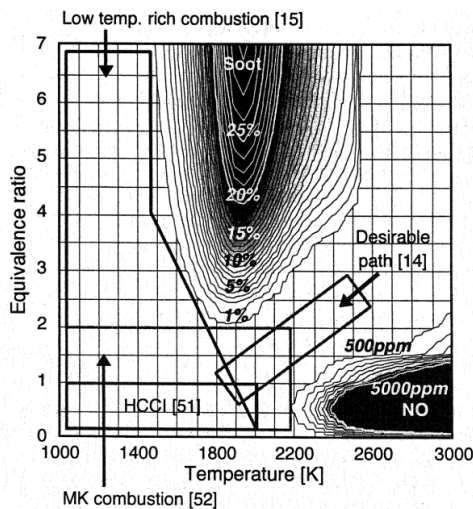
**Smokeless** significa che “non fa fumo” (emette pochissimo particolato);

**High Smoke** significa che “fa tanto fumo” (emette tanto particolato).

I gradi sono gradi dopo il TDC.

Il **primo modo** per applicare queste mappe consiste nel procurarsi la **mappa di riferimento di Kamimoto-Bae** (presenti in letteratura), **fare l’analisi CFD**, quindi trovare i **punti medi baricentrici rappresentanti le varie zone**, e **sovrapporre i risultati alla mappa**.

Un altro modo, più concettuale consiste nel ragionare per zone:



Nota: vediamo che sotto  $\phi=2$  non si forma più Soot.

Vediamo che ci sono una serie di zone interessanti dove non c'è né Soot né NOx. Si apre una finestra sul mondo delle **combustioni ad alta premiscelazione** e dei **motori HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition**. Un motore diesel lavora con un eccesso d'aria per cui mediamente la dosatura è povera. Il fatto che ci siano delle zone con  $\phi$  superiore a un certo valore che poi generano Soot è legato al fatto che non riusciamo a miscelare bene il combustibile con l'aria. Quindi l'idea è di mescolare in modo omogeneo il combustibile con l'aria per avere una carica il cui valor medio e locale di  $\phi$  coincidono e questo valore risulterebbe essere al di sotto di 1. In tal modo non si forma più Soot. **Ci sono due modi per realizzare la HCCI**: uno ideale: prendiamo il combustibile, **lo facciamo evaporare mescolandolo con l'aria nel collettore di aspirazione e aspiriamo qualcosa di già "pronto"**; piccolo inconveniente: **il gasolio non evapora facilmente**. Per ovviare a questo problema ci sono delle tecniche di "fumigation" che permettono di scaldare il combustibile per farlo evaporare. Idealmente la combustione premiscelata non nascerebbe più soltanto in punto per poi coinvolgere tutta la carica ma lo **start coinvolgerebbe tutti i punti della camera di combustione**. Per fortuna il processo ideale non si realizza, perché altrimenti avremmo un **picco HRR altissimo**, quindi **altissime temperature e pressioni**: le alte temperature ci farebbero entrare **nella zona dei NOx** e **le alte pressioni comporterebbero problemi di guidabilità** (ricordiamoci che nel diesel non c'è il fenomeno della detonazione). Quindi il **modo reale** consiste nel **controllare il combustion rate**: il metodo più intuitivo è quello di annegare il sistema con dei gas riciclati (alte % di EGR, **60-70%**) **in modo da ridurre la concentrazione locale di ossigeno quindi diminuendo la velocità del rilascio termico che dunque risulterebbe essere più graduale**. Dunque facciamo in modo che, anche se l'autoaccensione avviene dappertutto contemporaneamente, avviene non istantaneamente ma gradualmente per via dell'EGR.

Combustioni di questo tipo hanno **alcuni inconvenienti**: se introduciamo il **70% di EGR significa che introduciamo il 30% di aria**. Questo ha un impatto sulle prestazioni del motore; magari non tanto ai carichi parziali ma **a full load molto**. Quindi avremmo sì un **motore pulito ma che non produce coppia elevata** (per le applicazioni per cui è pensato il diesel non va bene). **Quindi dobbiamo lasciarci la possibilità di arrivare a full load**. Per far ciò lasciamo la configurazione appena vista che prevede la **disposizione degli iniettori nel collettore di aspirazione e introduciamo ulteriori iniettori in camera per poter raggiungere i carichi medi-alti e il full load quando è richiesto**. Il primo problema è un **problema di costi per via delle tecnologie abbinata**.

Un altro **problema consiste nel gestire i transitori** poiché, per esempio, se dobbiamo passare da un carico medio-basso a un carico medio-alto passiamo alla seconda configurazione ma l'EGR richiede del tempo prima di ridursi (per passare, per esempio, dal 70% al 30% di EGR ci vuole qualche ciclo). Ci saranno dunque dei cicli in cui non siamo né in configurazione HCCI né in combustione convenzionale, correndo il rischio che sfugga il controllo delle emissioni.

Questo modello non tiene conto di  $\phi$ . È evoluto nel 2010 (quando sono tornati in auge per via dell'avanzamento tecnologico dei controlli) grazie a Westlund e altri ricercatori (ci sono anche altri modelli).

$$\frac{dm_{sf}}{dt} = C\sqrt{(\Phi - 2)}\sqrt{P}k_T m_{fv}$$

$$k_T = \left[ 1 - e^{-7\left(\frac{T-1300}{1800-1300}\right)^3} \right] \text{ per } T < 1800 [K] ; k_T = \left[ 1 - e^{-7\left(\frac{T-1800}{2300-1800}\right)^3} \right] \text{ per } T \geq 1800 [K]$$

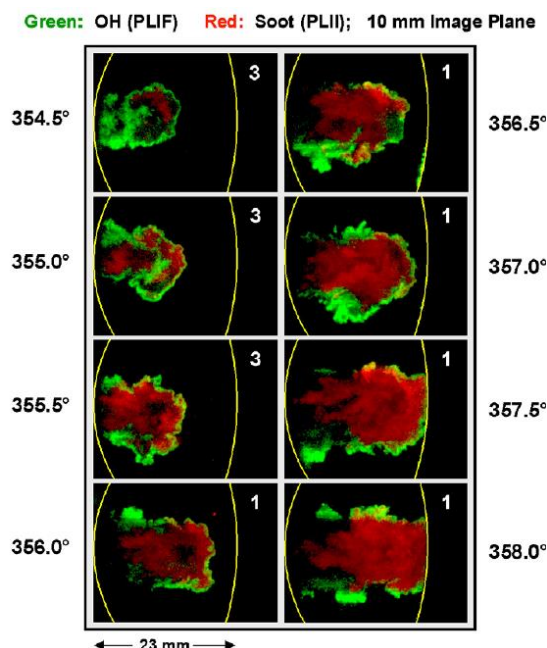
Si aggiunge un fattore moltiplicati per il quale riusciamo a tener conto anche del rapporto di equivalenza. Nel momento in cui  $\phi < 2$  particolato non se ne forma. In questi modelli normalmente ci sono delle formule di massima che ci consentono di andare ad esprimere i vari parametri però poi richiedono tutti una calibrazione finale, in questo caso espresso da C (questa costante di calibrazione può essere costante da motore a motore oppure può dipendere da alcuni parametri e quindi essere settata per uno specifico motore).

**- Ossidazione delle particelle carboniose**

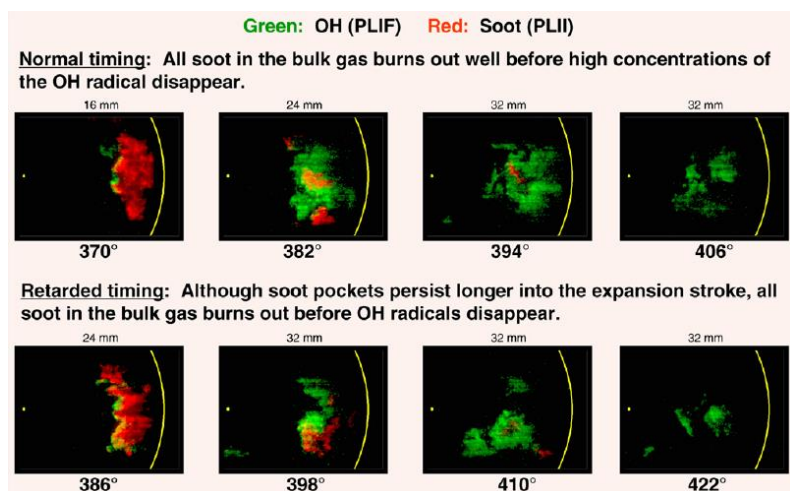
I ricercatori dei Sandia National Labs. hanno effettuato un'approfondita indagine sul fenomeno di ossidazione delle particelle carboniose tramite analisi ottiche (2000).

Il colore rosso rappresenta le zone dove si forma il Soot; il colore verde rappresenta le zone dove ci sono i radicali liberi OH, ovvero dove c'è la fiamma diffusiva. La fiamma diffusiva avvolge tutta la zona di formazione del Soot.

Quando la fiamma arriva in prossimità della parete si spegne per effetto dello scambio termico con la parete ma soprattutto per il fatto che viene a mancare l'ossigeno, quindi per soffocamento; può capitare anche tra un getto e l'altro (se ci fosse un unico getto e una camera sufficientemente grande, allora la fiamma diffusiva riuscirebbe a ossidare tutto il Soot). Dunque una parte di queste particelle carboniose sopravvive alla fiamma diffusiva.



Analizziamo che cosa capita al Soot rimanente:

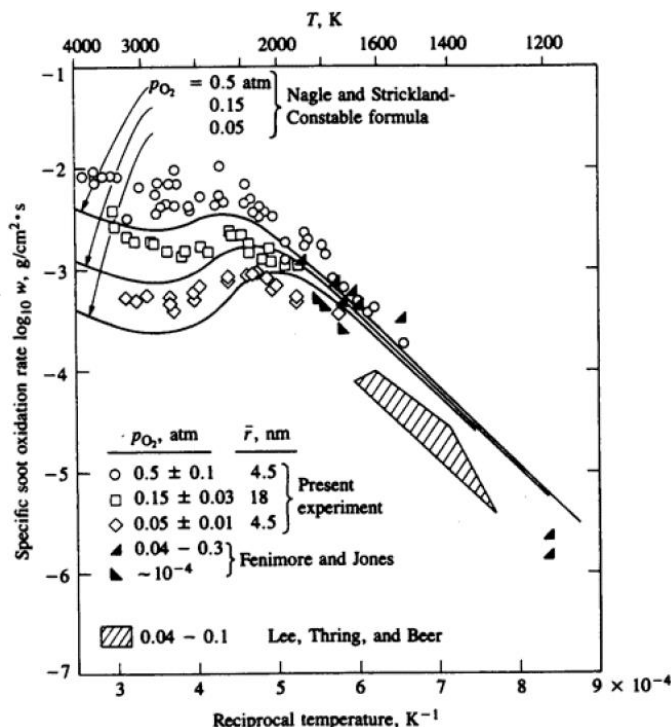


Il Soot può ossidarsi anche quando la fiamma si è spenta. A combustione finita ci sono i gas caldi che si possono mescolare con l'aria e vediamo che il Soot scompare. Si tratta di una post-ossidazione (burn-out) che avviene nei burned gas. Ci possono essere delle situazioni in cui il burn-out avviene completamente, altre in cui no. Succede in molti casi che non tutto il soot venga ossidato.

**- Modelli di ossidazione [ ↓ LEZIONE 18: 13/11/19 ]**

L'ossidazione può avvenire per effetto dell'ossigeno  $O$  e  $O_2$  oppure per effetto del radicale  $OH$ .

Sono stati studiati tutta una serie di modelli, la cui maggior parte si basano su osservazioni sperimentali. Il modello più famoso è quello sviluppato da Nagle e Strickland-Constable. Gli studi sperimentali, condotti su campioni di pirografite riscaldati (non nei motori), hanno permesso di evidenziare il seguente meccanismo di ossidazione (mediante  $O_2$  ed  $O$ ).



Le tre curve sono per diverse concentrazioni di ossigeno nell'ambiente, espresse in funzione della pressione parziale dell'ossigeno (in sostanza la concentrazione di ossigeno cresce verso l'alto). L'ossidazione aumenta con la concentrazione di ossigeno.

Si vede che, inizialmente, all'aumentare della temperatura (attenzione, aumenta da destra verso sinistra), la velocità di ossidazione delle particelle carboniose aumenta; raggiunge un massimo. L'ossigeno o i radicali ossigeno attaccano la particella carboniosa non in modo indistinto su tutta la superficie ma su dei siti attivi.

Sulla superficie delle particelle carboniose esistono due tipologie di siti disponibili per la reazione:

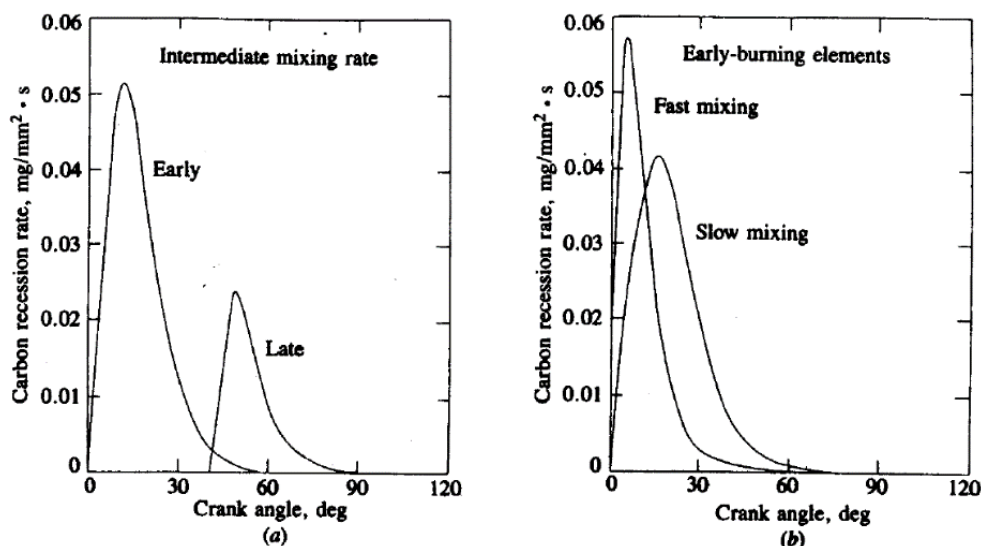
- **Siti di tipo A: più reattivi**, per i quali la velocità di ossidazione è controllata dalla percentuale di siti non ricoperti da ossidi superficiali (ordine della reazione, in una variabile costituita dalla pressione parziale dell'ossigeno molecolare, compreso tra 0 e 1);
- **Siti di tipo B, meno reattivi** (ma con velocità di reazione di ordine 1).

I siti di tipo A lavorano principalmente nella prima parte del grafico dove le curve salgono con una certa pendenza. Per cui permettono l'ossidazione a temperature più basse. I siti B lavorano nell'ultima parte di risalita però con un'intensità minore, nonostante le più alte  $T$ ; infatti l'ultimo tratto ha una pendenza minore rispetto al primo caratterizzato dai siti di tipo A.

All'inizio troviamo quindi tutti siti di tipo A; all'aumentare della temperatura inizia la conversione in siti di tipo B caratterizzata da una opportuna costante di velocità di conversione  $kT$ . La conversione  $A \rightarrow B$  avviene sul grafico nella zona di "valle". Quando ci sono solo siti di tipo A la velocità di ossidazione è massima al crescere della temperatura. Successivamente questi incominciano a diminuire a seguito della loro trasformazione in siti di tipo B, non ancora attivi oppure con una velocità di reazione molto bassa. Questa transizione giustifica il massimo. Dal punto di minimo della valle, i siti di tipo B, con il crescere della temperatura, diventano più reattivi e l'ossidazione prosegue, con un'intensità inferiore a quella iniziale caratterizzata dall'ossidazione dei siti di tipo A.



- Stima della quantità di "Soot" ossidato



Risultati in [mg/mm<sup>2</sup>]

La singola curva non restituisce la quantità di Soot ossidato ma la **velocità con cui il Soot si ossida**. L'area sottesa dalle curve rappresenta la **quantità di Soot ossidata** (facendo l'integrale otteniamo la quantità).

Il diagramma di sinistra fa vedere **una particella che inizia l'ossidazione molto presto (Early) nel ciclo, e una particella che inizia l'ossidazione molto tardi (Late)**. Le particelle che vengono ossidate prima vengono ossidate molto più delle altre, perché c'è **più tempo** a disposizione a **temperature elevate**. Le particelle si ossidano perché si mescolano con l'aria; il mescolamento dipende dalla turbolenza e dal campo di moto; modificando la turbolenza e il campo di moto possiamo modificare il mescolamento. Nel grafico di destra troviamo nuovamente la curva dell'ossidazione che avviene prima (Early): sono state fatte delle analisi di sensibilità ipotizzando dei **mescolamenti veloci (fast mixing)** e dei **mescolamenti lenti (slow mixing)**. **Se aumentiamo il mescolamento la velocità di ossidazione aumenta ma l'area di fatto cambia molto poco** (cambia per le particelle che partecipano all'ossidazione ritardata (Late): se avviene lentamente, le code potrebbero non ossidarsi).

- Massimo diametro ossidabile

Per una particella sferica, la **"velocità di ossidazione" w può essere legata al raggio della particella** da:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{-w}{\rho_S}$$

( $w = M_C R_{tot}$ : massa di PM ossidata per unità di superficie e tempo [g/cm<sup>2</sup>/s] ;  $M_C = 12$ )

L'equazione permette di stimare il massimo diametro delle particelle carboniose che possono essere completamente ossidate. In particolare, nel caso illustrato nella precedente figura, la quantità di carbonio complessivamente ossidata per l'elemento "early-burned" è di circa 0.1 [μg/mm<sup>2</sup>] (pari all'area sottesa dalla curva, e cioè all'integrale nel tempo di w). Dividendo per  $\rho_S$  ottengono diametri di 50 [nm] (50-100 [nm]: particelle fini ↔ Nuclei Mode).

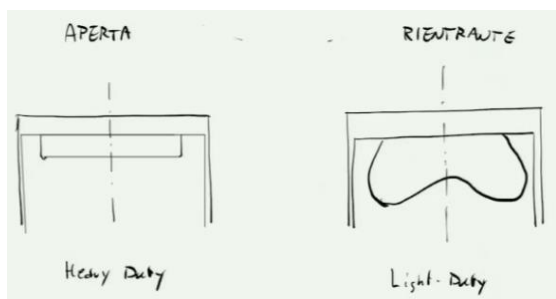
Il diametro delle sferule nei motori diesel è dell'ordine di 30 nm, perciò è molto probabile che le particelle che si formano durante le prime fasi della combustione vengano completamente ossidate. **Perciò, il PM presente allo scarico deriva principalmente dalle regioni in cui il mescolamento con l'aria avviene con un ritardo tale da non permettere l'ossidazione delle particelle carboniose.**

**- Effetti di  $T$  e  $\rho$  della carica,  $d$ , dei fori del polverizzatore,  $p$ , di iniezione, grado di diluizione (EGR)**

**Preview**

Nei diesel, tramite la sovralimentazione e un opportuno intercooling della carica, regoliamo  $T$ ,  $p$ . Si cerca di **minimizzare il più possibile il diametro dei fori del polverizzatore e massimizzare la pressione di iniezione**. Controlliamo la diluizione con il quantitativo di EGR.

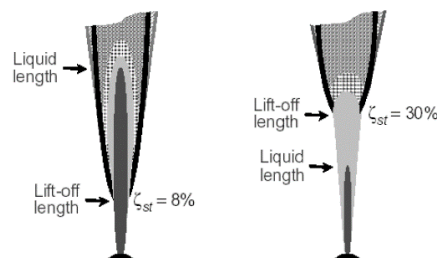
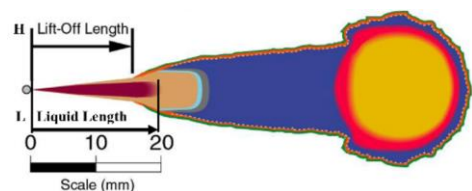
Il problema è molto complesso da affrontare poiché, nei diesel, la **camera di combustione** e il sistema di iniezione hanno tante variabili. La camera di combustione **può essere più quiescente (aperta)**, tipica degli **veicoli pesanti**, oppure a **elevata turbolenza**, per esempio con un **pozzetto rientrante**, tipico dei **veicoli leggeri**.



Negli motori degli **Heavy Duty vehicles** iniettiamo sempre **quantitativi importanti di combustibile**; Dal momento che nei motori dei **Light Duty vehicles** viene iniettato **poco combustibile**, con **iniezione multiple** (per fare poco rumore e iniettare pochi NOx e PM), dobbiamo progettare **una camera che compensi alla ridotta turbolenza dei getti contenuti**: dunque la camera di combustione prevede un **pozzetto rientrante**.

Le conclusioni che trarremo tra poco si potranno applicare bene al caso della configurazione aperta della camera di combustione. Si potranno applicare anche al caso della configurazione rientrante ma dovremo tener conto che la loro importanza relativa può essere ridotta (avendo dei piccoli getti saranno piccoli gli effetti rispetto a quelli inerenti alla geometria della camera).

**Introduzione di alcune grandezze caratteristiche (H, L)**



**Lift-off length (H)**: è una specie di ritardo vista nello spazio: si estende **dall'atomizzatore fino al punto in cui inizia la combustione diffusiva dei primi gas** che ne prendono parte. L'aria può mescolarsi con il comb.

**Liquid Length (L)**: lunghezza di penetrazione della fase liquida.

È importante il rapporto tra  $L$  e  $H$ . ci possono essere situazioni in cui  $L > H$  e situazioni in cui  $L < H$ .

Ai fini del controllo di  $\phi$  è meglio avere  $L > H$  oppure  $L < H$  ?

**Nella zona di vapore di aria e combustibile** vogliamo cercare di **ridurre al massimo  $\phi$ : più è basso  $\phi$  meno Soot si forma**. È più probabile ridurre  $\phi$  nel caso  $L > H$  oppure nel caso  $L < H$ ? Nel caso  $L < H$  perché abbiamo più "spazio"/tempo per far "entrare nel getto" dell'aria perché si mescoli con il combustibile.

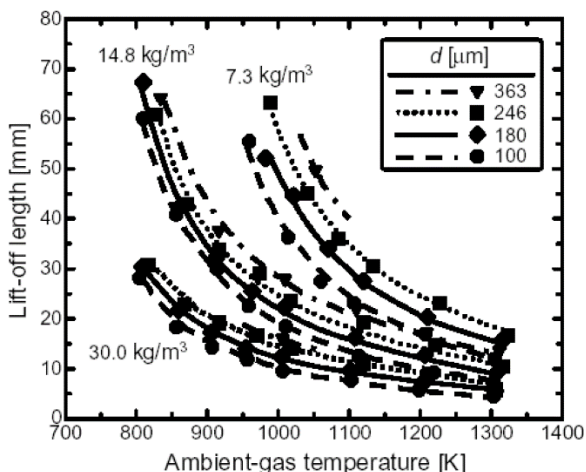
Per passare dal caso di sinistra ( $L > H$ ) al caso di destra ( $L < H$ ) **dobbiamo cercare di allungare la lunghezza di lift-off (H) e ridurre la lunghezza del liquido (L)**.

**Effetti esaminati:**

- 1) Effetto della  $T$  e  $\rho$  della carica sulle lunghezze di lift-off ( $H$ ) e della fase liquida ( $L$ )
  - 2) Effetto del diametro dei fori ( $d$ ) del polverizzatore sulle lunghezze di lift-off ( $H$ ) e della fase liquida ( $L$ )
  - 3) Effetto della pressione di iniezione ( $\Delta p$ ) sulle lunghezze di lift-off ( $H$ ) e della fase liquida ( $L$ )
- Effetto degli stessi parametri ( $T$ ,  $\rho$ ,  $d$ ,  $p$ ) sul rapporto di equivalenza  $\phi$  attraverso  $\zeta_{st}$
- Effetto di  $\zeta_{st}$  sulla formazione del Soot
- 4) Effetto della diluizione (EGR) sulle lunghezze di lift-off ( $H$ ) e della fase liquida ( $L$ ), su  $\phi$  e sul Soot
- Valutazione del diametro dei fori ( $d$ ) del polverizzatore in funzione della pressione di iniezione



## 2) Effetto del diametro dei fori (d) del pulverizzatore sulla lunghezza di lift-off (H) e della fase liquida (L)

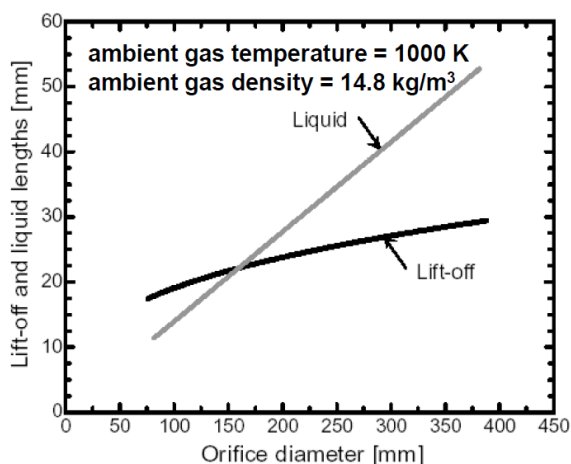


Siebers D. and Higgins B., SAE Paper No. 2001-01-0530

Il diagramma riporta la lunghezza di lift-off (H) [mm] in funzione della temperatura [K] e densità [kg/m³] della carica e in funzione del diametro [μm] dei fori del pulverizzatore nel momento in cui viene effettuata l'iniezione.

H è proporzionale al diametro dei fori d. H cresce al crescere del diametro.  $H \propto d^{0.34}$  quindi il diametro dei fori (d) ha effetto meno influente rispetto alla temperatura (T) e alla densità ( $\rho$ ) ( $0.34 < 0.85 < 3.74$ ).

Per quanto riguarda la lunghezza di penetrazione della fase liquida (L):



Siebers D. and Higgins B., SAE Paper No. 2001-01-0530

Notiamo che anche la lunghezza del liquido (L) aumenta all'aumentare del diametro dei fori (d) come la lunghezza di lift-off (H) ma in modo più marcato.

Esiste una situazione di **diametro di cross-over**. Vogliamo cercar di far lavorare il motore con  $H > L$ , per cui dobbiamo stare nella zona del grafico a sinistra l'incrocio.

Il diametro di cross-over in questo caso è stato calcolato con certi valori di T e  $\rho$ . Quindi dobbiamo tener conto del fatto che se cambiano T e  $\rho$  cambierà anche il punto di cross-over.

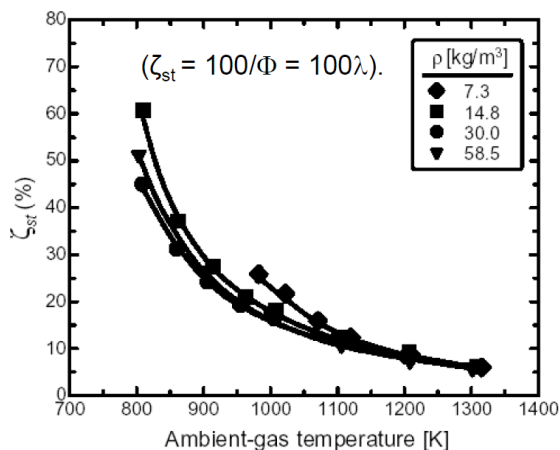
### Effetto degli stessi parametri ( $T, \rho, \Delta p, p$ ) sul rapporto di equivalenza $\phi$ attraverso $\zeta_{st}$

Per valutare gli effetti dei parametri analizzati sul rapporto di equivalenza  $\phi$  utilizziamo un nuovo parametro (solo perché i risultati di queste analisi sono stati espressi in tal modo):

$$\zeta_{st} = \frac{100}{\phi} = 100 \cdot \lambda \quad ; \quad \zeta_{st} = 50 \leftrightarrow \phi = 2$$

$\phi = 2$  è un valore significativo poiché al di sotto il Soot scompare. Dunque vorremmo avere:  $\zeta_{st} > 50\%$

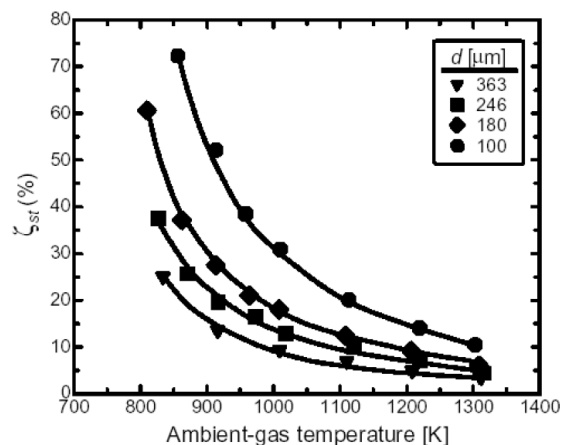
#### Effetto di $T, \rho$ su $\phi$ :



Siebers D. and Higgins B., SAE Paper No. 2001-01-0530

Dobbiamo ridurre la temperatura ( $T$ ) e o la densità ( $\rho$ ) per ridurre  $\phi$ , quindi tendere verso  $\phi < 2$  e così ridurre il più possibile il Soot. L'effetto della densità è molto piccolo. Più piccolo rispetto all'effetto che aveva su H (abbiamo un H maggiore per cui intrappoliamo volumi più grandi, ma all'interno di questi volumi c'è meno aria)

#### Effetto di $d$ su $\phi$ :

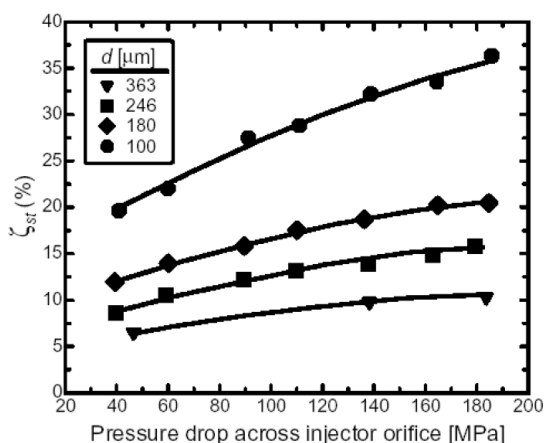


Siebers D. and Higgins B., SAE Paper No. 2001-01-0530

Dobbiamo ridurre il diametro dei fori ( $d$ ) per ridurre  $\phi$ . L'effetto del diametro dei fori abbiamo visto essere molto piccolo su H. Sul rapporto di equivalenza  $\phi$  l'effetto del diametro dei fori ( $d$ ) si amplifica.

È vero che riducendo il diametro dei fori ( $d$ ) riduciamo la lunghezza del getto ( $H$ ) ma, riducendo il diametro, a parità di massa, **augmenta il rapporto superficie/volume e il mescolamento risulta migliore**: quest'ultimo effetto è preponderante.

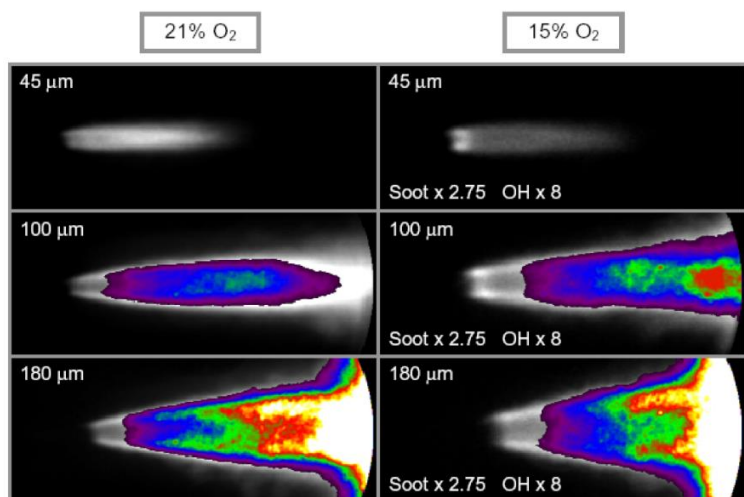
#### Effetto di $\Delta p$ su $\phi$ :



Siebers D. and Higgins B., SAE Paper No. 2001-01-0530

Dobbiamo aumentare  $\Delta p$  per ridurre  $\phi$ .

Analizziamo il getto in funzione di  $O_2$  e  $d$ , diametro dei fori del polverizzatore:



Siebers D. and Higgins B., SAE Paper No. 2001-01-0530

Effetto della diluizione:

$O_2 \downarrow : H \uparrow : Soot \downarrow$

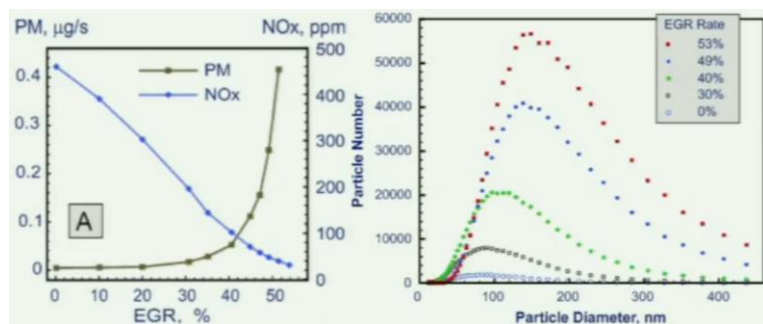
$O_2 \downarrow : \Phi \uparrow : Soot \uparrow$

$d \downarrow : H \downarrow \zeta_{st} \uparrow : \Phi \downarrow : Soot \downarrow$

Nota:  $d = 45 [\mu m]$  è un caso limite: non si riesce ad usare.

La lunghezza di lift-off ( $H$ ) termina dove inizia il bianco (a sinistra) che rappresenta l'inizio della formazione dei radicali OH. A destra abbiamo il caso con una minore concentrazione di  $O_2$ . Vediamo come  $H$  aumenta, aumentando la diluizione e quindi riducendo  $O_2$ . Per vedere l'effetto sul Soot dobbiamo guardare alle zone colorate: notiamo che non cambia molto (tutto è spostato più a destra); quindi si forma più o meno lo stesso quantitativo di PM, solo che il processo avviene più lontano dal polverizzatore.

Essendo presente del PM nei gas di scarico, se aumentiamo l'EGR, aumentiamo la quantità di PM introdotta; la concentrazione di  $O_2$  diminuisce, le temperature diminuiscono, dunque l'ossidazione del PM sarà ridotta. Inoltre, che effetto produce il PM introdotto sul getto?



Il grafico di sinistra riporta il quantitativo di PM (introdotto?) in funzione del grado di EGR; il grafico di destra riporta il numero di particelle in funzione del diametro delle particelle e il grado di EGR.

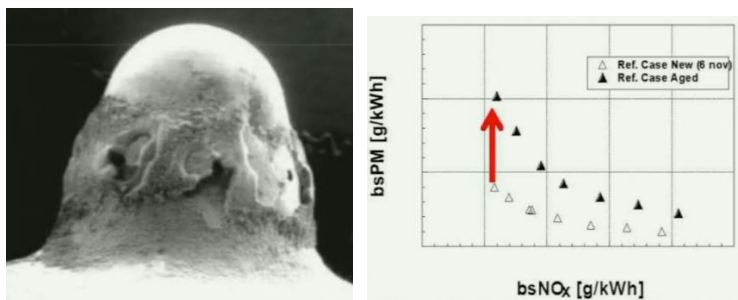
Notiamo che aumentando il grado di EGR si formano più particelle e il diametro medio delle particelle tende ad aumentare. Le particelle carboniose (Soot) introdotte con l'EGR agiscono come nuclei preferenziali per la condensazione dei composti organici, quindi troviamo allo scarico particelle più grandi, e inoltre alcune di esse inducono la formazione di ulteriori particelle (l'effetto dell'introduzione di PM si sta ancora studiando; non è ancora particolarmente chiaro).

Il grafico di sinistra ci ricorda il trade-off tra PM e NOx. Aumentando il grado di EGR il grado di PM peggiora (aumenta) mentre il grado di NOx migliora (diminuisce).

[Domanda (12) per il Prof.: il grafico di sinistra esprime le concentrazioni introdotte in camera a seguito dell'EGR oppure le concentrazioni che troviamo allo scarico? Potrebbero essere la stessa cosa? Se fossero la stessa cosa, vorrebbe dire che l'effetto del PM ricircolato è di aumentare la dimensione media delle particelle. Ma se queste inducono la formazione di ulteriore PM, ciclo dopo ciclo, non dovrebbe aumentar sempre più il quantitativo che ritroviamo allo scarico?] [A un certo punto si trova un equilibrio]

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Considerazioni sul fenomeno del **cocking**:



Osservando l'iniettore, vediamo che si formano una serie di **depositi esterni ai fori** (si formano **anche internamente**).

**Formazione del cocking**: per effetto delle temperature (centinaia di gradi) dell'iniettore le **frazioni bassobollenti del combustibile possono evaporare** e le **frazioni altobollenti** possono essere soggetti a fenomeni di **cracking termico** formando delle **particelle tipo carboniose**: queste particelle, per effetto di fenomeni di **termoforesi** possono essere **assorbite dal metallo** e dunque così si formano dei depositi carboniosi.

- Per effetto del cocking la **sezione di passaggio si riduce** e **peggiorano le performance dell'iniettore** (andamento bianco: iniettore nuovo); **il peggioramento è tanto più grande tanto più piccolo è il foro**. Quindi ci saranno dei **diametri limite** al di sotto dei quali non possiamo scendere per questo problema.
- Siccome il cocking deriva dal contatto tra il combustibile e la parete possiamo **cercare di ridurre il contatto**: per esempio, si fanno dei **fori conici** piuttosto che dei fori con spigolo vivo.
- I depositi **dipendono molto dalla metallurgia**: per esempio, in passato, la presenza di materiali con zinco (Zn) faceva sì che il cocking avvenisse in maniera incontrollabile (**oggi lo zinco è totalmente rimosso**).

#### Considerazione finale:

Possiamo anche dire che ci possa andar bene il trade-off sulle emissioni rappresentato dalla curva nera. Se abbiamo problemi nel rispettare i limiti di legge imposti dalla normativa facciamo i fori più piccoli, aumentiamo la pressione nel rail e così facendo otteniamo un migliore trade-off sulle emissioni di NOx e PM. Il trade-off sulle emissioni non dipende solo dalla dimensione dei fori ma anche da altri parametri come, per esempio, la turbolenza: riducendo il diametro dei fori, per effetto del miglioramento dell'iniezione, il motore potrà avere una richiesta minore in termini di turbolenza dell'aria in camera. **Per migliorare l'effetto dell'iniezione, evitando di ridurre il diametro dei fori, possiamo quindi aumentare la turbolenza** dell'aria in camera di combustione, per esempio con la **tecnica dello Swirl (moto organizzato della carica)**: i **condotti dell'aspirazione possono essere tuffanti** oppure **possono prevedere delle porte a chiocciola** (soluzione costosa) per generare un **moto elicoidale del fluido** in camera: il moto elicoidale, una volta dissipatesi l'energia cinetica, genera la turbolenza necessaria a soddisfare le nostre richieste in termini di miglioramento del trade-off sulle emissioni. Se scegliamo la via della riduzione del diametro dei fori del polverizzatore, migliorando in tal modo il trade-off sull'emissioni, potremmo non aver bisogno di uno swirl particolarmente intenso: **riducendo la richiesta di swirl otteniamo una minor richiesta di pompaggio e una migliore efficienza**.

Oppure possiamo **diminuire il grado di EGR**, con conseguente miglioramento dell'efficienza.

Dunque ridurre il diametro dei fori è vantaggioso in termini di riduzione delle emissioni, però, spesso, decidiamo di rimanere sul trade-off originale: **riduciamo lo swirl (\*)** e riduciamo l'EGR migliorando l'efficienza. **Se il problema sono le emissioni facciamo una scelta, se il problema è la CO<sub>2</sub> facciamo un'altra scelta**. Se il problema, come in genere capita, è un po' l'uno e un po' l'altro, facciamo un'opportuna scelta di compromesso anche in funzione dei costi (e non dimentichiamo che c'è l'after-treatment).

### **3.5 CI: Idrocarburi incombusti (HC)**

- Generalità
- Combustione diesel e formazione degli HC
- HC che si formano durante il ritardo di accensione

Overlean mixture

Overrich mixture

- HC che si formano dopo il ritardo di accensione

- Undermixing

Gocciolamento di combustibile dal sacco attraverso i fori dell'iniettore

Overfueling

- Spray impingement

- Misfiring

- HC e condizioni di funzionamento del motore

- HC e geometria della camera di combustione

#### **- Generalità**

Le emissioni di **idrocarburi** (indicati globalmente con il termine HC), o più propriamente **emissioni organiche**, allo scarico di un motore, derivano **dall'incompleta combustione** degli idrocarburi costituenti il combustibile.

La composizione degli HC allo scarico dei motori ad accensione per compressione (CI) è **molto più complessa ed articolata** rispetto a quella presente allo scarico dei motori ad accensione comandata (SI). Essa comprende un intervallo molto più esteso di masse molecolari: sono stati individuati **quasi 400 diversi composti organici**. La composizione è diversa poiché cambia il **tipo di combustibile**. La composizione chimica del combustibile (gasolio) comprende anche **frazioni di idrocarburi con maggiore massa molecolare** rispetto a quelle presenti nelle benzine e, dunque, **caratterizzate da temperature di ebollizione più elevate**.

Un primo problema è rappresentato dalla **modalità di prelievo degli HC** allo scarico ai fini della determinazione della concentrazione dell'inquinante. Il punto dove facciamo le misure non coincide con il punto del prelievo. **Se vogliamo studiare i gas "grezzi"** (quelli che escono direttamente dal motore) li dobbiamo prelevare e mandare all'**analizzatore**. L'analizzatore si trova fuori dalla cella: tra il motore e l'analizzatore c'è quindi una linea di prelievo (che in linea d'aria dista 3/4 [m] ma non può fare un viaggio in linea retta) che esce dal basso o dall'alto dalla cella facendo un percorso lungo (normalmente **~10 [m]**). Questa **linea di prelievo** viene **riscaldata a 190 [°C]**, altrimenti ci sarebbe **il rischio che l'acqua, emessa allo stato di vapore, condensi trascinando con sé anche degli inquinanti tra cui gli HC**: nei motori CI diesel, le cui emissioni sono **ricche di composti organici ad alto peso molecolare**, questo rischio è molto elevato.

Le **emissioni gassose "grezze" di HC** nei motori Diesel sono dunque misurate usando:

- Un **filtro per il PM riscaldato** (altrimenti gli HC più pesanti si depositano sul PM)) (mantenuto a 190 [°C]);
- Una **linea di campionamento riscaldata** (mantenuta a 190 [°C]);
- Un **analizzatore riscaldato a ionizzazione di fiamma**.

Il riscaldamento del filtro, delle linee e dello strumento di analisi permette di **mantenere in fase vapore** tutti i componenti degli HC con temperature di condensazione inferiori ai 190 [°C].

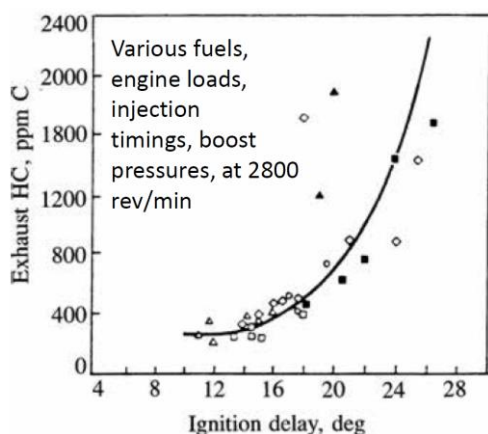
Preview: **HC e PM non** sono del tutto **scorrelati**. Gli HC sono un indice dei composti organici che non hanno partecipato al processo di combustione ma il **PM può includere una parte di questi composti organici, poiché una parte si può depositare sulle particelle carboniose. Bisogna fare attenzione a non misurare qualcosa due volte** o a non misurare del tutto qualcosa: dunque è importante che **dove misuriamo il PM misuriamo anche gli HC e quindi che il punto di prelievo degli HC sia molto vicino a quello del PM** (che si trova all'interno del **tunnel di diluizione**).

### Overlean mixture

Overleaning = sovramescolamento.

Guardando lo strato più esterno del getto e l'ultimo tratto della curva nera, vediamo che ci può essere una **porzione dello spray in cui  $\Phi$  è inferiore al rapporto di equivalenza limite** per la combustione nel povero:  **$\Phi < \Phi_{lim} = 0.3$**  (linea color ciano): questa zona **non può autoaccendersi e neanche bruciare dopo**. Questa è una delle più importanti zone da cui possono nascere gli HC.

Analizziamo la concentrazione di HC allo scarico in funzione dell'ignition delay:



(in genere l'ignition delay è  $\sim 10^\circ$ )

Quanto più è lungo il ritardo di accensione ( $\tau$ ) tanto maggiore può essere il contributo di quest'ultima zona alla formazione di HC. Le particelle di questa ultima zona possono venire a contatto con gas combusti a temperature elevate e quindi possono essere soggette a reazioni termiche di ossidazione molto lente durante la fase di espansione. Quindi all'interno di questa zona, sorgente di HC, troviamo combustibile incombusto, in quanto mescolatesi troppo con l'aria, oppure prodotti di ossidazione parziale (aldeidi e altri ossigenati).

Oltre all'ignition delay, un secondo importante parametro che influisce sul fenomeno dell'overleaning è costituito dalla **temperatura dell'aria all'aspirazione**. Infatti, il **rapporto di equivalenza  $\Phi_{lim}$** , corrispondente al limite di accendibilità nel povero, **crece al diminuire della temperatura dell'aria nel cilindro** al momento dell'autoaccensione che, a sua volta, diminuisce al decrescere della temperatura dell'aria aspirata. Ne deriva una **maggiore quantità di combustibile nella zona del getto caratterizzata da  $\Phi < \Phi_{lim}$**  e dunque una maggiore quantità di HC prodotti per "overleaning". Inoltre, **una minore temperatura dell'aria aspirata determina a sua volta un aumento del ritardo di accensione** che, come già visto, aumenta gli HC prodotti per overleaning e bulk quenching.

$$T_{air} \downarrow : \Phi_{lim} \uparrow \tau \uparrow : HC \uparrow$$

### Overrich mixture

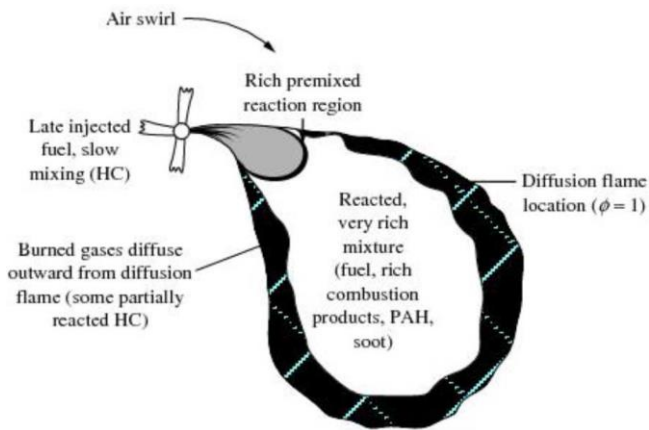
Overriching = sottomescolamento.

Guardando al cuore dello spray, troviamo una zona particolarmente ricca: c'è più combustibile di quel che può bruciare. Durante la fase di combustione premiscelata solo una parte dell'energia chimica viene rilasciata e una parte del combustibile rimane (potenzialmente HC). Parte di questo verrà successivamente ossidato dalla fiamma diffusiva.

**L'overleaning pesa molto di più (soprattutto ai bassi carichi)**. L'overleaning non permette alla zona interessata di bruciare (al limite una parte sarà soggetta a ossidazione molto lenta in fase di ossidazione). L'overriching ha un effetto locale più temporaneo in quanto successivamente la fiamma diffusiva può ossidare una buona parte del combustibile della zona particolarmente ricca.



**- HC che si formano dopo il ritardo di accensione**



Dopo il ritardo di accensione, il combustibile è soggetto alla combustione premiscelata, entra nella zona qui bianca del getto ed è successivamente soggetto alla fiamma diffusiva. Ci possono essere delle zone in cui le reazioni sono lente e, per effetto del lento mescolamento combustibile-aria, la miscela rimane localmente **troppo ricca** e quindi potrebbe non riuscire a bruciare oppure potrebbe spegnersi la fiamma diffusiva. Quindi o la fiamma diffusiva si spegne per qualche motivo legato al mescolamento e o al raggiungimento di una parete, comportando quindi la formazione di HC, oppure ci possono essere delle zone dove non si riesce a raggiungere  $\phi = 1$  e dunque la miscela localmente ricca, esclusa dalla combustione diffusiva, può dare anch'essa degli HC.

La composizione di questi HC è normalmente diversa dalla composizione degli HC formati nella fase dell'ignition delay, poiché non derivano direttamente dal combustibile ma derivano dai prodotti della combustione premiscelata (più prodotti di pirolisi, frammenti di idrocarburi, ...) (ricorda l'overriching).

Questo fenomeno, se le cose fossero fatte bene, non dovrebbe esserci. Quindi a livello di importanza continua a essere più importante il quantitativo di HC che si forma durante l'ignition delay e in particolare quello per overleaning.

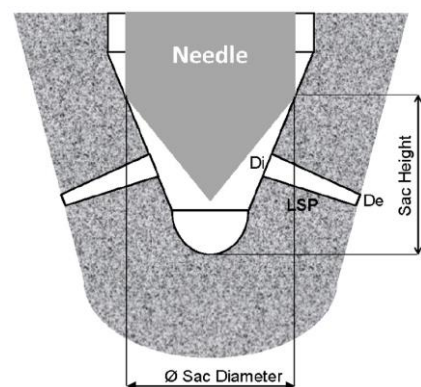
[Overleaning durante l'ignition delay, overriching durante l'ignition delay, overriching post ignition delay]

**- Undermixing**

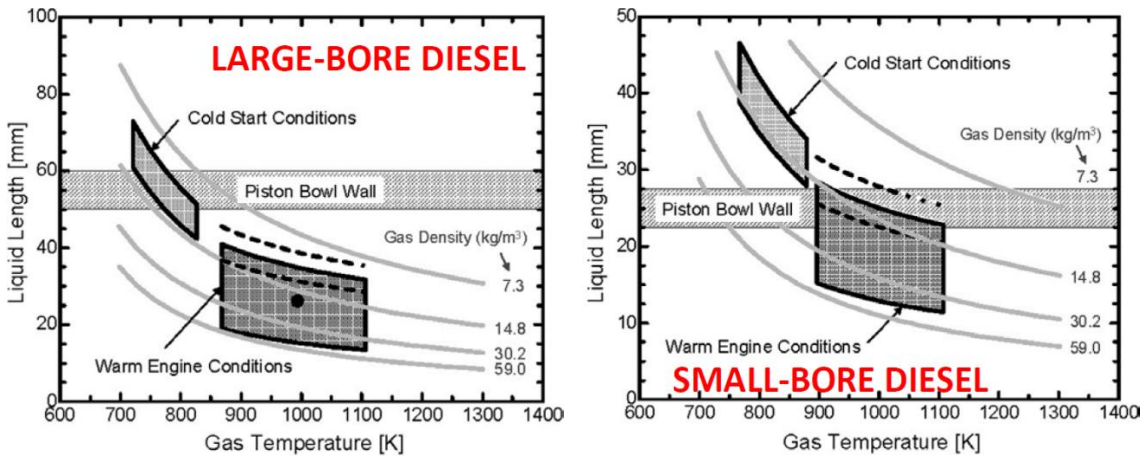
Ci possono poi essere altre due fonti possibili di HC.

**Gocciolamento di combustibile dal sacco attraverso i fori dell'iniettore**

Durante l'iniezione lo spillo è alzato. Quando si chiude, non si chiude istantaneamente. Quando scende genera una laminazione, riducendo la quantità di combustibile che scende nel sacco: la pressione nel sacco diminuisce, attraverso i fori passa una portata di combustibile inferiore e la velocità diminuisce: quindi **peggiora l'atomizzazione**. Dunque, durante il transitorio della chiusura dello spillo, **introduciamo in camera delle gocce più grandi e alcune di queste possono essere così grandi da non riuscire a evaporare e quindi rimangono allo stato liquido**. Queste sicuramente produrranno degli HC in quanto non riescono a mescolarsi con l'aria (**undermixing**). Quando lo spillo è chiuso del tutto questo fenomeno è spinto all'estreme conseguenze: il **combustibile ancora presente nel sacco gocciola in camera di combustione** (gocce più grandi).



**- Spray impingement**

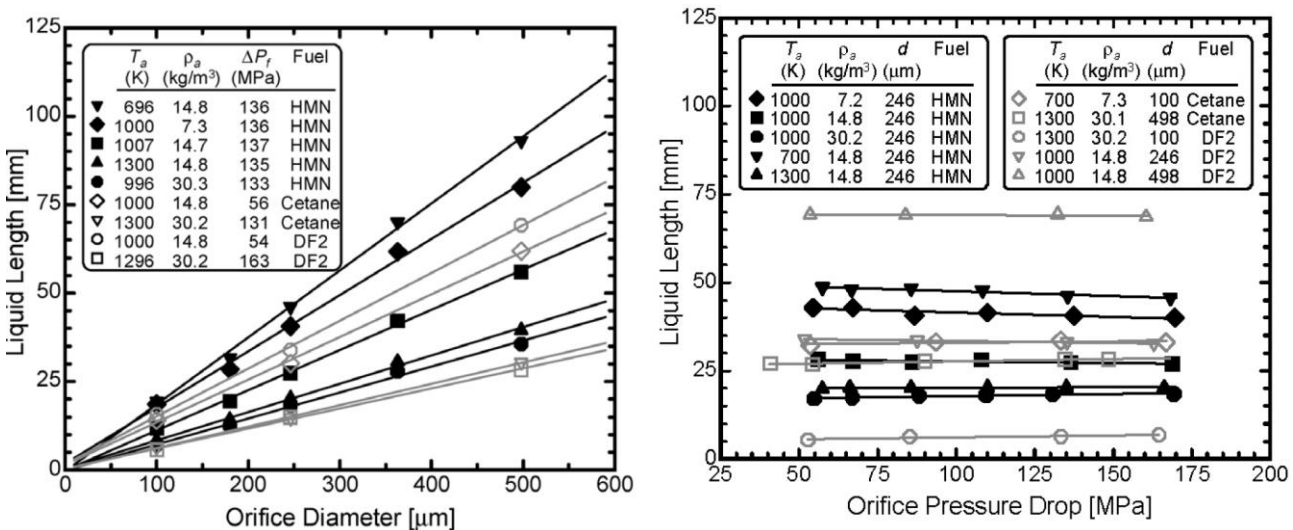


Sopra il diagramma è stata sovrapposta una fascia grigia rappresentante la distanza della parete del pozzetto del pistone dal foro del polverizzatore. Se la penetrazione della fase liquida supera questa distanza significa che tocca la parete senza evaporare (spray impingement). Nei motori diesel possiamo avere questo fenomeno durante la fase di avviamento a freddo in quanto le temperature e le densità sono più basse. Dobbiamo gestire opportunamente le iniezioni per esempio riducendone la durata. Nei motori automobilistici, la parete, normalmente, è più vicina all'iniettore, perché il diametro del pozzetto è più piccolo. Possiamo avere il fenomeno dell'impingement anche in condizioni a caldo. La posizione di queste aree dipende anche dalla turbolenza che può variare da ciclo a ciclo: le linee tratteggiate esprimono una sorta di banda di tolleranza.

L'interferenza tra lo spray (specie la fase liquida) e le pareti della camera di combustione è considerata una delle cause principali di formazione degli HC. Per contenere l'aumento delle emissioni di HC è fondamentale impedire il deposito di combustibile liquido a parete.

Il problema dello spray impingement è rilevante soprattutto nelle condizioni di avviamento a freddo e specialmente per motori di piccola taglia. Da un punto di vista più di progetto, le emissioni di HC aumentano se vengono adottati, ad esempio, iniettori con fori molto grandi e se la distanza fra l'estremità del polverizzatore e la parete è inferiore ad una certa soglia.

Per ovviare a questo problema possiamo agire sul ritardo di accensione, ridurre il diametro dei fori (d) del polverizzatore e o aumentare la pressione (p) di iniezione.



## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

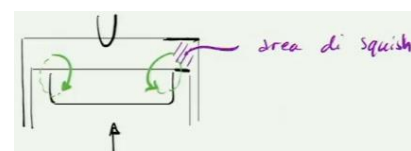
Per garantire la turbolenza abbiamo tre strumenti: la **geometria del sistema di aspirazione (swirl)**, la **forma della camera** e lo **spray**. **La configurazione a camera aperta fa lavorare molto lo spray per ottenere una buona turbolenza**, invece la camera di tipo rientrante si basa di più sulla forma della camera.

Durante l'aspirazione generiamo il moto di **swirl**, agendo sulla **geometria del sistema di aspirazione**. Tra la fine della fase di aspirazione e il momento di inizio della combustione ci sono **100 ÷ 150° di angolo di manovella** durante i quali, poiché il **fluido è viscoso**, il moto di swirl, ovvero il macro-vortice, e anche la turbolenza da esso indotta, se non viene aiutato - se non gli vien data ulteriore energia cinetica per ricostituirsi - **si esaurisce prima che sopraggiunga il momento della combustione**. Facendo la camera a pozzetto, durante la fase di risalita dello stantuffo, forziamo il macro-vortice dello swirl a entrare in una zona più piccola e per via della conservazione del momento angolare e della quantità di moto, il vortice accelera e si ristabilisce (sia a livello di macro-vortice, benevolo per il mescolamento con l'aria, sia a livello di turbolenza locale). **Più è stretto e profondo il pozzetto maggiore è l'effetto di amplificazione dello swirl. Non facciamo pozzetto stretti perché avvicineremmo le pareti del pozzetto all'iniettore, con conseguenti problemi di spray impingement. Non facciamo pozzetti larghi e profondi ( $V_{bowl} \uparrow$ ) perché diminuirebbe il rapporto di compressione:**

$$\varepsilon = (V_0 + V_{bowl} + V_{dead,TDC}) / (V_{bowl} + V_{dead,TDC}) = 1 + V_0 / (V_{bowl} + V_{dead,TDC}).$$

Il rendimento di compressione ideale dipende in primis dal rapporto di compressione:  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$ . Il problema di avere un pozzetto **largo e poco profondo** è che potremmo avere dei **problemi di utilizzazione dell'aria a pieno carico**. La configurazione "camera di tipo rientrante" permette di utilizzare un pozzetto largo (per limitare lo spray impingement) e **profondo** (per aiutare lo swirl durante la fase di compressione) **mantenendo il volume ottimale della bowl ( $V_{bowl}$ )**, prevedendo una parte di **protrusione**, chiamata "dome". Questa configurazione potrebbe dare dei **problemi ai carichi parziali**: se abbiamo una combustione a basso carico, il dome centrale e il getto **limitano il volume di utilizzo della camera, limitando l'effetto dell'aria**. Nei motori per veicoli light possiamo limitare questo problema agendo sulla legge di iniezione, prevedendo di fare tante **piccole iniezioni**.

Il pozzetto, oltre che ad aiutare lo swirl, ha anche un altro effetto, positivo in termini di turbolenza, chiamato "**squish**": quando lo stantuffo risale, **l'aria che si trova alla periferia**, tra la parte più esterna del pistone e la testa, viene **compressa maggiormente** rispetto all'aria centrale; è quindi **forzata a muoversi verso il pozzetto** con un movimento a ciambella, o per meglio dire **toroidale**. L'effetto di questo macro-vortice è di portare **l'aria verso la zona di combustione** con la sua **energia cinetica** che quindi ne **aumenta la turbolenza**.



Quando lo stantuffo scende si genera un moto toroidale opposto: "**squish inverso**". Questo moto trasporta la carica nella "area di squish". Questo effetto è spesso negativo (talvolta positivo). **Se la combustione è già finita allora verranno "aspirati" verso l'alto gas combusti**. Potrebbero esserci ancora delle specie chimiche da ossidare, degli HC e o delle particelle carboniose, perché magari è finito l'ossigeno; se vengono portati nell'area che non ha partecipato alla combustione, nell'area di squish, dove è ancora presente ossigeno allora potrebbero ossidarsi. **Potrebbero in quanto non è detto ci siano temperature sufficientemente elevate in quanto, in quest'area, il rapporto superficie/volume è molto grande e quindi tende ad assorbire molto (relativamente al resto della camera) calore**. Quindi è vero che c'è ossigeno ma le temperature sono ridotte. Se la combustione ha un timing abbastanza anticipato (o normale, prossimo alle condizioni di massima coppia) può dare un effetto benefico. **Se invece ritardiamo la combustione** (e spesso ritardiamo, per esempio, per ridurre i NOx) può succedere che lo squish inverso coinvolga non solo gas combusti ma anche **gas che devono ancora partecipare al processo di combustione**, portandoli in un area dove c'è ossigeno ma le temperature sono basse: l'ossidazione non si completa e si crea molto Soot ( $PM \uparrow$ ).

## 4. La misura delle Emissioni

### 4.1 Strumentazione per la misura del Particolato (PM)

### 4.2 Determinazione delle emissioni specifiche (o in massa) dai costituenti dei gas di scarico grezzi

### 4.3 Strumentazione per la misura delle emissioni inquinanti gassose

### 4.4 Stima delle emissioni in massa nei gas di scarico diluiti

#### 4.1 Strumentazione per la misura del Particolato (PM)

- Introduzione: richiamo sul Particolato (PM)

- Tecniche per la misura della massa del Particolato (PM)

Tecniche con raccolta del campione (CT: Collecting Techniques) - Metodo gravimetrico

Tecniche in situ – opacimetro e fumimetro (smoke meter)

Confronto degli strumenti

- Tecnica per la misura del numero di particelle del Particolato (PM)

CPC: Condensation Particulate Counter

- Dimensione e distribuzione del Particolato (PM)

Introduzione

Metodi aerodinamici

Electrical Mobility Analyzers

ELPI vs SMPS

- **Introduzione: richiamo sul Particolato (PM) [ ↓ LEZIONE 22: 22/11/19 ]**

Operativamente il particolato è ciò che rimane sul filtro di raccolta quando la misurazione avviene mediante l'utilizzo di tecniche gravimetriche. È composto da frazione solida (SOL), solubile (SOF), solfati (SO<sub>4</sub>) e ceneri.

- **Tecniche per la misura della massa del Particolato (PM)**

Tecniche con raccolta del campione (CT: Collecting Techniques) - Metodo gravimetrico

Tecniche in situ (IST: In Situ Techniques) – opacimetro e fumimetro (Smoke Meter)

Confronto degli strumenti

**Tecniche con raccolta del campione (CT: Collecting Techniques) - Metodo gravimetrico**

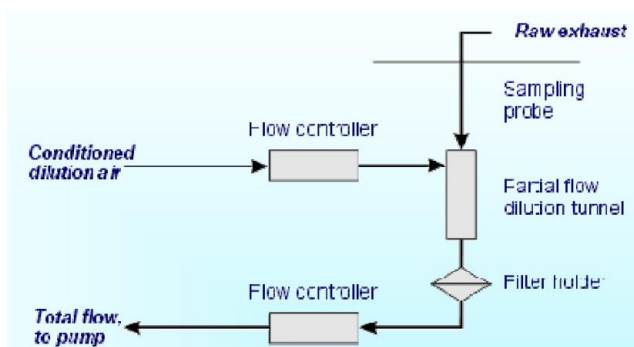
Le particelle vengono prima raccolte su un mezzo filtrante attraverso cui vengono fatti fluire i gas di scarico. Il campione raccolto viene in un secondo tempo analizzato con la strumentazione di misura vera e propria (per esempio con metodi gravimetrici). Il punto critico di queste tecniche è rappresentato dall'instabilità del particolato: durante la raccolta del campione e comunque prima dell'analisi, le particelle possono modificarsi e, in particolare, possono subire alterazioni delle proprie proprietà (inclusi numero e dimensione) rispetto alle particelle presenti sotto forma di aerosol nei gas di scarico. Una seconda problematica, è legata al fatto che vi è un lungo ritardo, rispetto al momento della raccolta, prima che la misura richiesta sia disponibile: se vogliamo modificare la calibrazione del motore per fargli emettere meno particolato, con la tecnica di raccolta c'è il rischio che trascorrono mesi prima di arrivare a un risultato soddisfacente; infatti normalmente non viene utilizzata la tecnica di raccolta per fare una calibrazione del motore (per la calibrazione del motore utilizziamo le tecniche in situ).

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

di HC avviene anch'esso nel tunnel di diluizione; attraverso una linea di prelievo vengono mandati a un feed riscaldato che li analizza in continuazione; facendone l'integrale ne determiniamo il quantitativo.

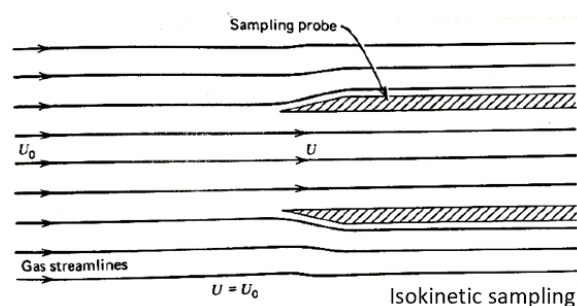
Considerazione sui veicoli Heavy Duty:

Ci sono delle prove particolari specifiche per i veicoli Heavy Duty che non prevedono la disposizione sul banco a rulli: vengono misurate le emissioni dei motori che montano in **due step omologativi**: una prova per punti in condizioni stazionarie e una seconda prova in condizioni dinamiche. Per la prima prova non è necessario il tunnel di diluizione in quanto, lavorando in condizioni stazionarie, conosciamo la portata di gas non diluiti; la normativa per tali condizioni consente di utilizzare dei mini tunnel di diluizione. Conoscendo la portata di gas non diluiti,  $\dot{m}_{exh}$ , introduciamo una portata d'aria,  $\dot{m}_{air}$ , tale per cui si possa ottenere il rapporto di diluizione,  $\dot{m}_{air}/\dot{m}_{exh}$ , richiesto dalla normativa. In realtà, questi mini tunnel di diluizione potrebbero andar bene anche per misure in condizioni dinamiche: in tal caso bisogna riuscire a misurare dinamicamente la portata di gas allo scarico. In ogni caso la normativa prevede omologazione solo per le prove per punti in condizioni stazionarie (utilizziamo i mini tunnel per misure in condizioni dinamiche per lo più per lo sviluppo).

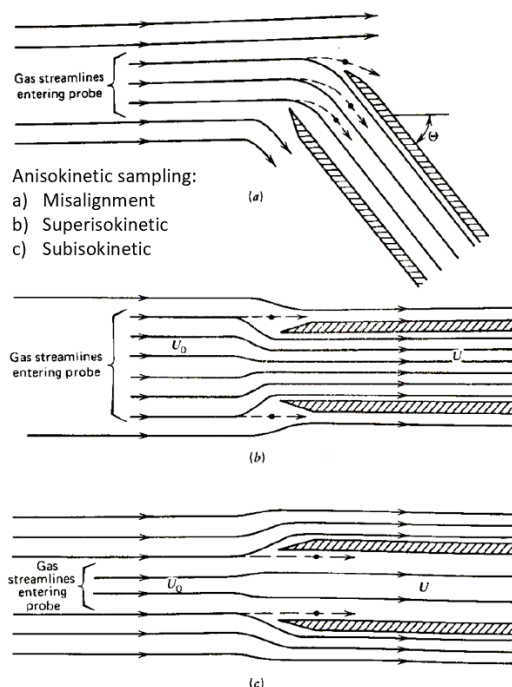


Sonda isocinetica

La sonda per il prelievo deve essere disposta in modo tale che i filetti fluidi del tunnel di diluizione entrino nella sonda senza alterare direzione e velocità.



Bisogna fare attenzione alla disposizione e all'eventuale piegamento del fluido in ingresso: il gas curva ma il particolato non necessariamente; dipende dalla massa e dal diametro delle particelle; alcune potrebbero andar dritte. Bisogna far attenzione anche a quando facciamo accelerare o decelerare il fluido poiché alcune particelle potrebbero attaccarsi alla parete della sonda per termoforesi. L'ideale sarebbe avere una sonda il più possibile isocinetica in modo da non alterare il flusso.





## Opacimetro (OPA)

L'opacimetro misura l'**opacità** definita come la % dell'intensità della luce incidente  $I_0$  non trasmessa dai gas di scarico.

Illuminiamo i gas di scarico con una luce di intensità  $I_0$ ; la luce attraversa la nuvola di fumo, viene in parte assorbita da essa e viene trasmessa (attraversa) una quantità pari a  $I$ , misurata dall'altra parte della nuvola da parte di un **fotoricevitore**.

$$OPA = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) 100 = (1 - N) 100$$

Da un **punto di vista fisico**, la relazione tra  $I$  e  $I_0$  è espressa da:

$$I = I_0 e^{-naQL}$$

$n$ : **concentrazione in volume delle particelle**: quello che ci piacerebbe misurare;

$a$ : coeff. che dipende dalle **caratteristiche fisiche dell'assorbimento** (che dipendono da  $p$ ,  $T$ , **comp. dei gas...**)

$Q$ : coeff. che dipende dalle **dimensioni e forma delle particelle** e **dall'effetto di eclissi** (se abbiamo una particella dietro l'altra, quella oscurata potrebbe non venir contata);

$L$ : lunghezza del cammino ottico.

C'è quindi un **grado di aleatorietà** in tutto ciò, in termini di come l'opacità è legata alla quantità effettiva di particelle carboniose presenti (in questo non c'è un legame diretto). Nonostante ciò, è una **misura in tempo reale** fatta in loco, per cui risulta utile per la calibrazione del motore.

Raggruppiamo  $n$ ,  $a$ ,  $Q$  in un parametro **K, "densità di fumo"**, che dal punto di vista dimensionale è  $[1/L]$ .

$$OPA = (1 - e^{-naQL}) 100 = (1 - e^{-KL}) 100$$

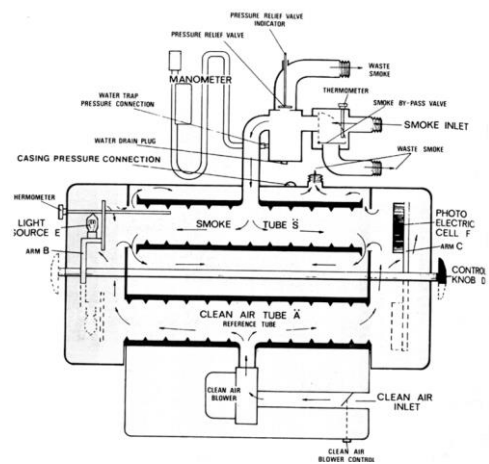
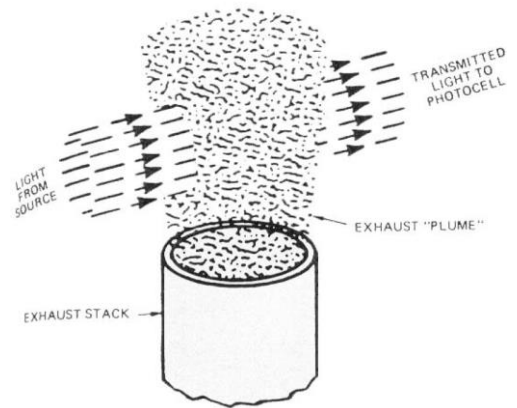
$$K = -\frac{1}{L} \ln \left(1 - \frac{OPA}{100}\right)$$

Gli opacimetri possono essere **classificati in**:

- **Opacimetri a flusso totale**: misurano l'opacità di tutta la corrente dei gas combusti (caso esaminato);
- **Opacimetri a campionamento parziale**: misurano l'opacità di una porzione dei gas combusti che vengono prelevati dalla linea di scarico del motore e convogliati in una camera di misura.

Gli opacimetri a campionamento parziale effettuano un prelievo di una porzione dei gas di scarico grezzi del motore, non diluiti, e lo convogliano in un **volume chiuso** all'interno dello strumento. All'interno dello strumento troviamo una **sorgente di luce** e un **fotoricevitore** posti a una distanza ben definita (per cui **non abbiamo il problema di L che potevamo avere con l'opacimetro a flusso totale**). Se l'**opacimetro a flusso totale poteva essere utilizzato anche in un transitorio molto spinto**, l'opacimetro a flusso a campionamento parziale è limitato per il fatto che c'è un volume da riempire. **Comunque, solitamente, vengono utilizzati solo opacimetri a campionamento parziale.**

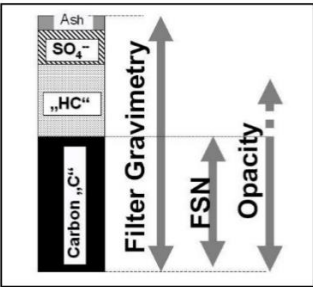
Questi strumenti, quando vengono utilizzati, prevedono alcune precauzioni: **devono essere calibrati e puliti** (in genere ogni **20' di utilizzo**) spesso. Per **calibrare lo zero** introduciamo azoto ( $N_2$ ) o aria pura (non quella ambientale). Per fare il **fondo scala** spegniamo la sorgente di luce, il ricevitore non riceve nulla e tale condizione simula  $I = 0$ .





### Confronto degli strumenti

| Strumento                                  | Limite inferiore di misura   |
|--|------------------------------|
| Fumimetro                                  | 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  |
| Opacimetro                                 | 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| Metodi gravimetrici (tunnel di diluizione) | 650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |



Il fumimetro misura il responsabile dello sporco: soprattutto la frazione solida;

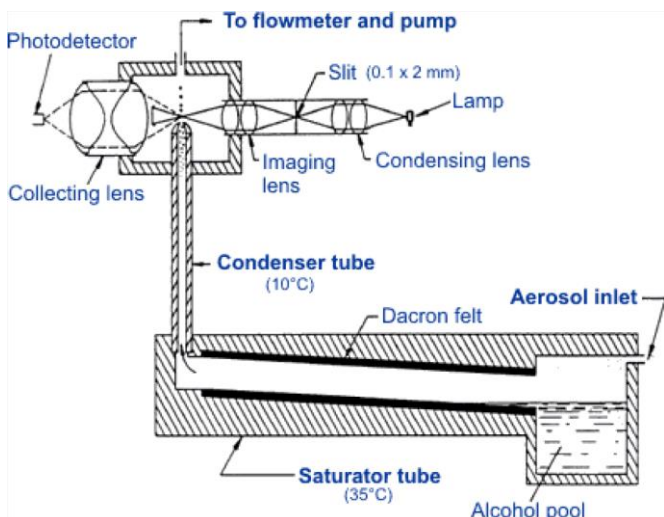
L'opacimetro misura principalmente la frazione solida ma non solo (oggi non si utilizza molto, proprio perché non sappiamo esattamente cosa misuriamo con esso. Veniva utilizzato per alcune misure per gli heavy duty che prevedevano delle prove di accelerazione per controllare le fumate alla partenza dalla sosta. I vecchi opacimetri avevano un problema: lo  $\text{NO}_2$  interferiva nella misurazione assorbendo la luce verde);

Il metodo gravimetrico misura e definisce il particolato.

Ci sono delle prove particolari specifiche per i veicoli heavy duty che non prevedono la disposizione sul banco a rulli: vengono misurate le emissioni dei motori che montano in due step omologativi: una prova per punti in condizioni stazionarie e una seconda prova in condizioni dinamiche. Per la prima prova non è necessario il tunnel di diluizione in quanto, lavorando in condizioni stazionarie, conosciamo la portata di gas non diluiti; la normativa per tali condizioni consente di utilizzare dei mini tunnel di diluizione. Introduciamo una portata d'aria tale per cui si possa ottenere il rapporto di diluizione richiesto dalla normativa.

- Tecniche per la misura del numero di particelle del Particolato(PM) [ ↓ LEZIONE 23: 27/11/19]

### CPC: Condensation Particulate Counter



Il campione da analizzare, facendo riferimento alla figura, viene introdotto sulla destra; passa attraverso il tubo di saturazione dov'è presente vapore di alcol che, condensandosi sul particolato, accresce le dimensioni delle particelle fino al raggiungimento di una certa taglia, permettendo così un più facile rivelamento da parte del sistema ottico che si trova a valle. Diversamente ci sarebbe il rischio che vengano conteggiate solo le particelle più grandi e non quelle più piccole. Il sistema ottico è composto da una sorgente luminosa, un sistema di lenti e un fotoricettore; il fotoricettore contando le interruzioni della luce conta le particelle: è in grado di contare tutte le particelle aventi una taglia  $\geq 10$  [nm] (propriamente il cutoff 23 [nm]) prima del loro accrescimento per mezzo dei vapori di alcol. Alcuni strumenti più moderni sono in grado di scendere al rilievo di particelle aventi diametro di 3 [nm]. Per quanto riguarda il conteggio sono in uso due metodi.

## - Dimensione e distribuzione del Particolato (PM)

### Introduzione

#### Metodi aerodinamici

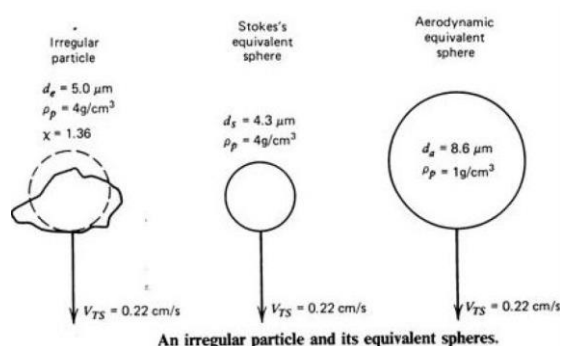
#### Electrical Mobility Analyzers

#### ELPI vs SMPS

### Introduzione

Le misure di distribuzione della dimensione del particolato sono diverse dalle quantificazioni della massa totale del particolato e del numero di particelle. Sono ancora lontane dall'essere standardizzate. A causa delle differenze nel campionamento del particolato e nella varietà di metodi di misurazione utilizzati, i risultati dei test di diversi laboratori non sono tra loro coerenti. **Un obiettivo importante della ricerca in corso è lo sviluppo di procedure standard di misurazione**, che consentano una quantificazione affidabile del numero delle particelle in funzione della distribuzione dimensionale.

Data la sua natura, la forma del particolato non è sferica. Per misurare e classificare la dimensione del particolato, normalmente ci riferiamo a due diametri equivalenti:



- **Aerodynamic diameter:** diametro di una sfera avente una velocità di deposizione ( $v_{TS}$ ) pari a quella della particella reale e avente densità di  $1000 [kg/m^3] = 1 [g/cm^3]$  (gli strumenti utilizzati per classificare le particelle si basano sulla loro mobilità meccanica, ovvero sul fatto che particelle aventi massa maggiore hanno una maggior inerzia: quindi se cerchiamo di farle curvare deviano meno rispetto a particelle più leggere. Vengono quindi classifica in stadi di grandezza diversi; ne seguirà il conteggio).

- **Stokes diameter (o diametro di mobilità elettrica):** diametro di una sfera avente velocità e densità pari a quella della particella reale (le particelle vengono caricate elettricamente e sono fatte passare in un campo elettromagnetico: particelle con diametri diversi vengono deviate dal campo elettromagnetico in modo diverso; quindi, in base a come vengono deviate, entrano in uno specifico classificatore. Seguirà la fase di conteggio).

Gli strumenti utilizzati per la misurazione sono diversi in funzione del metodo utilizzato:

**Metodi aerodinamici:** lo strumento accelera le particelle portandole a una certa velocità; dopodiché fanno variare la traiettoria della linea di flusso: i gas di scarico seguono la deviazione del flusso mentre le particelle, avendo una certa inerzia, tendono ad andare dritte. Lo strumento più comune è l'**Electric Low Pressure Impactor (ELPI)**.

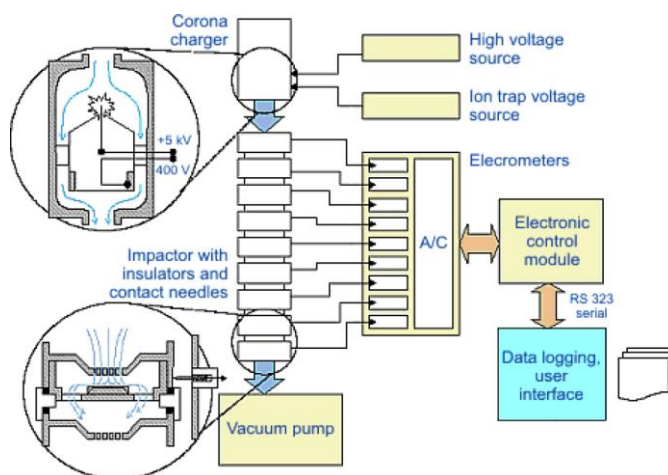
**Electrical Mobility Analyzers:** gli strumenti di questa categoria misurano la mobilità di particelle cariche all'interno di un campo elettromagnetico. Lo strumento più utilizzato si chiama **Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)**.

**Diffusion Batteries:** Esistono poi altri strumenti che misurano il diametro di mobilità elettrica però, anziché misurare la capacità delle particelle di cambiare la propria direzione quando sono soggette a un campo elettromagnetico, misurano la loro **capacità di diffondere all'interno del campo**.

Oggigiorno gli strumenti più utilizzati sono l'ELPI e lo SMPS.

**Nota:** Per accelerare il fluido si realizzano dei **salto di pressione** tra uno stadio e l'altro: nell'ultimo stadio, l'espansione si realizza al di sotto della pressione ambientale in modo da raggiungere velocità sufficienti per separare le particelle più piccole.

La **configurazione a 12 stadi** permette di misurare le particelle di diametro nel range: **10 [μm] – 32 [nm]**



### Electrical Mobility Analyzers

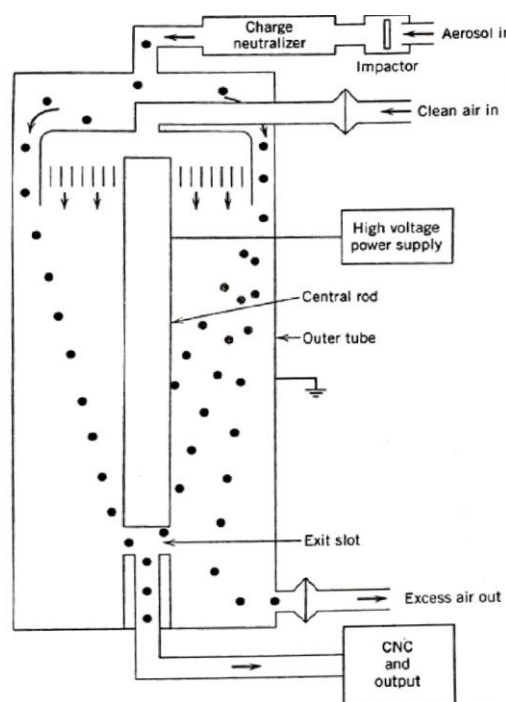
Gli **EMA**, tra cui lo strumento più utilizzato si chiama **Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)**, fanno parte della famiglia degli **DMA: Differential Mobility Analyzers**. Un EMA sfrutta come caratteristica la **mobilità elettrica (z)** delle particelle che viene definita come:

$z = B \cdot q$ : mobilità elettrica,  $B$ : mobilità meccanica;

$q$ : carica della particella: **dobbiamo far in modo che q sia uguale per tutte le particelle** o comunque che le particelle abbiano cariche confrontabile.

Le particelle vengono introdotte nello strumento dall'alto. Lo strumento presenta un **elettrodo centrale** per il quale si crea un campo elettromagnetico.

Per una certa intensità del campo elettromagnetico, solo le particelle che hanno una ben definita mobilità elettrica passano attraverso il **foro centrale** e vengono quindi successivamente contate da un **particle counter (CPC)**. Inizialmente incominciano a deviare le particelle più piccole; **man mano che facciamo crescere il campo elettromagnetico vengono deviate anche le particelle più grandi**. Le particelle di una certa taglia in funzione dell'intensità campo vengono infine mandate a un CPC che le conta.



L'operazione viene quindi ripetuta con intensità di campo crescenti per contare particelle sempre più grandi. Il parametro dimensionale di riferimento è il diametro di mobilità (o diametro di Stokes), definito come il diametro di particelle sferiche equivalenti aventi, la stessa mobilità di quelle misurate (stesse  $m$  e  $v$ ).

I risultati cambiano a seconda di come facciamo variare il campo nel tempo. È stabilito che deve essere fatto variare tra un **valore minimo e uno massimo**: con il valore minimo misuriamo le particelle più piccole e con il valore massimo quelle più grandi. Come lo facciamo variare? Possiamo farlo variare in modo:

**Continuo (rampa):** Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) (scansione più rapida:  $\sim 1'$  → più utilizzato)

**Discontinuo (gradini):** Differential Mobility Particle Sizer (DMPS) (come il caso esaminato).

La **variazione discontinua è più precisa ma richiede più tempo**. È ottimo se abbiamo la possibilità di far lavorare il motore in condizioni stazionarie per un tempo sufficientemente lungo. **Entrambi potrebbero aver problemi durante un transitorio del motore**. Il DMPS per ovvie ragioni, mentre lo SMPS per via della brevità della durata della scansione (1 minuto per completare la misura).

## 4.2 Determinazione delle emissioni specifiche dai costituenti dei gas di scarico grezzi

- Introduzione
- Reazione di combustione e nomenclatura
- Espressione della dosatura in funzione del numero di moli di aria
- Calcolo del numero di moli di aria e delle moli allo scarico

Approccio “Mass-balance”

Approccio “Water-gas reaction”

Approccio “No Oxygen”

Approcci semplificati

Esempi di applicazioni

- Stima EGR

Da  $CO_2$  nel collettore di aspirazione

Da  $CO_2$  nel collettore di aspirazione e da misura delle emissioni allo scarico

Esempi di applicazione

### - Introduzione

Preview: Emissioni in volume -> emissioni in massa -> emissioni specifiche in [g/km] o in [g/kWh].

Vogliamo ottenere le emissioni specifiche in massa [g/km] o [mg/km]. Se consideriamo i veicoli heavy duty le normative impongono dei limiti in [g/kWh] (che propriamente sarebbero [g/h][1/kW]) in quanto i motori sono testati nella cella motore a punti stazionari, per cui la misura risulta più agevole in tal modo rispetto che in [g/km].

Mediante opportuni analizzatori di inquinanti gassosi, è possibile quindi stimare le emissioni in volume [X] di gas inquinanti (e di  $CO_2$ ,  $CO_2$ ) nei gas di scarico grezzi a monte e/o valle del sistema di after treatment, in un determinato punto di funzionamento del motore (generalmente espresso come «pme x N»). Tali concentrazioni in volume [X] possono essere convertite in una portata in massa ( $\dot{m}_X$ ) di inquinante che, a sua volta, può essere utilizzata per ricavare l'emissione specifica ( $\{X\}_{bs}$ ) dell'inquinante X (portata di inquinante emessa riferita alla potenza erogata dal motore, rapporto normalmente espresso in [g/kWh]) oppure l'indice di emissione (EIX) (massa di inquinante emesso riferito alla massa di combustibile consumato, rapporto normalmente espresso in [g/kg]).

$$\dot{m}_X = \dot{m}_{exh} \frac{M_X}{M_{exh}} [X]_{wet}: \text{portata in massa dell'inquinante}$$

$$\{X\}_{bs} = \frac{\dot{m}_X}{W}: \text{emissione specifica [g/kWh]}$$

$$EIX = \frac{\dot{m}_X}{\dot{m}_f}: \text{indice di emissione [g/kg]}$$

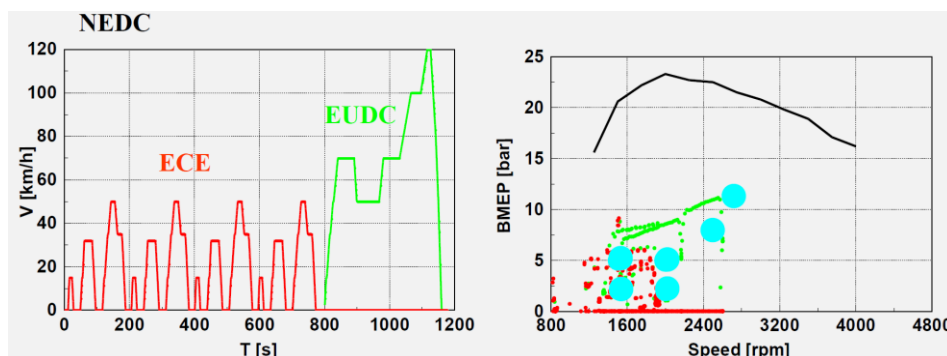
Considerando i veicoli Heavy Duty:

Come vedremo quanto tratteremo contesto normativo, l'omologazione comprende una prova «hot start steady state test cycle» da eseguire sul motore installato al banco dinamometrico. La prova comprende una serie di punti stazionari (“speed x load”), ciascuno di durata ben determinata, collegati da opportune rampe. Il ciclo di prova prende il nome di WHSC (World Harmonized Stationary Cycle). Le emissioni specifiche rilevate sul ciclo WHSC devono risultare inferiori ai limiti previsti dalla normative vigenti. È dunque necessario stimare le emissioni specifiche a partire dalle emissioni in volume rilevate dagli analizzatori. Una delle opzioni prevede la determinazione delle emissioni specifiche a partire dalle concentrazioni in volume di inquinanti rilevate nei gas grezzi allo scarico del motore. Il regolamento tecnico UNECE, 2007 “Global technical regulation No.4 (GTR4)”, ECE/TRANS/180/Add.4, 25 Annuari 2007, fornisce pertanto le procedure per effettuare tali conversioni.

Considerando i veicoli leggeri:

Per quanto riguarda le **autovetture e di veicoli commerciali leggeri**, i test omologativi vengono svolti in modo differente, ed a quel fine non si determinano le emissioni specifiche a partire da i gas grezzi. Il veicolo viene installato in una opportuna sala prova dotata di un banco a rulli, viene riprodotto un **opportuno ciclo guida di riferimento (WLTP)** e le emissioni «tail pipe» vengono diluite e raccolte in sacchi. Vengono valutate le emissioni in massa di inquinanti complessivamente emesse in atmosfera durante il ciclo guida che, divise per l'unità di lunghezza del ciclo, vengono confrontate con i limiti normativi normalmente espressi in [g/km].

Tuttavia, durante le **fasi di sviluppo del solo powertrain**, il motore viene testato installandolo in una opportuna **sala prova motore** in cui il veicolo non è presente. Già in questa fase, è opportuno avere una **stima di quelle che potranno essere le emissioni valutate sul futuro veicolo lungo il ciclo di riferimento**.



I punti di funzionamento del veicolo (diagramma di sinistra) vengono trasformati in punti di funzionamento del motore (diagramma di destra). Inizialmente l'analisi può concentrarsi su un numero limitato di punti di funzionamento, chiamati **“key-point”** e indicati in blu, su cui vengono stimate le emissioni specifiche di inquinanti e di  $CO_2$ .

In questo caso esistono delle **“best practices”**. Una di esse consiste nell'adozione di espressioni uguali o derivate da quella del regolamento tecnico precedentemente visto.

Oppure si può ricavare un **approccio più generale** muovendo dalla seguente osservazione. È noto che  $M_{exh}$  è esprimibile come:

$$M_{exh} = \frac{\sum_j (n_j \cdot M_j)}{\sum_j n_j}$$

$n_j$ : numero di moli di ciascuna specie chimica allo scarico

$M_j$ : massa molare di ciascuna specie chimica allo scarico

La composizione dei gas di scarico dipende dalle proporzioni relative di aria e combustibile con cui opera il motore, dalla composizione del combustibile stesso e dalla completezza della reazione di combustione. Perciò, **questo approccio generale**, una volta determinata la composizione dei gas di scarico, nota la composizione del combustibile, **consente di valutare non solo le emissioni in massa, ma anche il rapporto aria/combustibile (dosatura  $\lambda$ ) e il grado di EGR**.



**- Espressione della dosatura ( $\alpha$ ) e di ( $\lambda$ ) in funzione del numero di moli di aria ( $n$ )**

Una volta nota l'incognita  $n$  ricaviamo il valore della dosatura ( $\alpha$ ).

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{air,dry}}{\dot{m}_b} = \frac{n \cdot M_{air,dry}(1 + A + B + D)}{M_b(1 + E + F + G + L + P + Q + R + S)}$$

$$M_b = \frac{1}{(1 + E + F + G + L + P + Q + R + S)} \cdot [1(xM_C + yM_H + zM_O) + E(2M_H) + F(2M_O) + G(2M_N) + L(M_C + 2M_O) + P(2M_H + M_O) + Q(M_C + M_O) + R(M_{He}) + S(M_{Ar})]$$

Una volta nota l'incognita  $n$  ricaviamo anche il valore di ( $\lambda$ ).

$$\lambda = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = \frac{Air/Fuel}{Air/Fuel_{st}} = \frac{Fuel_{st}}{Fuel} : \text{relative air fuel ratio}$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{air,dry}/\dot{m}_b}{(\dot{m}_{air,dry}/\dot{m}_b)_{st}} = \frac{n_{air} M_{air,dry}/n_b M_b}{(n_{air} M_{air,dry}/n_b M_b)_{st}} = \frac{(n_{air}/n_b)(M_{air,dry}/M_b)}{(n_{air}/n_b)_{st}(M_{air,dry}/M_b)} = \frac{(n_{air}/n_b)}{(n_{air}/n_b)_{st}} = \frac{n_{air}}{n_{air,st}} = \frac{n}{n_{st}}$$

con  $n_b = n_{fuel} = 1$ ;  $n_{air} = n$ ;  $n_{st} = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} + \frac{E}{2} - F + \frac{Q}{2}$

**- Calcolo del n. di moli di aria ( $n$ ) e delle moli allo scarico ( $a, b, e, g, g', h, h', p, c, d, f, i, q$ ) (14 incognite)**

Per la risoluzione del sistema a 14 incognite possiamo scegliere di adottare uno dei seguenti approcci:

- Approccio "Mass-balance"                      Approccio "No Oxygen"                      Esempi di applicazione
- Approccio "Water-gas reaction"              Approcci semplificati

**Approccio "Mass-balance"**

**Calcolo delle moli ( $a, b, e, g, g', h, h', p$ ) di ( $CO_2, CO, O_2, NO, NO_2, CH_4, C_xH_yO_z, CH_wO_u$ )**

Le 8 incognite verdi ,  $a, b, e, g, g', h, h', p$ , non sono direttamente note, ma sono ricavate: sono espresse in funzione della concentrazione  $[X]$  che misuriamo tramite gli analizzatori moltiplicate per  $n_{tot} = n_{tot,dry} + d$  se la misura è fatta su base umida oppure per  $n_{tot,dry} \cdot CF_{cooler}$  se condotta su base secca.

- Se la misura delle emissioni gassose è fatta su base umida (wet):

Esempio: misuriamo  $[NO]_{wet}$  (concentrazione di  $NO$  su base umida); sapendo che:

$$[NO]_{wet} = \frac{n_{NO}}{(n_{tot,dry} + n_{H_2O})} = \frac{g}{(n_{tot,dry} + d)} \rightarrow g = [NO]_{wet} \cdot (n_{tot,dry} + d)$$

$d$  era già incognita; ora però compare una nuova incognita  $n_{tot,dry}$ .

Esempio: misuriamo  $[CH_4]_{wet}$  (concentrazione di  $CH_4$  su base umida); sapendo che:

$$[CH_4]_{wet} = \frac{n_{CH_4}}{(n_{tot,dry} + n_{H_2O})} = \frac{h}{(n_{tot,dry} + d)} \rightarrow h = [CH_4]_{wet} \cdot (n_{tot,dry} + d)$$

$$\rightarrow h' = ([TCH]_{wet} - [CH_4]_{wet}) \cdot (n_{tot,dry} + d)/x'$$

- Se invece la misura delle emissioni gassose è fatta su base secca (dry):

Esempio: misuriamo  $[NO]_{dry}$  (concentrazione in volume di  $NO$  su base secca); sapendo che:

$$[NO]_{dry} = \frac{n_{NO}}{n_{tot,dry} \cdot CF_{cooler}} = \frac{g}{n_{tot,dry} \cdot CF_{cooler}} \rightarrow g = [NO]_{dry} \cdot n_{tot,dry} \cdot CF_{cooler}$$

Dove  $CF_{cooler}$  tiene conto dell'acqua che non condensa. Gli analizzatori devono funzionare su base secca: alcuni di questi hanno dei vetrini sui quali potrebbe depositarsi del vapor d'acqua. Quindi **bisogna rimuovere l'acqua prima di mandare i gas di scarico all'analizzatore. Per separare l'acqua facciamo passare i gas di scarico in un sistema refrigerante che fa condensare l'acqua.** Non riuscendo a condensare tutta l'acqua il coefficiente  $CF_{cooler}$  tiene conto di questo aspetto:  $CF_{cooler} = 1/(1 - [H_2O_{cooler}])$



## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Calcolo delle moli (n) + (c, d, f, i, q) di (Aria)+(H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, He)** [non da sapere per all'esame]:

- 6 equazioni di bilancio:

- 1)  $x + L + Q + nB = a + b + h + h'x' + p$  Carbonio
- 2)  $y + 2E + 2P + 2nCH_{abs} = 2c + 2d + 4h + h'y' + pw$  Idrogeno
- 3)  $z + 2F + 2L + P + Q + 2n + 2nB + nCH_{abs} = 2a + b + d + 2e + g + 2g' + h'z' + pu$  Ossigeno
- 4)  $2G + 2nA = 2f + g + g'$  Azoto
- 5)  $S + nD = i$  Argon
- 6)  $R = q$  Elio

L'espressione di  $p$  nelle prime tre equazioni di bilancio dipende però dalle altre moli allo scarico. Sostituendo l'espressione di  $p$  viste in precedenza, si ottengono le equazioni di bilancio:

1) Bilancio del Carbonio:

$$x + L + Q + nB = a \left[ 1 + \Gamma \frac{M_{CO_2}}{M_{PM}} \right] + b \left[ 1 + \Gamma \frac{M_{CO}}{M_{PM}} \right] + c \Gamma \frac{M_{H_2}}{M_{PM}} + d \Gamma \frac{M_{H_2O}}{M_{PM}} + e \Gamma \frac{M_{O_2}}{M_{PM}} + f \Gamma \frac{M_{N_2}}{M_{PM}} + g \Gamma \frac{M_{NO}}{M_{PM}} + g' \Gamma \frac{M_{NO_2}}{M_{PM}} + h \left[ 1 + \Gamma \frac{M_{CH_4}}{M_{PM}} \right] + h' \left[ x' + \Gamma \frac{M_{NMHC}}{M_{PM}} \right] + i \Gamma \frac{M_{Ar}}{M_{PM}} + q \Gamma \frac{M_{He}}{M_{PM}}$$

2) Bilancio dell'Idrogeno:

$$y + 2E + 2P + 2nCH_{abs} = a w \Gamma \frac{M_{CO_2}}{M_{PM}} + b w \Gamma \frac{M_{CO}}{M_{PM}} + c \left[ 2 + w \Gamma \frac{M_{H_2}}{M_{PM}} \right] + d \left[ 2 + w \Gamma \frac{M_{H_2O}}{M_{PM}} \right] + e w \Gamma \frac{M_{O_2}}{M_{PM}} + f w \Gamma \frac{M_{N_2}}{M_{PM}} + g w \Gamma \frac{M_{NO}}{M_{PM}} + g' w \Gamma \frac{M_{NO_2}}{M_{PM}} + h \left[ 4 + w \Gamma \frac{M_{CH_4}}{M_{PM}} \right] + h' \left[ y' + w \Gamma \frac{M_{NMHC}}{M_{PM}} \right] + i w \Gamma \frac{M_{Ar}}{M_{PM}} + q w \Gamma \frac{M_{He}}{M_{PM}}$$

3) Bilancio dell'Ossigeno:

$$z + 2F + 2L + P + Q + 2n + 2nB + nCH_{abs} = a \left[ 2 + u \Gamma \frac{M_{CO_2}}{M_{PM}} \right] + b \left[ 1 + u \Gamma \frac{M_{CO}}{M_{PM}} \right] + c u \Gamma \frac{M_{H_2}}{M_{PM}} + d \left[ 1 + u \Gamma \frac{M_{H_2O}}{M_{PM}} \right] + e \left[ 2 + u \Gamma \frac{M_{O_2}}{M_{PM}} \right] + f u \Gamma \frac{M_{N_2}}{M_{PM}} + g \left[ 1 + u \Gamma \frac{M_{NO}}{M_{PM}} \right] + g' \left[ 2 + u \Gamma \frac{M_{NO_2}}{M_{PM}} \right] + h u \Gamma \frac{M_{CH_4}}{M_{PM}} + h' \left[ z' + u \Gamma \frac{M_{NMHC}}{M_{PM}} \right] + i u \Gamma \frac{M_{Ar}}{M_{PM}} + q u \Gamma \frac{M_{He}}{M_{PM}}$$

4) Bilancio dell'Azoto:

$$2G + 2nA = 2f + g + g'$$

5) Bilancio dell'Argon:

$$S + nD = i$$

6) Bilancio dell'Elio:

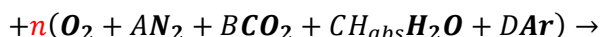
$$R = q$$

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Nota: una volta non si utilizzava l'analizzatore di Ossigeno; gli analizzatori constavano di più ed erano più difficili da utilizzare. Oggi difficilmente ci si procura tutti gli analizzatori a eccezione di esso (il set di analizzatori a costa complessivamente ~250000 euro).

**Approcci semplificati**

L'approccio metodologico descritto sin ora ha l'obiettivo di essere completo ed esaustivo. Tuttavia, da esso è possibile ricavare delle formule più dirette introducendo delle opportune ipotesi semplificative legate all'applicazione specifica.



hp1)  $A = 3.773$ ;  $B = C = D = 0$ : B, C, D sono i coefficienti che riguardano la composizione dell'aria. Diciamo che l'aria è secca (no  $H_2O$ ), non ci sono  $CO_2$  e  $Ar$ . Allora A è determinato dal rapporto tra Azoto e Ossigeno;

hp2)  $h = 0$ : significa che non misuriamo le concentrazioni di idrocarburi incombusti metanici e non metanici; immaginiamo di misurare solo la concentrazione totale  $C_{x'}H_{y'}O_{z'}$  (ora include anche i metanici);

hp3)  $x' = x = 1$ ;  $y' = y$ ;  $z' = z$ : significa che assumiamo che la composizione degli idrocarburi coincida con quella dell'idrocarburo di partenza:  $C_{x'}H_{y'}O_{z'} = C_xH_yO_z$ ;

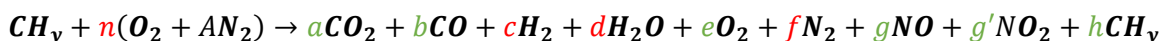
hp4)  $z' = z = 0$ : significa che assumiamo che il combustibile che utilizziamo non sia ossigenato;

hp5)  $p = 0$ : significa che assumiamo che non vi sia particolato allo scarico;

hp6): tutte le specie allo scarico vengono misurate su base secca;

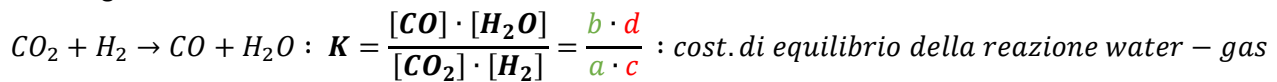
hp7)  $[H_2O_{cooler}] = 0 \rightarrow CF_{cooler} = 1/(1 - [H_2O_{cooler}]) = 1$

Dunque, l'equazione di reazione diventa:



**Approccio “Water-gas reaction” semplificato (Spindt, 1965)**

Sostituiamo l'equazione della  $n_{tot,dry}$  con l'equazione che esprime la costante K di equilibrio della cosiddetta “water-gas reaction”:



Dunque, abbiamo un sistema di 11 equazioni in 11 incognite: risolvibile -> una soluzione.

**6 equazioni dagli analizzatori: (a, b, e, g, g', h) di (CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>y</sub>)**

**1 equazione che definisce:  $K = \frac{[CO] \cdot [H_2O]}{[CO_2] \cdot [H_2]} = \frac{b \cdot d}{a \cdot c}$**

**4 equazioni dai bilanci atomici: (C, H, O, N<sub>2</sub>)**

Dalla costante K e dall'equazione di bilancio dell'idrogeno (2) otteniamo che:

$$d = \frac{y(1-h)}{2\left(\frac{b}{aK} + 1\right)} : n \text{ di moli di acqua}$$

Dal bilancio dell'ossigeno (3) si ottiene che:

$$n = \frac{2a + b + d + 2e + g + 2g'}{2} : n \text{ di moli di aria}$$

**Approccio “No-Oxygen” semplificato**

Utilizziamo questo approccio quando viene a mancare la misura di un analizzatore (perché magari si rompe). Anziché avere 6 equazioni degli analizzatori ne abbiamo 5 e consideriamo sia l'equazione di  $n_{tot,dry}$  che l'equazione di equilibrio K della “water-gas reaction”.

Dunque, abbiamo un sistema di 11 equazioni in 11 incognite: risolvibile -> una soluzione. Questo approccio è definito nella letteratura tecnica “No Oxygen method”. Per esempio, quando la misura della concentrazione di ossigeno allo scarico non è disponibile:

**5 equazioni dagli analizzatori: (a, b, g, g', h) di (CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>y</sub>)**

**1 equazione che definisce:  $n_{tot,dry} = (a + b + c + e + f + g + g' + h) = \frac{1}{[CO_2]_{dry} + [CO]_{dry} + [THC]_{dry}}$**

**1 equazione che definisce:  $K = \frac{[CO] \cdot [H_2O]}{[CO_2] \cdot [H_2]} = \frac{b \cdot d}{a \cdot c}$**

**4 equazioni dai bilanci atomici: (C, H, O, N<sub>2</sub>)**

**Espressione della dosatura ( $\alpha$ ) e di ( $\lambda$ ) in funzione del numero di moli di aria ( $n$ )**

Indipendentemente dall'approccio, una volta stimato  $n$ , ricaviamo facilmente la dosatura ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{air,dry}}{\dot{m}_b} = \frac{n \cdot M_{air,dry}}{n_b M_b} = n \cdot \frac{2 \cdot 15.9994 + 3.773 \cdot 2 \cdot 14.0067}{12.011 + y \cdot 1.0079} = n \cdot \frac{137.69}{12.011 + y \cdot 1.0079}$$

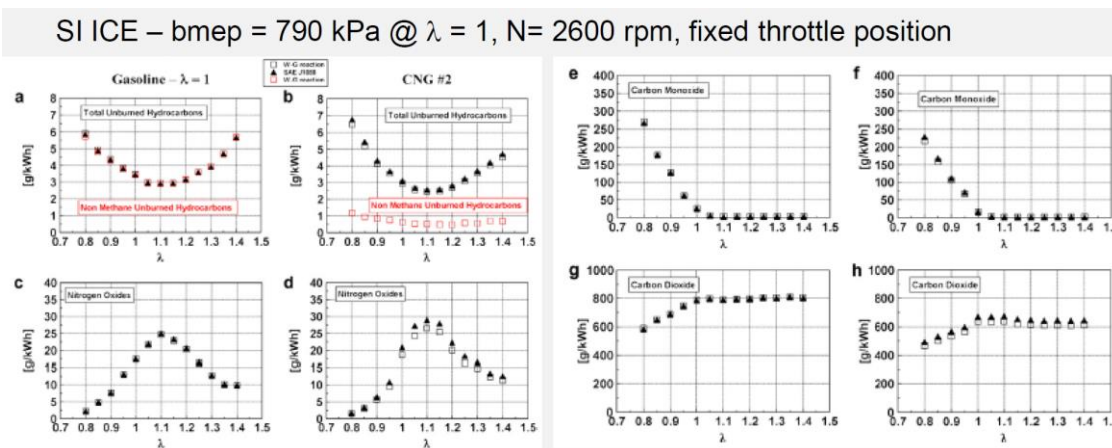
Una volta nota l'incognita  $n$  ricaviamo anche il valore di ( $\lambda$ ).

$$\lambda = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = \frac{Air/Fuel}{Air/Fuel_{st}} = \frac{Fuel_{st}}{Fuel} : \text{relative air fuel ratio}$$

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{air,dry}/\dot{m}_b}{(\dot{m}_{air,dry}/\dot{m}_b)_{st}} = \frac{n_{air} M_{air,dry}/n_b M_b}{(n_{air} M_{air,dry}/n_b M_b)_{st}} = \frac{(n_{air}/n_b)(M_{air,dry}/M_b)}{(n_{air}/n_b)_{st}(M_{air,dry}/M_b)} = \frac{(n_{air}/n_b)}{(n_{air}/n_b)_{st}} = \frac{n_{air}}{n_{air,st}} = \frac{n}{n_{st}}$$

con  $n_b = n_{fuel} = 1$ ;  $n_{air} = n$ ;

Esempio di risultati:



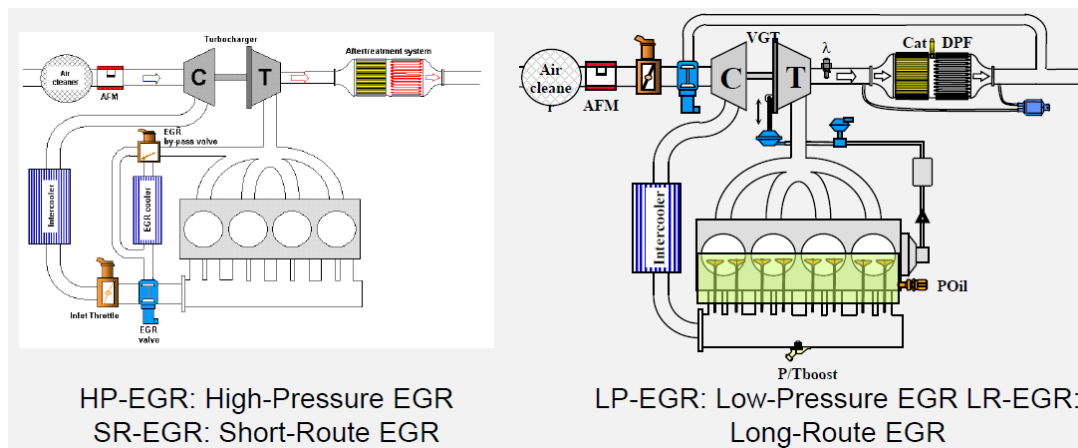
Considerazione 1 su  $NO_x$ : che si tratti di  $NO_2$  o  $NO$  scegliamo comunque il valore di  $NO_2$  in quanto siamo interessati a valutare l'effetto finale sull'ambiente (lo  $NO$  nell'ambiente diventerà prima o poi  $NO_2$ ).

Considerazione 2 su  $NO_x$ : i valori delle concentrazioni di  $NO$  e  $NO_2$  prima di essere utilizzati devono essere moltiplicati per un coefficiente che tiene conto dell'umidità dell'aria. *Se l'umidità aumenta, il fattore correttivo fa aumentare le emissioni di  $NO$  (corretto in quanto aumentando l'umidità leggiamo di meno di quello che dovremmo leggere).* D: Diesel; G: Gasoline.

$$k_{h,D} = \frac{15.698 \cdot H_a}{1.000} + 0.832 \quad , \text{ con } H_a: \text{umidità ambiente} \left[ \frac{g \text{ of } H_2O}{kg \text{ of air, dry}} \right]$$

$$k_{h,G} = 0.6272 + 44.030 \cdot 10^{-3} \cdot H_a - 0.862 \cdot 10^{-3} \cdot H_a^2$$

- Stima EGR



Ricaviamo:

$$X_r = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{air} + \dot{m}_{EGR}} : \text{grado in massa di EGR}$$

Da  $CO_2$  nel collettore di aspirazione (Metodo Semplicato)

Da  $CO_2$  nel collettore di aspirazione e da misura delle emissioni allo scarico (Metodo Estes)

Confronto tra Metodo Semplicato e Metodo Estes

### Da CO<sub>2</sub> nel collettore di aspirazione e da misura delle emissioni allo scarico (Metodo Esteso)

Un secondo metodo, più completo, tiene conto anche della composizione di quello che viene ricircolato.

$$X_r = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{air} + \dot{m}_{EGR}} = \frac{\Omega_1}{\Omega_1 + \Omega_2 x} : \text{grado in massa di EGR}$$

$$x = \frac{1 - \psi_2 [CO_2]_{int}}{\psi_1 [CO_2]_{int} - B}$$

$$\psi_1 = (1 + A + B + D)$$

$$\psi_2 = 1 + \frac{b}{a} + \frac{c}{a} + \frac{e}{a} + \frac{f}{a} + \frac{g}{a} + \frac{g'}{a} + \frac{h}{a} + \frac{h'}{a} + \frac{i}{a} + \frac{q}{a} + \frac{p}{a}$$

$$\Omega_1 = M_{CO_2} + \frac{b}{a} M_{CO} + \frac{c}{a} M_{H_2} + \frac{e}{a} M_{O_2} + \frac{f}{a} M_{N_2} + \frac{g}{a} M_{NO} + \frac{g'}{a} M_{NO_2} + \frac{h}{a} M_{CH_4} + \frac{h'}{a} M_{NMHC} + \frac{i}{a} M_{Ar} + \frac{q}{a} M_{He} + \frac{p}{a} M_{PM}$$

$$\Omega_2 = M_{O_2} + A M_{N_2} + B M_{CO_2} + C H_{abs} M_{H_2O} + D M_{Ar}$$

Il termine  $x$  è funzione di quello che misuriamo in termini di CO<sub>2</sub> nel collettore di aspirazione, mediante i termini  $\psi_1$  e  $\psi_2$ ; il termine  $\psi_1$  dipende dalla composizione dell'aria; il termine  $\psi_2$  dipende dalla composizione dei gas di scarico; i termini  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$  dipendono dalle masse molecolari e dalle moli che ci sono allo scarico.

La frazione molare di CO<sub>2</sub> **misurata su base secca** in un punto del collettore di aspirazione a valle dell'immissione di EGR è:

$$[CO_2]_{int} = \frac{(n_{CO_2})_{air} + (n_{CO_2})_{EGR}}{(n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{air} + (n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{EGR} + (n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} + n_{NO_2} + n_{CH_4} + n_{NMHC} + n_{He} + n_{PM})_{EGR}}$$

$$= \frac{(n_{CO_2})_{air}}{(n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{air} + (n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{EGR} + (n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} + n_{NO_2} + n_{CH_4} + n_{NMHC} + n_{He} + n_{PM})_{EGR}} +$$

$$\frac{(n_{CO_2})_{EGR}}{(n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{air} + (n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{EGR} + (n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} + n_{NO_2} + n_{CH_4} + n_{NMHC} + n_{He} + n_{PM})_{EGR}}$$

Elaborando il denominatore del primo addendo:

$$(n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{air} + (n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{EGR} + (n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} + n_{NO_2} + n_{CH_4} + n_{NMHC} + n_{He} + n_{PM})_{EGR} =$$

$$= (n_{O_2})_{air} B \left( \frac{1}{B} + \frac{A}{B} + 1 + \frac{D}{B} \right) + (n_{CO_2})_{EGR} \left( \frac{e}{a} + \frac{f}{a} + 1 + \frac{i}{a} \right) + (n_{CO_2})_{EGR} \left( \frac{b}{a} + \frac{c}{a} + \frac{g}{a} + \frac{g'}{a} + \frac{h}{a} + \frac{h'}{a} + \frac{q}{a} + \frac{p}{a} \right) =$$

Poiché  $(n_{CO_2})_{air} = (n_{O_2})_{air} B$ :

$$= (n_{CO_2})_{air} \left[ \left( \frac{1}{B} + \frac{A}{B} + 1 + \frac{D}{B} \right) + \frac{(n_{CO_2})_{EGR}}{B(n_{O_2})_{air}} \left( \frac{e}{a} + \frac{f}{a} + 1 + \frac{i}{a} \right) + \frac{(n_{CO_2})_{EGR}}{B(n_{O_2})_{air}} \left( \frac{b}{a} + \frac{c}{a} + \frac{g}{a} + \frac{g'}{a} + \frac{h}{a} + \frac{h'}{a} + \frac{q}{a} + \frac{p}{a} \right) \right]$$

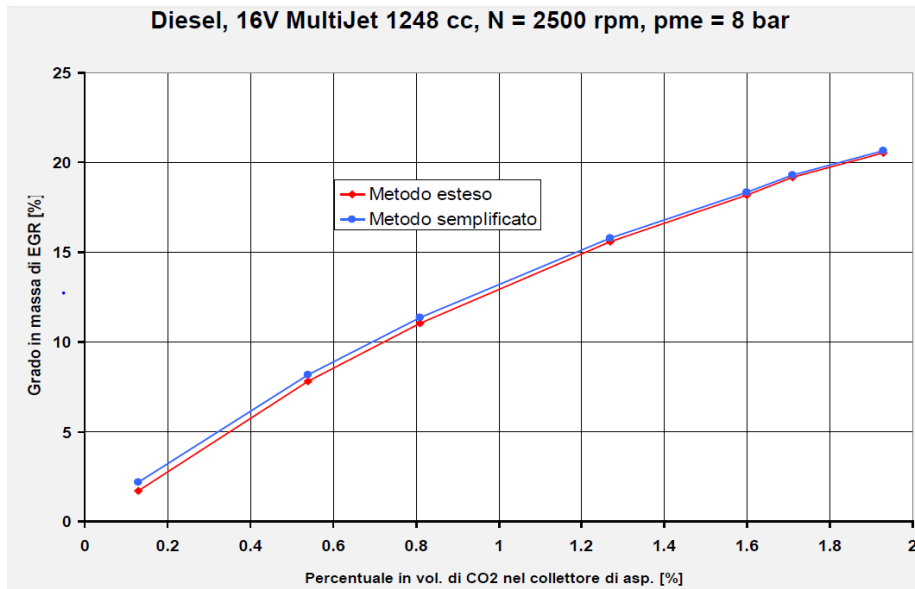
Elaborando il denominatore del secondo addendo:

$$(n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{air} + (n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{Ar})_{EGR} + (n_{CO} + n_{H_2} + n_{NO} + n_{NO_2} + n_{CH_4} + n_{NMHC} + n_{He} + n_{PM})_{EGR} =$$

$$= (n_{O_2})_{air} B(1 + A + B + D) + (n_{CO_2})_{EGR} \left( \frac{e}{a} + \frac{f}{a} + 1 + \frac{i}{a} \right) + (n_{CO_2})_{EGR} \left( \frac{b}{a} + \frac{c}{a} + \frac{g}{a} + \frac{g'}{a} + \frac{h}{a} + \frac{h'}{a} + \frac{q}{a} + \frac{p}{a} \right) =$$

$$= (n_{CO_2})_{EGR} \left[ \frac{(n_{O_2})_{air}}{(n_{CO_2})_{EGR}} (1 + A + B + D) + \left( \frac{e}{a} + \frac{f}{a} + 1 + \frac{i}{a} \right) + \left( \frac{b}{a} + \frac{c}{a} + \frac{g}{a} + \frac{g'}{a} + \frac{h}{a} + \frac{h'}{a} + \frac{q}{a} + \frac{p}{a} \right) \right]$$

### Confronto tra Metodo Semplificato e Metodo Esteso



Per un basso grado di EGR la deviazione % tra i due metodi è importante; Man mano che aumentiamo il grado di EGR la differenza tra i due metodi si riduce.



### - Analizzatori per la misura delle emissioni inquinanti gassose

NDIR (Non-Dispersive Infrared Detector) -  $CO$ ,  $CO_2$

FID (Flame Ionization Detector) –  $HC$

CLD (ChemiLuminescence Detector) -  $NO$ ,  $NO_x$

Paramagnetici -  $O_2$

#### NDIR (Non-Dispersive Infrared Detector) - $CO$ , $CO_2$

##### Principio di funzionamento:

Un gas esposto a radiazioni infrarosse assorbe solo quelle di una particolare lunghezza d'onda, legata alle caratteristiche della propria struttura atomica.

##### Schema di funzionamento:

Una **sorgente di raggi infrarossi** invia le sue radiazioni alle **due celle di misura C e D** che contengono gas del tipo di quello da rilevare ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $HC$ , ...).

Nota: misuriamo anche la  $CO_2$ , anche se non è un inquinante primario, in quanto promotrice dell'effetto serra è inoltre poiché la sua produzione è collegabile al consumo di combustibile (quindi rappresenta un parametro per valutare l'efficienza di un motore).

Tali celle sono divise dalla **membrana M** che costituisce una delle due **armature di un condensatore elettrico**.

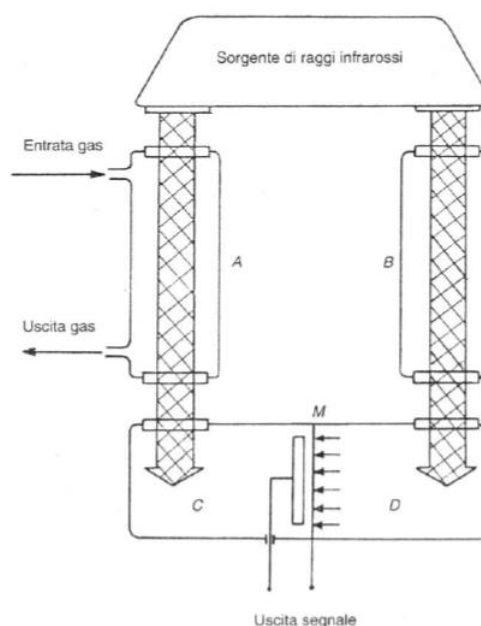
Le due celle di misura C e D sono termostattizzate, affinché la temperatura delle pareti sia costante.

Tra la sorgente e le celle di misura sono interposti **due volumi cilindrici** con basi trasparenti ai raggi infrarossi.

Il volume B è riempito di **Azoto (o aria pura)** e viene usato come cella di riferimento, mentre il volume A è attraversato dal **gas campione** da analizzare. Il gas che riempie il volume B è definito **totalmente trasparente alla radiazione infrarossa**: per la propria struttura atomica è in grado di non assorbire energia dalla radiazione.

Se nella cella A non è presente il componente da rilevare, il gas contenuto nelle celle di misura C e D assorbe la stessa quantità di energia: si ha un **uguale aumento di temperatura e di pressione** e la membrana M sottoposta a due forze uguali e opposte non si muove.

Se nella cella A è presente il componente da rilevare, esso **assorbe una quantità di energia proporzionale alla sua concentrazione**. Quindi la cella di misura C riceve una quantità di radiazioni infrarosse minori rispetto alla cella di misura D, perciò in quest'ultima **vi sarà un maggiore innalzamento di pressione** (in quanto l'energia che passa dai volumi A e B ai volumi C e D, si traduce in un innalzamento di temperatura del gas. La variazione maggiore avviene nella cella D). Si determina uno **spostamento della membrana M (verso la cella C)** che viene convertito in **segnale elettrico** proporzionale alla concentrazione del componente da analizzare (se cambia la distanza tra le armature di un condensatore cambia anche la tensione in uscita).

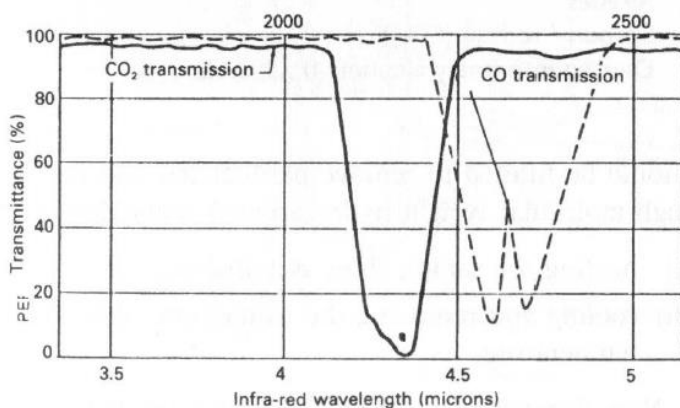


### 1) Interferenze tra diversi gas:

Preview: Aggiungiamo una cella filtro.

Prendendo in esame il monossido di carbonio ( $CO$ ): un primo problema è rappresentato dal fatto che nella porzione di gas esaminato potrebbe esserci gas di natura diversa da  $CO$ , per esempio  $CO_2$ , che, se non viene rimosso, comporta un errore sulla misura di  $CO$ ; un secondo problema è rappresentato dal fatto che il gas che rimosciamo, ovvero la  $CO_2$ , è un altro gas di cui vogliamo far l'analisi.

Quello che vogliamo fare è **discriminare l'assorbimento**: vogliamo capire se la variazione di temperatura nella cella di misura  $C$  sia totalmente legata all'assorbimento di energia da parte di  $CO$ .



La figura mostra gli spettri di assorbimento di monossido di carbonio ( $CO$ ) e biossido di carbonio ( $CO_2$ ). Si può notare che nella regione dei **4.4 microns**, la radiazione infrarossa è assorbita sia dal biossido di carbonio sia dal monossido di carbonio.

Sull'asse delle ordinate: **trasmissione** (è pari all'inverso dell'assorbimento di energia);

Sull'asse delle ascisse: **lunghezza d'onda**.

Per minimizzare questo effetto è possibile utilizzare un **filtro che contiene una concentrazione elevata del gas di interferenza che in questo caso è la  $CO_2$** . Il valore di zero dell'analizzatore viene tarato con il filtro contenente il gas di interferenza (si parla di misura "per azzeramento"). Ogni ulteriore interferenza dovuta alla presenza di questo gas nel campione sarà piccola se confrontata con l'effetto dell'elevata concentrazione nel filtro.

### 2) Segnale pulsante di output dello strumento NDIR:

Un altro problema è rappresentato dal fatto che **il segnale di tensione in uscita potrebbe essere molto basso**. Dobbiamo dunque amplificare in qualche modo il segnale. Tuttavia bisogna tener presente che **l'amplificazione del segnale comporta anche l'amplificazione degli eventuali errori nella catena di misura o dei disturbi durante la misurazione stessa**.

Cerchiamo di passare da un **segnale di V** in uscita dallo strumento **continua** a un segnale di **tensione alternata**:

Tra la sorgente infrarossa e le celle viene interposto un dispositivo chiamato "**chopper**". Questo consiste in un **disco con delle scanalature che viene fatto ruotare a velocità angolare costante**. Quando una scanalatura si trova in corrispondenza del raggio questo potrà raggiungere le celle e verrà rilevato un segnale in uscita. Quando la parte piena del disco impedisce alla radiazione di raggiungere le celle la membrana ritorna nella sua posizione di partenza e non si avrà nessun segnale in uscita. **Siccome il chopper alternativamente blocca e lascia passare la radiazione si otterrà una fluttuazione della membrana ( $f \sim 4 \div 10 [Hz]$ ) e una variazione ciclica del segnale capacitivo**. In tal modo è possibile **trasformare un segnale elettrico DC in un segnale AC**. **Gli amplificatori AC sono più adatti a realizzare elevate amplificazioni del segnale**.

**Calibrazione dello strumento:**

Ipotizzando che tutte le cariche elettriche vengano raccolte dall'elettrodo, per un idrocarburo  $C_nH_m$  la corrente misurata dallo strumento è espressa da:

$$I = r[C_nH_m]Q = \alpha n[C_nH_m]Q$$

$Q$ : portata in volume del campione di gas che attraversa il sensore;

$[C_nH_m]$ : concentrazione molare dell'idrocarburo;

$r = \alpha n$ : coefficiente di risposta del FID ( $\alpha$  tabellato in funzione della specie di idrocarburo considerato)

Se manteniamo costanti  $\alpha$  e  $Q$  possiamo dire che effettivamente il valore di intensità di corrente ( $I$ ) cresce **linearmente** con il crescere della concentrazione di idrocarburo, quindi del **numero di atomi di Carbonio ( $n$ )**.

$\alpha$  purtroppo non è sempre un valore costante.

Gli studi condotti hanno dimostrato che, per quanto riguarda gli **alcani**, **ciclo-alcani**, **alchini** e **aromatici**, la risposta del FID è sostanzialmente proporzionale al numero di atomi di C presenti nel composto in esame (quindi  $\alpha$  è **costante** / varia di poco). Fanno eccezione gli **idrocarburi ossigenati (alcoli)** per i quali  $\alpha$  **varia tra 0.23 ÷ 0.68**.

| Molecola                | Risposta FID (normalizzata rispetto al propano) |
|-------------------------|---|
| Alcani                  | 0.97-1.05                                       |
| Aromatici               | 0.97-1.12                                       |
| Alchini                 | 0.99-1.03                                       |
| Alcheni                 | 1.07  |
| Ossigeno (negli alcoli) | 0.23-0.68                                       |

L'influenza dell'ossigeno sulla risposta del FID viene ridotta in modo significativo utilizzando come combustibile una miscela di **elio** e idrogeno (solitamente **60% He e 40%  $H_2$** ).

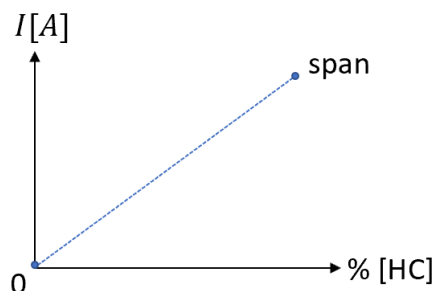
Inoltre, è opportuno usare un **gas di calibrazione** con **tenore di ossigeno** molto prossimo a quello del campione che si intende analizzare.

Ad esempio, per l'analisi dei gas di scarico in applicazioni automobilistiche, la calibrazione del fondo scala dello strumento viene effettuata con miscele di propano in azoto, mentre per l'analisi dei cosiddetti "unburned gas" tale calibrazione si realizza con **miscele di propano in aria**.

Per citare un altro esempio, la normativa SAE J215.JUN88 (che si applica alla determinazione mediante FID "a caldo" della concentrazione degli idrocarburi nei gas grezzi di scarico da motori Diesel in condizioni di funzionamento stazionarie) prescrive l'effettuazione di calibrazioni successive con miscela di propano in aria: 100%  $N_2$ , 95%  $N_2 - 5\% O_2$ , 90%  $N_2 - 10\% O_2$ . Sulla base di tali calibrazioni viene determinato un fattore di correzione, funzione del tenore di ossigeno nel campione da analizzare, da applicare alla lettura dello strumento.

Per la **misura dello zero** utilizziamo **aria pura** (entra da destra, vedi figura). Per la **misura di span** facciamo entrare **propano  $C_3H_8$** . Quindi inizialmente i valori sono normalizzati rispetto al propano; successivamente:

$$[ppm]C_3H_8 \rightarrow [ppm]CH_4 = 3 \cdot [ppm]C_3H_8.$$



**CLD (ChemiLuminescence Detector) -  $NO, NO_x$  [ ↓ LEZIONE 26: 29/11/19] Dott. Ing. Claudio Maino****Principio di funzionamento:**

La **chemiluminescenza** è il fenomeno/processo di emissione di **fotoni** durante una reazione chimica.

Quando il monossido di azoto ( $NO$ ) reagisce con ozono ( $O_3$ ) dà origine a una molecola di  $NO_2$  eccitata elettronicamente ( $NO_2^*$ ), che ritorna allo stato normale emettendo una **radiazione luminosa (fotoni con una certa  $\lambda$ )**. L'analizzatore, partendo dal **conteggio dei fotoni rilasciati** dallo stato eccitato, aventi una ben precisa lunghezza d'onda, risale alla **quantità di molecole di  $NO$** , presenti nel gas di scarico, prodotte dal motore preso in esame.

Le reazioni chimiche che rappresentano questo processo sono:

- 1)  $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
- 2)  $NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2$
- 3)  $NO_2^* \rightarrow NO_2 + \text{fotone } (\lambda = 0.6 \div 3[\mu m])$
- 4)  $NO_2^* + M \rightarrow NO_2 + M^*$

L'asterisco \* denota una molecola in uno stato elettromagnetico eccitato.

1) 2) la molecola  $NO_2$  potrà avere tutti gli elettroni disposti secondo la propria struttura atomica oppure potrà avere un **elettrone promosso a un orbitale con potenziale maggiore** (molecola eccitata elettromagneticamente).

3) Per poter tornare allo stato normale, la molecola  $NO_2^*$  rilascia un fotone a una certa lunghezza d'onda.

4) Problema: all'interno della camera di misura (analizzatore) potrebbero esserci **molecole di altre specie ( $M$ )**. Potrebbe allora succedere che alcune molecole  $NO_2^*$  entrino in collisione con le molecole  $M$  passandone il proprio stato di eccitazione  $M \rightarrow M^*$ . Anche  $M^*$  cercherà di tornare allo stato normale emettendo quindi un fotone con lunghezza diversa rispetto a quella della reazione (3). Per ridurre questo inconveniente è opportuno operare con un notevole eccesso di ozono  $O_3$ . Inoltre cerchiamo di ridurre al minimo la concentrazione di molecole diverse da ossido di azoto e ozono all'interno della camera di reazione.

**All'aumentare della temperatura ( $T$ )** alla quale avviene la reazione chimica **aumenta anche la quantità di  $NO_2^*$  prodotta rispetto a quella di  $NO_2$** . La ripetibilità del processo, e in particolare la proporzione tra  $NO_2$  e  $NO_2^*$  prodotti, si mantiene se la temperatura è mantenuta costante. Da  $NO_2^*$  potremo risalire attraverso il rilascio di fotoni, letti da un opportuno strumento, a quanti  $NO$  sono stati generati da parte del motore esaminato.

$$\text{Per } T = 25 [^{\circ}C]: \frac{NO_2^*}{NO_2} = 10\% = 0.1; \frac{NO_2^*}{NO_2} \text{ aumenta di } \sim 1\%/[^{\circ}C]$$

Per esempio:

$$3 \text{ fotoni rilevati } (\lambda = 0.6 \div 3[\mu m]) \rightarrow NO_2^* = 3$$

$$\text{Per } T = T_0 \text{ nota } (\sim 45 [^{\circ}C]): \frac{NO_2^*}{NO_2} = 0.3$$

$$NO_2 = \frac{NO_2^*}{0.3} = \frac{3}{0.3} = 10$$

$$NO = NO_2^* + NO_2 = 3 + 10 = 13$$

### Controllo della strumentazione:

- Tramite la pompa a vuoto cerchiamo di **ridurre al minimo  $M$** .
- È importante **controllare che l'ozonizzatore** funzioni in maniera corretta in quanto, altrimenti, se si riducesse la sua efficienza, commetteremmo un errore di valutazione: introdurremmo meno ozono ( $O_3$ ) di quello che pensiamo. Non è importante tanto il fatto che l'efficienza, con il crescere delle prove effettuate, si riduca ma piuttosto il suo controllo onde evitare errori di valutazione (introdurre meno ozono di quel che pensiamo).
- Il **convertitore catalitico**, come l'ozonizzatore, va **controllato accuratamente** in quanto potrebbe perdere le proprietà di catalisi. Dunque, effettuiamo delle prove per **controllare che l'efficienza di conversione** sia nota e costante durante un'analisi.
- È buona norma (non necessario) per la ripetibilità delle misure effettuare una **regolazione della portata in ingresso al sistema** (per evitare di avere portate diverse durante le prove e di non riuscire effettivamente a confrontare i risultati di un segnale piuttosto che un altro per via delle portate diverse).

### Intensità della luce emessa:

$$I \propto \frac{[NO][O_3]}{M}$$

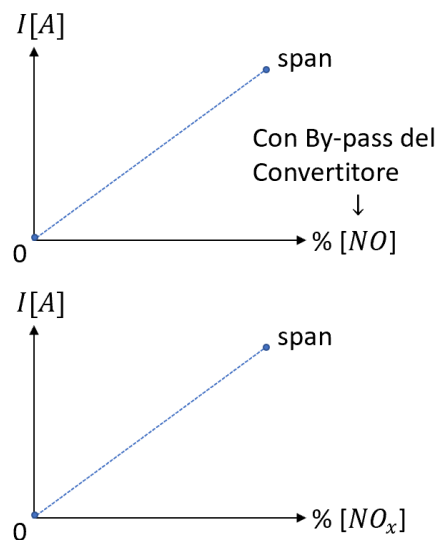
### Calibrazione dello strumento:

L'intensità della radiazione luminosa che leggiamo in uscita dallo strumento deve essere calibrata: vogliamo che il livello di intensità luminosa sia ripetibile nel tempo. L'intensità luminosa cresce all'incirca con le concentrazioni di  $[NO]$  e  $[O_3]$ .

Se garantiamo una costante portata in ingresso, **se garantiamo l'efficienza dell'ozonizzatore, se garantiamo l'efficienza di conversazione catalitica**, allora possiamo dire che questa caratteristica dello strumento sarà pressoché **lineare**. Quindi non abbiamo bisogno di misure intermedie ma abbiamo bisogno solo delle misure di zero e di span (come per il FID).

Per calibrare **lo zero** facciamo passare all'interno dello strumento **azoto o aria pura** (siamo certi che non reagiranno con lo ozono  $O_3$ ). Per la calibrazione del **fondo scala** facciamo passare all'interno dello strumento una **miscela di azoto, e un quantitativo noto ed elevato di  $NO$  e  $NO_2$** .

Generalmente la misura di  $NO_x$  viene effettuata **su base secca**. Sono però possibili anche misure su **base umida**.

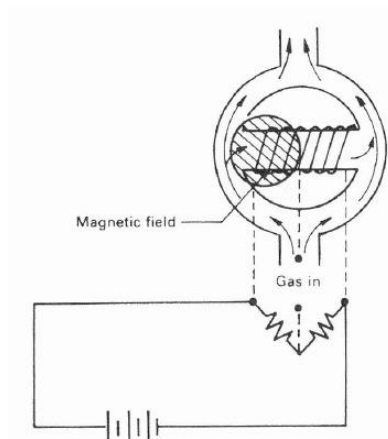


## B) Analizzatori termomagnetici

### Principio e schema di funzionamento:

Esiste un effetto termico che permette di risalire alla concentrazione di ossigeno presente nel gas di scarico ricircolato nell'analizzatore.

La strumentazione consiste di un **anello** all'interno del quale viene fatta passare la portata di gas da analizzare con un **elemento trasversale (ponte di Wheatstone)** sul quale è avvolto un **solenioide**. Prima dell'inizio della prova energizziamo il solenoide e misuriamo la **temperatura del filamento**. Quando introduciamo il gas una parte si muove verso sinistra e una parte verso destra. Nel ramo di sinistra, in prossimità del tubo trasversale, una porzione del flusso, e quindi dell'ossigeno, viene magnetizzata nel verso del campo magnetico generato dal solenoide e quindi passerà attraverso il tubo. **Il gas tende a raffreddare il filamento** tanto più quanto maggiore è la quantità che devia verso il tubo per via del campo elettromagnetico.



Conoscendo la temperatura iniziale, comparandola alla nuova temperatura misurata troviamo una correlazione con il tenore di ossigeno presente nel gas: la variazione di temperatura può provocare all'interno di questo sistema **una variazione di resistenza** che genera il così detto **sbilanciamento del ponte di Wheatstone**.

Questi analizzatori di tipo termomagnetico possono presentare i seguenti problemi:

- La temperatura del filamento deve essere mantenuta costante; il filamento riscaldato è influenzato dai cambiamenti di trasporto dei gas che costituiscono il campione.
- Il tubo trasversale deve essere montato orizzontalmente per evitare interferenze dovute alla convezione naturale.
- **Idrocarburi e altri gas combustibili** possono reagire in prossimità del filamento, causando cambiamenti di temperatura sul filamento stesso. Tra le molecole con **proprietà paramagnetiche** troviamo gli **ossidi di azoto** (il monossido di azoto ha il 44.2% di suscettibilità magnetica dell'ossigeno, mentre il biossido di azoto ne ha il 28.7%:  $\rightarrow$  *interferenza NO* = 0.442[NO]; *interferenza NO<sub>2</sub>* = 0.287[NO<sub>2</sub>]). **Invece gli ossidi di carbonio hanno proprietà diamagnetiche** ( $\rightarrow$  *interferenza CO* = -0.00354[CO]; *interferenza CO<sub>2</sub>* = -0.00623[CO<sub>2</sub>]).

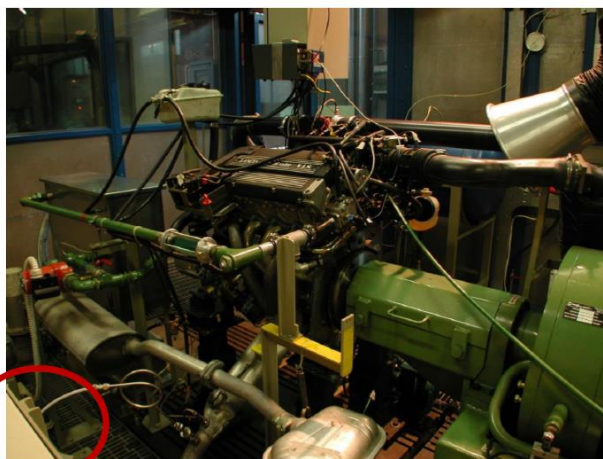
Per approfondimenti: consultare le normative SAE (SAE J254 Aug84).

**Interpretazione personale:** anche in questa configurazione siamo alla ricerca di una condizione di equilibrio, in questo caso in termini di temperatura e quindi di resistenza del filamento. Quando l'ossigeno passa attraverso il tubo orizzontale raffredda il filamento; per ristabilire la temperatura iniziale aumentiamo la corrente elettrica. La lettura dell'aumento dell'intensità di corrente elettrica, necessaria per riportare e mantenere il filamento alla temperatura iniziale, rappresenta il parametro che ci permette di valutare la concentrazione di ossigeno.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

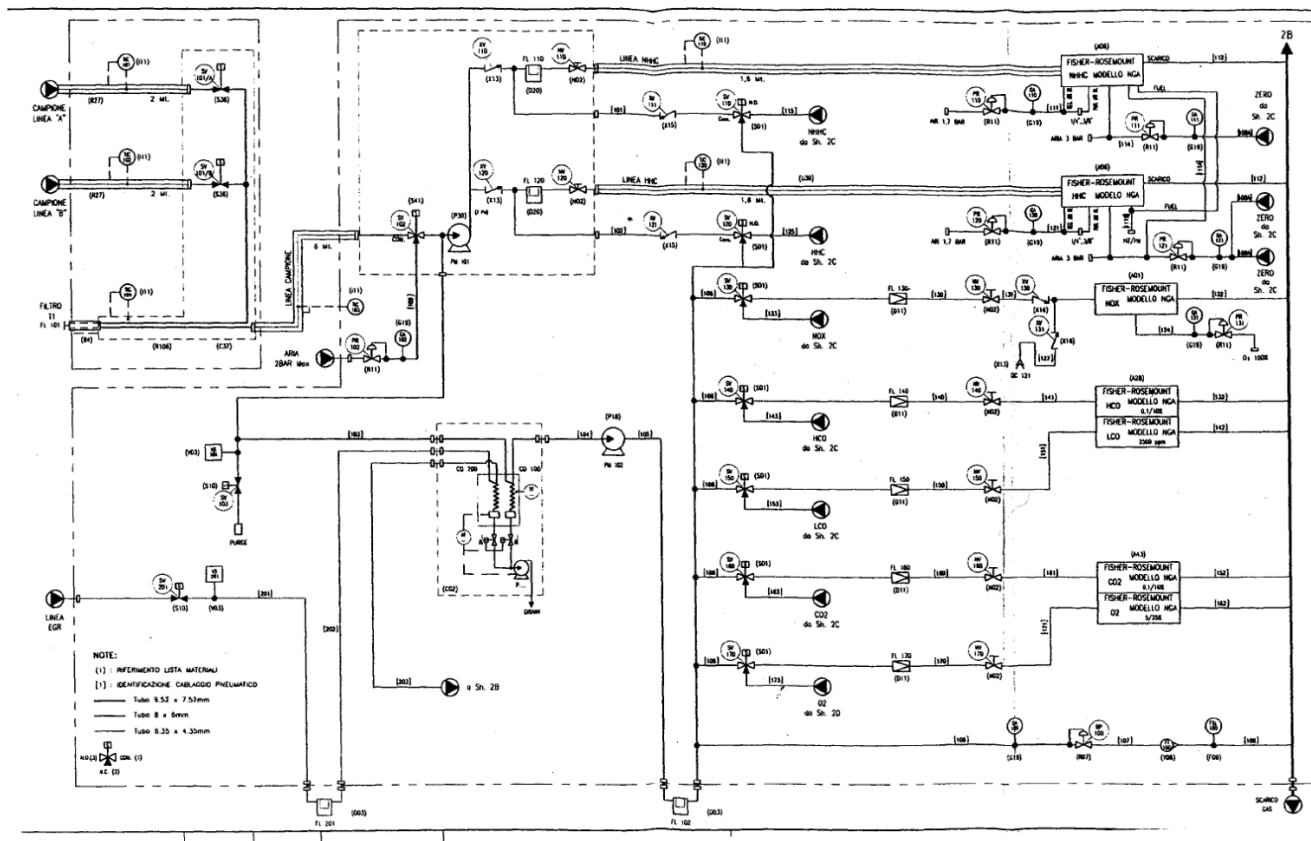
Pre-filtro



Il tubo di uscita dal motore (metallico) è raccordato con un secondo tubo che porterà il gas all'armadio degli analizzatori. Questo secondo tubo è coibentato in modo tale da garantire un certo valore di temperatura prima di passare all'interno di un pre-filtro (detto pre- in quanto precede gli analizzatori).

[Domanda (16) per il Prof.: a cosa serve questo pre-filtro?] [Probabilmente per il PM]

Analizziamo l'impianto pneumatico e idraulico dell'impianto di misurazione:



### **4.3 Stima delle emissioni in massa nei gas di scarico diluiti**

- Introduzione
- Diluizione dei gas di scarico del veicolo
- Sistema di prelievo CVS

#### Specifiche

#### Prelievo da sacchi

- CVS: calcolo delle emissioni in massa da gas di scarico diluiti
- Analisi modale dei gas diluiti
- Analisi modale dei gas grezzi
- Limiti del Sistema CVS
- Sistemi di diluizione con DF costante

#### - **Introduzione** [ ↓ LEZIONE 27: 04/12/19 ]

I limiti di emissioni per le autovetture sono espressi in [g/km]. Si raccolgono le emissioni prodotte durante un ciclo guida; vengono convertite da concentrazioni in volume in livelli di concentrazione in massa e infine vengono normalizzate rispetto alla distanza percorsa lungo il ciclo normativo.

Le analisi in diluito dei gas di scarico possono essere divise in due tipologie:

**“Bag analysis”**: i gas combusti (emessi durante un ciclo guida standardizzato) vengono diluiti con aria ambiente e raccolti in appositi sacchi. Successivamente si procede all’analisi degli inquinanti raccolti.

La normativa prevede, tra le varie prove di omologazione, questa prova in cui il veicolo viene disposto sul banco a rulli a percorrere un ciclo guida ben definito (WLTP) per quantificarne le emissioni prodotte. La normativa prevede che le emissioni, prima della misura, vengano raccolte in dei sacchi per essere certi che tutto quello che il veicolo emette durante il ciclo guida venga analizzato. Quindi non facciamo un prelievo parziale in tempo reale ma un prelievo di una porzione di ciò che viene emesso dal veicolo che così viene inviato in opportuni sacchi. Al termine della prova analizziamo i sacchi, in modo da essere certi che nei sacchi vi sia tutto ciò che è stato emesso. Nei sacchi non raccogliamo i gas grezzi ma i gas diluiti. (“Bag analysis”)

**“Modal analysis”**: prevede la misura in continuo delle emissioni allo scarico del motore durante determinate condizioni di funzionamento del motore o “modi” (minimo, accelerazione, decelerazione, velocità di crociera). Per valutazioni di progetto può risultare conveniente, invece di fare un’analisi complessiva, fare un’analisi di una porzione del ciclo. Sono previsti almeno due tipi di analisi modale:

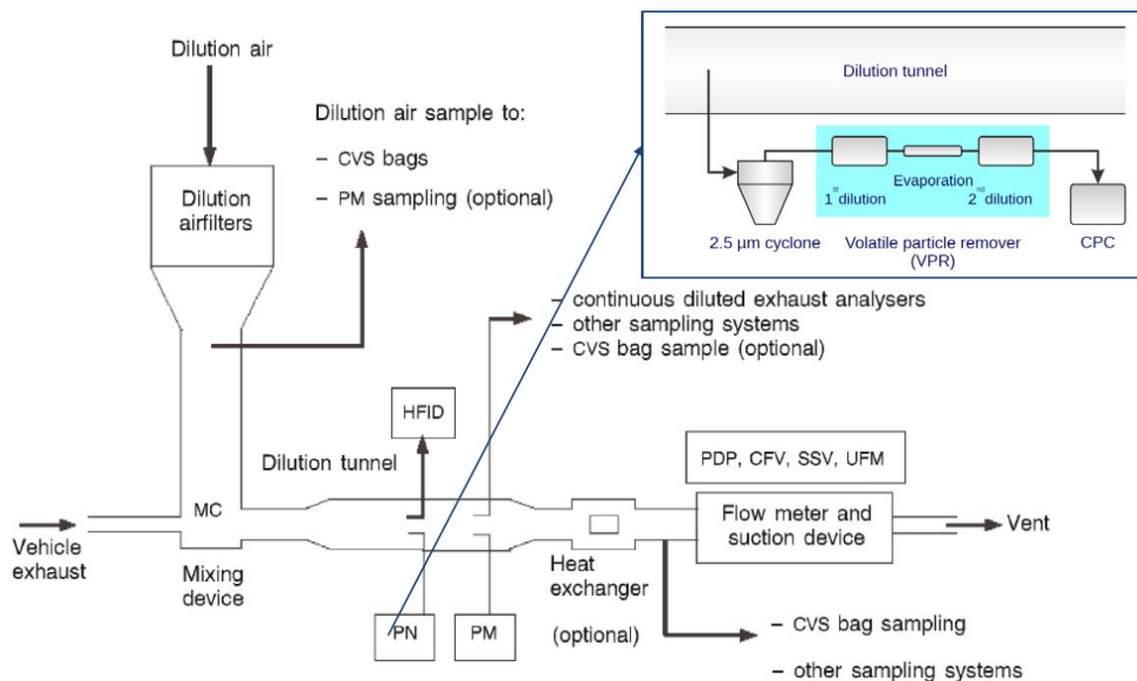
- Analisi continua delle emissioni dei gas di scarico diluiti;
- Analisi continua delle emissioni dei gas di scarico grezzi (non diluiti) usando la tecnica della “CO<sub>2</sub> tracer”.

Per fissare le idee, faremo riferimento alle procedure di prova previste per l’omologazione delle autovetture (Commission Regulation EU 2018/1832 del 5 Novembre 2018). Il veicolo da testare viene posizionato con le ruote motrici sui rulli di un banco dinamometrico in grado di simulare le resistenze al rotolamento e quelle aerodinamiche. Il necessario raffreddamento del motore è fornito da un ventilatore posizionato in prossimità del veicolo.

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

emessi dalla vettura, non è costante nel tempo: ha un valor medio che possiamo determinare ma, localmente, istante per istante questo rapporto di diluizione può cambiare. Quindi, **per scongiurare il pericolo di condensa del vapor d'acqua**, dobbiamo far attenzione a scegliere un opportuno valor medio del rapporto di diluizione, in modo tale che il valor minimo di questo rapporto non determini la condensa dell'acqua. Vedremo dei **rapporti di diluizione medi che potrebbero sembrare elevati** rispetto a quello che servirebbe, dovuti al fatto che dobbiamo tener conto che della sua **fluttuazione tra un valor minimo e un valor massimo per compensare gli effetti delle decelerazioni e accelerazioni**.

Nel caso in cui è richiesta anche la misura di PM, il gas di scarico passano prima nel tunnel di diluizione dove avviene il prelievo per l'analisi del particolato:



In caso di vettura a benzina PFI non viene richiesta né la misura della massa di particolato né la misura del numero di particelle; quindi il tunnel di diluizione viene by-passato.

### Specifiche [non da sapere per all'esame]

**Il tubo di raccordo tra l'uscita (o le uscite) di scarico del veicolo e della camera di miscela (M) deve essere corto** quanto possibile; **in ogni caso esso non deve:**

- **Modificare la pressione statica all'uscita (o alle uscite) di scarico** del veicolo di prova di **oltre  $\pm 0.75$  [kPa] a 50 [km/h]** oppure di **oltre  $\pm 1.25$  [kPa]** su tutta la durata della prova, **rispetto alle pressioni statiche registrate quando nessun elemento è raccordato alle uscite di scarico del veicolo**. La pressione deve essere misurata nel tubo di uscita dello scarico oppure in una prolunga che abbia lo stesso diametro, nelle immediate vicinanze del tubo;
- **Modificare o cambiare la natura dei gas di scarico**.

Deve essere predisposta una **camera di miscela** nella quale i gas di scarico del veicolo e l'aria di diluizione siano mescolati in modo da formare una **miscela omogenea al punto di uscita della camera**. **L'omogeneità della miscela in una sezione trasversale qualsiasi a livello della sonda di prelievo non deve discostarsi di oltre  $\pm 2\%$  dal valore medio ottenuto in cinque punti** almeno situati a intervalli regolari sul diametro della vena di gas. **La pressione all'interno della camera di miscela non deve discostarsi di oltre  $\pm 0.25$  [kPa] dalla pressione atmosferica** per ridurre al minimo gli effetti sulle condizioni all'uscita di scarico e per limitare il calo di pressione nell'apparecchio di condizionamento dell'aria di diluizione, ove esista.

Il dispositivo di aspirazione e misurazione del volume deve garantire un afflusso sufficiente ad impedire la condensa dell'acqua. Si ottiene in genere questo risultato mantenendo nel sacco di prelievo dei gas di scarico diluiti una concentrazione di  $CO_2$  inferiore a 3 % in volume per funzionamento con benzina e gasolio (2.2% per il GPL; 1.5% per il gas naturale).

Il campione dei gas di scarico diluiti viene prelevato a monte del dispositivo di aspirazione, ma a valle degli apparecchi di condizionamento (se presenti).

Il flusso non deve discostarsi dalla media di oltre  $\pm 2\%$ . Il flusso del prelievo deve essere al minimo pari a 5 [litri/minuto] e al massimo allo 0.2% del flusso dei gas di scarico diluiti.

Si effettua un prelievo di aria di diluizione a un flusso costante (paragonabile a quello utilizzato per i gas di scarico diluiti), in prossimità della presa di aria ambiente (a valle dell'eventuale filtro). L'aria non deve essere contaminata dai gas di scarico provenienti dalla zona di miscela.

I campioni di gas saranno raccolti dentro sacchi di prelievo di capacità sufficiente per non ridurre il flusso del prelievo stesso. Detti sacchi saranno costituiti di un materiale tale da non modificare la concentrazione di gas inquinanti di sintesi di oltre  $\pm 2\%$  dopo 20 [minuti] (per esempio: pellicole composite di polietilene-poliammide o di poli-idrocarburi fluorati).

**Il prelievo dei campioni di particolato (e di HC per i motori ad accensione per compressione) avviene in un tunnel di diluizione.**

**Per ridurre la caduta termica dei gas di scarico nel tratto dal terminale di scarico sino all'entrata del tunnel di diluizione, il condotto utilizzato può essere lungo al massimo 3.6 [m] (6.1 [m] se isolato termicamente) ed il suo diametro interno non deve superare 105 [mm].**

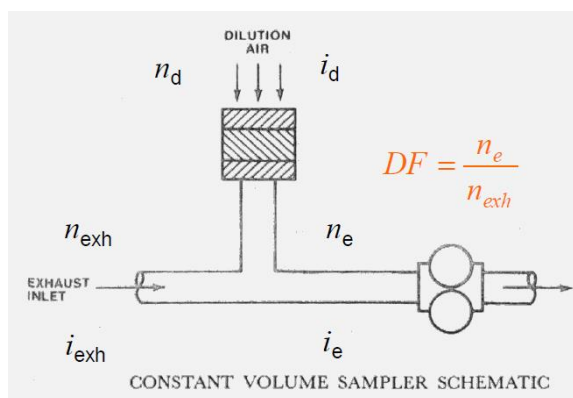
Il tunnel è un tubo rettilineo di materiale conduttore, in cui devono regnare **condizioni di flusso turbolento ( $Re \geq 4000$ )** di modo che i **gas di scarico diluiti risultino omogenei nei punti di prelievo** e sia garantito un prelievo di campioni rappresentativi dei gas e del PM. **Il diametro del tunnel deve essere  $\geq 200$  [mm].**

L'apparecchiatura di prelievo del PM è costituita da una sonda disposta nel tunnel e da due filtri disposti in serie. La sonda deve essere montata in prossimità della linea mediana del tunnel, ad una distanza dall'ingresso dei gas di scarico pari a circa 10 diametri del tunnel.

**Prelievo da sacchi [non da sapere per all'esame]**

- La valvola V12 è usata per inviare il campione o l'aria di lavaggio negli strumenti.
- I filtri F1 e F2 rimuovono il particolato dal campione prima dell'analisi.
- Le pompe P1 e P2 muovono il campione attraverso il sistema. Le pompe dovrebbero avere delle camere in acciaio inossidabile o alluminio con diaframmi e valvole fatte o ricoperte di materiale inerte come Teflon.
- Le valvole a spillo N1, N4, N7, N11 regolano la portata di gas campione agli analizzatori.
- Le valvole a spillo N2, N5, N8, N12 regolano la portata di gas di span agli analizzatori.
- Le valvole a spillo N3, N6, N9, N13, N15 regolano la portata di gas di zero agli analizzatori.
- I misuratori di portata FL1, FL2, FL3, FL4 indicano agli analizzatori la portata di gas di zero, di span e di campione.
- Il frigorifero T1 rimuove l'acqua dal campione e la valvola N14 permette di scaricare l'acqua raccolta.
- Le colonne opzionali (SAE J1094) di condizionamento del campione CR1 e CR2 contengono ascarite per rimuovere CO<sub>2</sub> dalla corrente di analisi della CO. Le colonne opzionali WR1 e WR2 contengono CaSO<sub>4</sub> o silica gel per rimuovere la rimanente quantità di acqua. L'ascarite infatti produce acqua quando rimuove la CO<sub>2</sub> dalla corrente. La SAE J1094 raccomanda comunque l'impiego di analizzatori CO con influenza trascurabile interferenza CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e fornisce un'espressione semi-empirica per correggere l'eventuale effetto. La CONSLEG 1970L0220 (1.5.2004) prescrive che nessun dispositivo di essiccazione del gas deve essere usato a monte degli analizzatori (a meno che non sia dimostrato che ciò non influisca sul tenore in sostanze inquinanti del flusso di gas).
- La valvola opzionale V9 è usata per inviare il gas di span della CO<sub>2</sub> attraverso una colonna d'acqua W1 per verificare le prestazioni del sistema di essiccazione e assorbimento (CR e WR) e per verificare l'interferenza di H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> per l'analizzatore di CO.

**- CVS: calcolo delle emissioni in massa da gas di scarico diluiti**



- i: concentrazione del generico inquinante;
- n: numero di moli;
- exh: gas di scarico del motore;
- d: aria di diluizione;
- e: gas di scarico diluiti.

I gas di scarico entrano nel sistema CVS, si mescolano con dell'aria di diluizione e successivamente vengono raccolti nei sacchi. Quando la raccolta nei sacchi è finita è il momento dell'analisi da parte degli analizzatori.

Viene misurata la concentrazione del generico inquinante nei gas diluiti ( $i_e$ ). Un primo problema è rappresentato dal fatto che a noi, in realtà, interessa la concentrazione del generico inquinante nei gas grezzi ( $i_{exh}$ ), per cui dobbiamo risalire alla concentrazione originale. Un secondo problema è rappresentato dal fatto che quando risaliamo alla concentrazione nei gas grezzi, questa è una concentrazione in volume, mentre le normative pongono dei limiti in termini di massa di inquinante al chilometro.

$$i_e = \frac{n_{i,e}}{n_e}; i_d = \frac{n_{i,d}}{n_d}; i_{exh} = \frac{n_{i,exh}}{n_{exh}}$$

$$n_{i,e} = n_{i,exh} + n_{i,d}$$

$$n_{i,exh} = n_{i,e} - n_{i,d} = i_e n_e - i_d n_d = i_e n_e - i_d (n_e - n_{exh}) = n_e (i_e - i_d) + i_d n_{exh}$$

Dunque:

$$DF = \frac{13.4}{CO_{2,e} + (HC_e + CO_e) \cdot 10^{-4}} \quad \text{Benzina/Gasolio}$$

13.4: concentrazione in Volume di  $CO_2$  nei gas grezzi  
 $CO_{2,e}$ : concentrazione in Volume di  $CO_2$  nei gas diluiti

$(HC_e + CO_e) \cdot 10^{-4}$ : termini aggiuntivi: per tenere conto che la combustione non è completa: non tutto il carbonio diventa  $CO_2$ ; in parte diventa  $HC$  e in parte  $CO$ ; dobbiamo tenerne conto per stimare il DF.  
 Gli analizzatori di inquinanti misurano  $HC$  e  $CO$  in [ppm], mentre la  $CO_2$  è espressa come una %: quindi la somma  $HC_e + CO_e$  viene moltiplicata per  $10^{-4}$ .

$$DF = \frac{11.9}{CO_{2,e} + (HC_e + CO_e) \cdot 10^{-4}} \quad \text{GPL}$$

$$DF = \frac{9.5}{CO_{2,e} + (HC_e + CO_e) \cdot 10^{-4}} \quad \text{Gas naturale}$$

$$DF = \frac{12.3}{CO_{2,e} + (HC_e + CO_e) \cdot 10^{-4}} \quad \text{Etanolo}$$

Per approfondimenti sul calcolo di DF consultare la normativa SAE Paper No. 980678.

### Correzione delle emissioni $NO_x$ :

Quando misuriamo le concentrazioni degli ossidi di azoto  $NO_x$  dobbiamo ricordarci che le equazioni vanno corrette in funzione dell'umidità ambiente applicando la seguente formula:

$$NO_{x,exh} = k_H \left[ NO_{x,e} - NO_{x,d} \left( 1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \quad \text{Con:}$$

$$k_H = \frac{1}{1 - 0.0329(H - 10.71)}$$

$$H = \frac{6.211 \cdot R_a \cdot p_d}{p_B - p_d \cdot R_a \cdot 10^{-2}}$$

$H$  [ $g_{acqua}/kg_{aria\ secca}$ ]: umidità assoluta dell'aria ambiente;  
 $R_a$  [%]: umidità relativa dell'aria ambiente;  
 $p_d$  [kPa]: pressione di vapore saturo alla T ambiente;  
 $p_B$  [kPa]: pressione atmosferica nella camera di prova.

In definitiva otteniamo che:

$$m_i [g/km] = \frac{m_{i,exh}}{d} = \frac{\rho_{i,p} [g/dm^3] V_{mix} [dm^3] k_H [i_e [ppm] - i_d [ppm] \left( 1 - \frac{1}{DF} \right)] \cdot 10^{-6}}{d [km]}$$

$k_H$ : fattore di correzione umidità; solo per  $i = NO_x$ ;

$d$ : distanza effettiva corrispondente al ciclo guida;

$$\rho_{CO,p} = \frac{28 \cdot 101.33 \cdot 10^3}{8314.3 \cdot 273.2} = 1.249 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 1.249 \left[ \frac{g}{dm^3} \right] \approx 1.25 \left[ \frac{g}{dm^3} \right], \text{ poichè: } \rho_{i,p} = \frac{M_i p_p}{\bar{R} T_p} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{NOx,p} = \frac{46 \cdot 101.33 \cdot 10^3}{8314.3 \cdot 273.2} = 2.052 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 2.052 \left[ \frac{g}{dm^3} \right] \approx 2.05 \left[ \frac{g}{dm^3} \right]$$

$$\rho_{HC,p} = 0.619 \left[ \frac{g}{dm^3} \right] \quad \text{Benzina/Gasolio}$$

$$\rho_{HC,p} = 0.649 \left[ \frac{g}{dm^3} \right] \quad \text{GPL}$$

$$\rho_{HC,p} = 0.714 \left[ \frac{g}{dm^3} \right] \quad \text{Gas naturale}$$



**- Analisi modale dei gas diluiti**

È possibile modificare la procedura trattata (analisi integrale) per fare un'analisi modale.

Per “modo di funzionamento” si intende qualunque condizione operativa del motore, come minimo, accelerazione, decelerazione e velocità di crociera. Ogni “modo” può durare parecchi minuti così come solo un secondo. **A ogni “modo” corrisponderà un sacco diverso.**

Tale analisi, se applicata per esempio a un ciclo guida, consente di misurare il livello di emissioni in una determinata porzione del ciclo.

**Le emissioni ottenute durante ciascuna porzione del ciclo, se sommate, devono corrispondere all'emissione calcolata complessivamente mediante la “bag analysis”.**

$$m_i[\text{g/modo}] = \rho_{i,p}[\text{g/dm}^3] V_{mix}[\text{dm}^3/\text{modo}] k_H \left[ i_e[\text{ppm}] - i_d[\text{ppm}] \left( 1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \cdot 10^{-6}$$

$k_H$ : fattore di correzione umidità; solo per  $i = NO_x$ ;

$V_{mix}$ : si riferisce questa volta solo al modo di funzionamento considerato.

La misura in continuo delle concentrazioni degli inquinanti nell'aria di diluizione richiede però un **secondo treno di analizzatori dedicato**. Si può allora misurare le concentrazioni di inquinanti nell'aria di diluizione all'inizio del test ed alla fine, assumendo che durante la prova ciascuna concentrazione **vari linearmente**. In alternativa, si può ricorrere alla misura di tali concentrazioni in un campione medio dell'aria di diluizione, raccolto durante la prova.

**- Analisi modale dei gas grezzi [non da sapere per all'esame]**

L'analisi modale si può fare per i gas grezzi.

Questo sistema si basa sulla misura in continuo delle concentrazioni di  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$  nei gas di scarico non diluiti e della concentrazione di  $CO_2$  nei gas di scarico diluiti.

Le concentrazioni di  $CO_2$  nel campione non diluito ( $CO_{2,exh}$ ), in quello diluito ( $CO_{2,e}$ ), e nell'aria ambiente ( $CO_{2,background}$ ) sono usate per calcolare il fattore di diluizione che, in aggiunta al volume totale ( $V_{mix}$ ), permette di valutare il volume di gas combustibili ( $V_{und}$ ).

$$m_i[\text{g/modo}] = \rho_{i,p}[\text{g/dm}^3] V_{und}[\text{dm}^3/\text{modo}] k_H i_e[\text{ppm}] \cdot 10^{-6}$$

$$DR = \frac{CO_{2,exh} - CO_{2,background}}{CO_{2,e} - CO_{2,background}} \approx \frac{CO_{2,exh}}{CO_{2,e} - CO_{2,background}}$$

$$DR = \frac{V_{mix}}{V_{und}} \rightarrow V_{und} = \frac{V_{mix}}{DR}$$

Gli analizzatori usati per l'analisi in continuo dei gas “grezzi” richiedono una **sensibilità circa 10 volte inferiore a quella richiesta per gli analizzatori** dei campioni provenienti dai sacchi. L'analizzatore per la misura della  $CO_2$  nei gas combustibili diluiti può essere modificato sostituendo la cella di riferimento con una seconda cella nella quale durante il campionamento passa l'aria di diluizione. Questa caratteristica permette di correggere direttamente la misura della  $CO_2$  nei gas diluiti della quantità di  $CO_2$  presente nell'aria di diluizione.

## 5. HEVs: Hybrid Electric Vehicles

### 5.1 Veicoli Ibridi ed HEV

### 5.2 Ottimizzazione delle Strategie di Controllo degli HEV

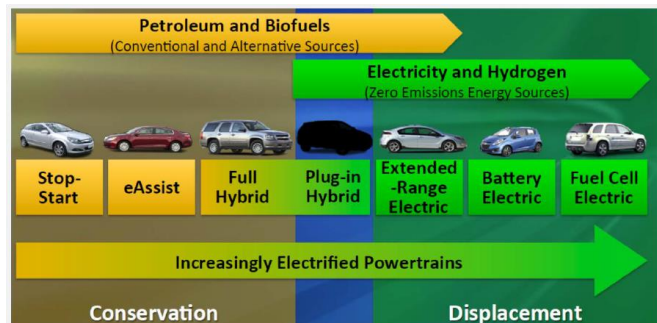
#### 5.1 Veicoli Ibridi ed HEV

- Introduzione sui veicoli Ibridi
- HEV
- HEV: Serie
- HEV: Parallelo
- Elettrificazione ausiliare, BAS, FAS
- HEV Complessi
- Esempi dell'impatto della ibridazione sul Fuel Consumption (FC) e sulle emissioni
- Confronto: funzioni dell'ibrido / percezione del cliente
- **Introduzione sui veicoli Ibridi [ ↓ LEZIONE 28: 04/12/19 ]**

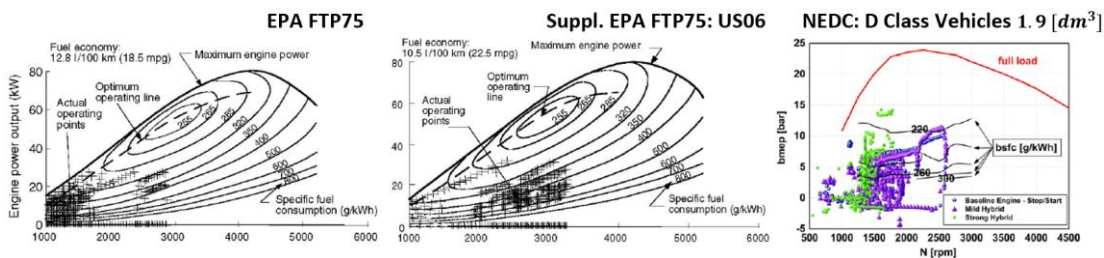
Non esiste una “formula magica” che risolva tutti i problemi analizzati nel primo capitolo. Ci sono tante soluzioni diverse, tra cui quella rappresentata dal veicolo ibrido. Le diverse soluzioni tecnologiche non competono tra loro ma piuttosto sono sinergiche: si combinano per ottenere lo stesso risultato.

Nella visione attuale si può pensare a una sostituzione sempre più crescente di veicoli tradizionali con veicoli elettrici; **più che una sostituzione si tratta di un affiancamento; i veicoli ibridi rappresentano un buon compromesso.**

Un ibrido è un sistema di propulsione che monta a bordo **due sorgenti diverse di potenza**: può prendere potenza non solo dal motore termico ma anche da un powertrain elettrico.



Esaminiamo le mappe motore (iso-rendimento = iso-consumo specifico):



Nei primi due grafici sono riportati i punti motore di un motore a benzina.

**FTP75: (Federal Test Procedure)** Ciclo guida utilizzato in Nord America per l'omologazione dei veicoli.

**FTP75: US06:** Ciclo suppletivo guida, caratterizzato da **condizioni di guida un po' più aggressive**, utilizzato in Nord America per l'omologazione dei veicoli.

Nel terzo grafico sono riportati i punti motore di un motore installato su un veicolo di classe D che percorre il vecchio ciclo omologativo europeo NEDC.

I **punti di funzionamento motore (x)** sono tutti concentrati in aree piuttosto **lontane dalla curva di full load e anche lontane rispetto alla curva di massimo rendimento** (minimo consumo specifico) (linea tratteggiata: OOL: Optimum Operating Line). **Un motore convenzionale, per via delle normative, ha un consumo maggiore di quello che potremmo aspettarci quando calcoliamo il consumo minimo che potremmo raggiungere.**

**- HEV**

Definizione:

**HEV: Hybrid Electric Vehicle:** motore elettrico + motore termico. Il motore termico sfrutta l'energia chimica del combustibile mentre la macchina elettrica sfrutta l'energia della batteria. Se l'ibrido utilizza come unica fonte di energia il serbatoio a bordo, e quindi la batteria elettrica non può essere ricaricata esternamente, si parla di ibrido HEV normale.

**HEV Plug-in:** è un ibrido con **due sorgenti di energia**: oltre che all'utilizzo del serbatoio abbiamo la possibilità di ricaricare la batteria **esternamente dalla rete**.

**Nota:** è più facile ibridizzare veicoli di **grande taglia** principalmente per un discorso di **costi e mercato**. Chi è intenzionato a spendere di più allora potrebbe essere più propenso a spendere un po' di più per questa soluzione innovativa piuttosto che chi ha bisogno di un veicolo piccolo, funzionante, a basso costo (lo sbalzo di costo per un secondo powertrain, se la vettura è piccola, si fa sentire maggiormente sul costo totale).

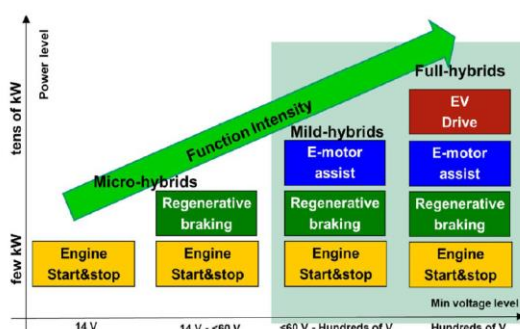
**Tipici componenti** di un ibrido elettrico (HEV):

- Motore termico (ne consegue quindi un ATS: After Treatment System)
- Serbatoio
- Macchina elettrica (almeno una)
- Pacco batterie
- Trasmissione

**Tipiche funzioni** di un ibrido elettrico (HEV):

- 1) **Frenata rigenerativa:** Quando il veicolo sta frenando, la sua energia cinetica può essere recuperata da un generatore e immagazzinata a bordo.
- 2) **Idling reduction:** a seconda del dimensionamento della fonte di alimentazione secondaria, il motore può essere spento agli arresti e alle condizioni di velocità più basse (ad esempio, **meno di 15[ mph]**);
- 3) **Miglioramento dell'efficienza ICE:** la fonte di alimentazione secondaria assiste l'ICE, impedendole di funzionare in condizioni inefficienti (ad esempio a regimi motore molto alti o molto bassi), vale a dire **far funzionare l'ICE più vicino alla sua migliore efficienza**;
- 4) **ICE Downsizing / Downspeeding:** grazie all'assistenza della fonte di alimentazione secondaria, è possibile scegliere un ICE più piccolo o un'unità finale "più lunga" senza compromettere le prestazioni;
- + **Motore beltless:** più efficiente;
- 5) **Eliminare o mitigare le perdite di "innesto"** non innestando il motore fino a quando le velocità sono abbinate e non richiedono alcuno slittamento;
- 6) **Rapporto di trasm. in continuo cambiamento** (EVT come Toyota Prius, Ford Escape, GM 2- mode ...);
- 7) **Alimentazione ausiliaria / accessori gestita elettricamente**;
- 8) **Maggiore controllo sul punto di funzionamento e sui transitori del motore:** Ciò ha un impatto diretto sulle **emissioni** (quasi statiche e transitorie) e sulla **guidabilità**. Facciamo lavorare il **termico in condizioni più stazionarie** e utilizziamo **l'elettrico per gestire i transitori**.

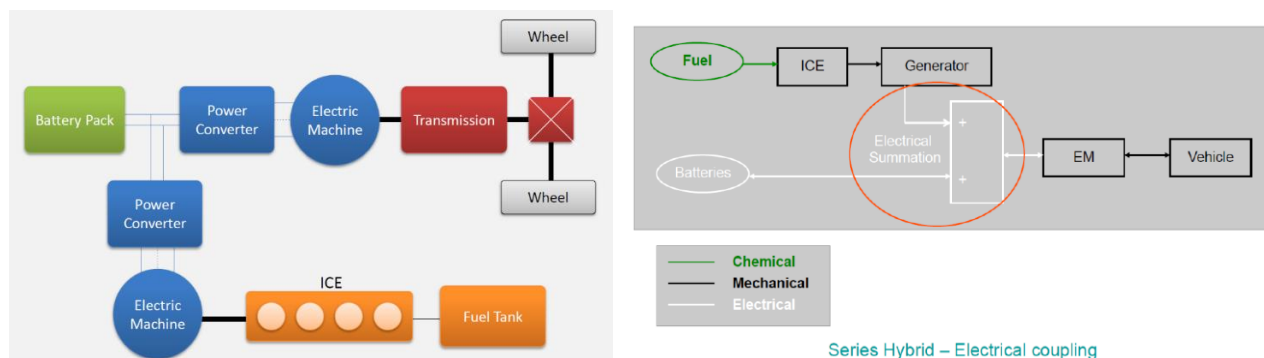
Un ibrido elettrico può realizzare tutte o solo alcune di queste funzioni. Più funzioni ha -> ibrido full; meno ne realizza -> ibrido mild, micro.



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

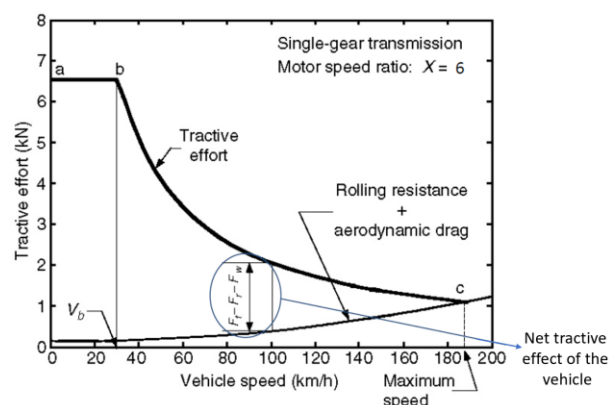
- HEV: Serie

Schema a blocchi:



- 1) La macchina elettrica funziona come **generatore**: invece di (/oltre che) collegare la batteria alla presa, viene acceso il motore termico che ricarica la batteria.
- 2) **Il motore termico non è meccanicamente collegato alle ruote; quindi non fornirà mai potenza meccanica**: tutta la dinamica del veicolo è gestita dalla macchina elettrica di trazione (quella che precede la trasmissione).
- 3) **Quindi il motore ICE ha una funzione energetica e serve per allungare l'autonomia (Range Extender)**.
- 4) Questa soluzione può essere conveniente per **piccoli veicoli che non richiedono ricariche rapide**, quindi **molta potenza**, in modo tale che il motore termico possa avere dimensioni contenute.
- 5) Questa configurazione è detta **"Serie"** per via della **somma di energia a livello elettrico**.
- 6) Dimensioniamo le prestazioni del veicolo guardando **solo al motore elettrico**.
- 7) Abbiamo bisogno di un **sistema di controllo**.
- 8) Soprattutto dobbiamo stabilire le **taglie dei vari componenti (grado di ibridazione)**:

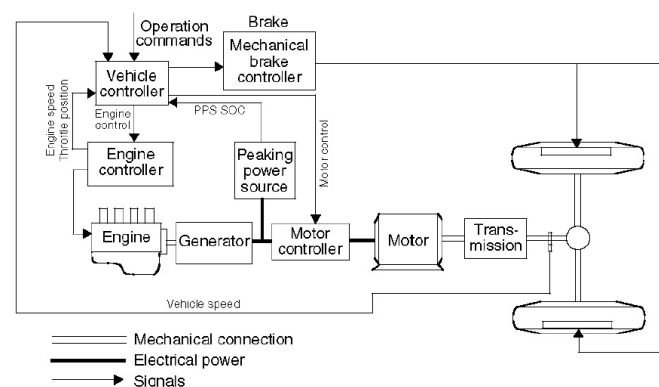
Diagramma di funzionamento del motore elettrico:

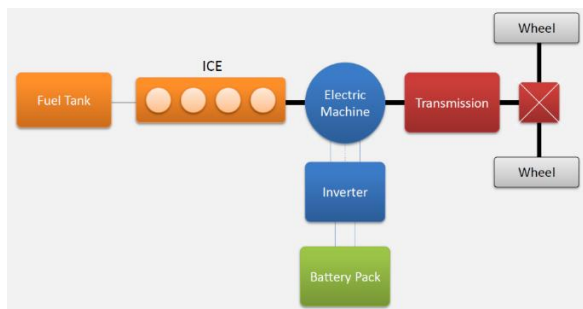


La differenza tra le due curve, in funzione della velocità, determina l'**accelerazione** del veicolo.

**Vantaggio**: non abbiamo bisogno di marce (sufficiente un cambio con una o due marce): **la caratteristica di coppia della macchina elettrica è già favorevole alla trazione**.

Sistema di controllo:



**- HEV: Parallelo [ ↓ LEZIONE 29: 06/12/19 ]****Schema a blocchi:**

(Schema a blocchi ≠ layout)

- 1) La **macchina termica e la macchina elettrica sono collegate meccanicamente, e meccanicamente sono collegate alle ruote**: entrambi possono fornire potenza alle ruote e le loro potenze si sommano.
- 2) Un ibrido Parallelo è un abilitatore del **Downsizing** (monta un ICE più piccolo rispetto al motore montato su una vettura tradizionale per realizzare la stessa potenza) e del **Downspeeding** (sfruttando la caratteristica di trazione più favorevole alla macchina elettrica possiamo far in modo che l'ICE possa montare delle marce più lunghe senza penalizzare le prestazioni del veicolo) del motore ICE:  
A parità di potenza del powertrain possiamo mettere un motore termico più piccolo (Downsizing). Inoltre il motore elettrico ha una caratteristica di coppia più favorevole alla trazione: può aiutare il termico dove ha più problemi; si può pensare di fare i rapporti più lunghi al cambio (Downspeeding) oppure addirittura di pensare a un esclusivo funzionamento in elettrico a basse velocità e attivare il termico quando necessario. Il Downsizing e il Downspeeding sono due abilitatori dell'**aumento dell'efficienza del powertrain**.
- 3) In questo caso è più il **motore elettrico che dà una mano al termico** rendendolo anche più efficiente.
- 4) Rispetto all'ibrido Serie c'è il **risparmio di una macchina elettrica**.
- 5) La **macchina elettrica** funziona da **motore** quando è richiesta trazione; in frenata, invece, si comporta da **generatore** (quindi è più appropriato chiamarla macchina elettrica piuttosto che motore elettrico); non è richiesto un generatore aggiuntivo.
- 6) Negli HEV serie l'energia prodotta dal motore termico, prima di arrivare alle ruote, subisce una **doppia conversione dell'energia: meccanica -> elettrica -> meccanica**; negli HEV parallelo questo passaggio non è sempre necessario: quando accendiamo il termico c'è modo di trasferire la sua energia direttamente alle ruote; poi ci sono modi di funzionamento in cui accendiamo l'ICE per ricaricare la batteria e allora, in tal caso, paghiamo la doppia conversione energetica.
- 7) **Svantaggio rispetto agli HEV serie**: in un architettura parallela è più complessa la **strategia di controllo**; in funzione della richiesta di potenza alle ruote possiamo decidere di far funzionare l'HEV **solo con l'ICE** oppure **solo con l'elettrico** oppure si può prevedere un **power split**. La **strategia di controllo deve rispondere a esigenze locali** (in termini di scelta di funzionamento sulla base della richiesta di trazione, power split non power split) e **globali** (deve tener conto di alcuni aspetti quali per esempio offrire la possibilità di funzionare in modalità elettrica nei centri cittadini; dunque con esigenza globale si intende la necessità di prestare attenzione alla **missione in generale; V2V: Vehicle to Vehicle; V2I: Vehicle to Infrastructure**); Inoltre l'ICE può avere **due funzioni allo stesso tempo**: fornire potenza alle ruote e ricaricare le batterie (ulteriore complicanza per il controllo);
- 8) La configurazione sopra riportata non è l'unica possibile; ci possono essere architetture diverse di HEV parallelo -> **Classificazione degli HEV Parallelo**.



## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Il **limite** di questa configurazione consiste nel fatto che il collegamento è realizzato mediante una **cinghia**: la cinghia ha dei **limiti nel trasferimento della potenza** sia quando la macchina elettrica funziona da generatore che quando funziona come motore. La cinghia impone un limite sulla massima coppia rigenerabile in frenata e nella fase di trazione affinché non slitti. La macchina elettrica non può superare una certa taglia altrimenti non riusciremmo a gestirla con la cinghia. Questo ha delle conseguenze pratiche sulla progettazione della cinghia: dovendo trasmettere coppia in un senso e nell'altro, il **tensionamento** deve essere gestito in maniera completamente diversa rispetto a quello per un powertrain convenzionale. **Se caricassimo la cinghia in entrambe i versi aumenteremmo le frizioni perdendo efficienza; quindi ricorriamo all'utilizzo di uno "smart tensioner"** che cambia la tensione in funzione di come dev'essere distribuita la coppia.

La configurazione Non Coassiale è interessante dal punto di vista del costruttore perché **non chiede di rivoluzionare il layout del motore termico**.

**HEV parallelo - Single Shaft - Coassiale**: la macchina elettrica (motore / generatore) è installata sullo albero al quale è collegato l'ICE, tra l'ICE e la trasmissione. Passiamo a questa configurazione **per ovviare al problema rappresentato dal giro cinghia**. Questa configurazione è anche detta **FAS, Flywheel Alternator Starter** (la macchina elettrica sembra un **volano elettrificato**).

Il **limite** di questa configurazione consiste nel fatto che la **macchina elettrica** deve fornire **tutta la coppia** necessaria **per avviare l'ICE** (il giro cinghia può comportarsi da moltiplicatore, dunque necessita di una macchina elettrica più piccola) -> avviamento diretto senza de-moltiplicazione. Tuttavia questo problema è stato superato grazie alla possibilità di fare un "avviamento per inerzia".

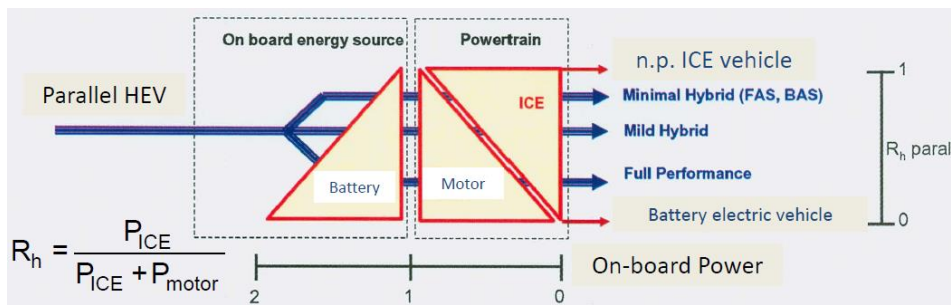
#### Considerazione sulle frizioni:

Considerando un **HEV parallelo - Single Shaft - non Coassiale**: supponiamo di togliere una delle due frizioni, quella di destra (B), più prossima all'ICE: dal punto di vista del cambio marcia funziona (basta la frizione (A) a valle); riusciamo ad **andare in puro elettrico** anche se ci trascineremmo dietro il termico con conseguenze sull'efficienza (da questo punto di vista sarebbe meglio aggiungere l'altra frizione(B)); se vogliamo fare una **frenata rigenerativa** abbiamo lo stesso problema di **trascinamento del termico**: **parte dell'energia cinetica non riusciamo a recuperarla in quanto usata per trascinare l'ICE**. Se invece supponiamo di togliere l'altra frizione (A), quella più prossima alle ruote, allora, riusciremmo a far il cambio marcia e non avremmo il problema del trascinamento del termico in caso di funzionamento in puro elettrico e frenata rigenerativa: **tuttavia, in caso di necessità, non riusciremmo a ricaricare le batteria con il termico a veicolo fermo**. Per cui, per poter avere tutte le funzionalità alla massima efficienza, il sistema necessita di entrambe le frizioni (per limitare i costi potremmo decidere di mettere solo una frizione e in tal caso, rinunceremmo a quella più prossima all'ICE **scegliremmo quella anteriore (A)**: questa scelta è dovuta anche al fatto che vogliamo **modificare il meno possibile** rispetto alla configurazione di partenza convenzionale in cui troviamo la frizione a valle del giro cinghia).

Considerando un **HEV parallelo - Single Shaft – Coassiale**: vale esattamente lo stesso discorso. **Se dobbiamo sceglierne una, scegliamo di mantenere quella più prossima alle ruote (A)**, anche perché in una configurazione convenzionale non troviamo una frizione tra il motore e il volano. **La configurazione a due frizione è decisamente migliore** per le ragioni esplicate precedentemente e per ulteriori considerazioni proprie dei **Single Shaft Coassiali**: immaginiamo di partire in puro elettrico: frizione anteriore (A) chiusa, posteriore (B) aperta; il veicolo raggiunge una certa velocità alla quale è ragionevole accendere il termico (per due motivi: la macchina elettrica non viene progettata per tutte le velocità inoltre perché **a una certa velocità il termico ha già una buona efficienza**): **se chiudiamo la seconda frizione (B) il termico si accende per inerzia; l'utente potrebbe risentirne gli effetti**; allora le due frizioni si possono combinare insieme per un innesto più fluido: la frizione a valle (A) si sgancia per effettuare un cambio marcia, intanto la posteriore (B) si chiude avviando il termico e infine si richiude anche la prima con la nuova marcia. Si tratta di un'architettura più complessa e più costosa.



**Grado di ibridazione di un HEV Parallelo:**



Per gli HEV Serie:

$$R_h = \frac{P_{ICE}}{P_{ICE} + P_{motor}} : \text{grado di ibridazione} \quad R_h = 0 : \text{veicolo puramente elettrico} \quad R_h = 1 : \text{veicolo con trasmissione elet. (caso limite)}$$

Per gli HEV Parallelo:

$$R_h = \frac{P_{ICE}}{P_{ICE} + P_{motor}} : \text{grado di ibridazione} \quad R_h = 0 : \text{veicolo puramente elettrico} \quad R_h = 1 : \text{normal funz. con l'ICE}$$

Nel caso di HEV Parallelo il powertrain è fatto dal termico e dall'elettrico. La somma delle potenze restituisce la potenza del powertrain. Sull'asse orizzontale troviamo la potenza a bordo, normalizzata rispetto alla potenza massima del powertrain (=1) (potenza massima dell'ICE + potenza massima dell'elettrico).

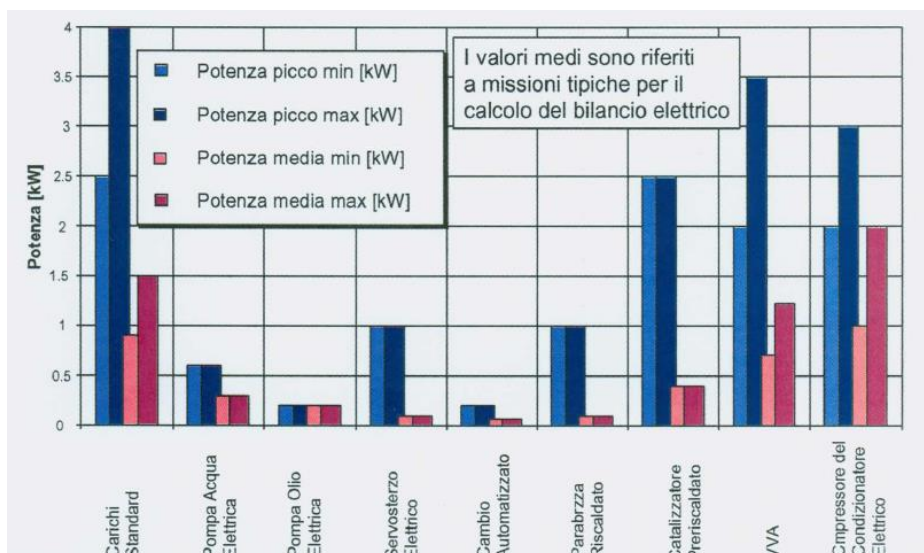
**Minimal Hybrid (FAS, BAS):** rappresenta il caso limite: solo ICE.

[Riduciamo progressivamente l'ICE andando ad aumentare la potenza della macchina elettrica, e quindi aggiungiamo la potenza della batteria]

**Mild Hybrid:** la potenza è ancora fornita principalmente dall'ICE.

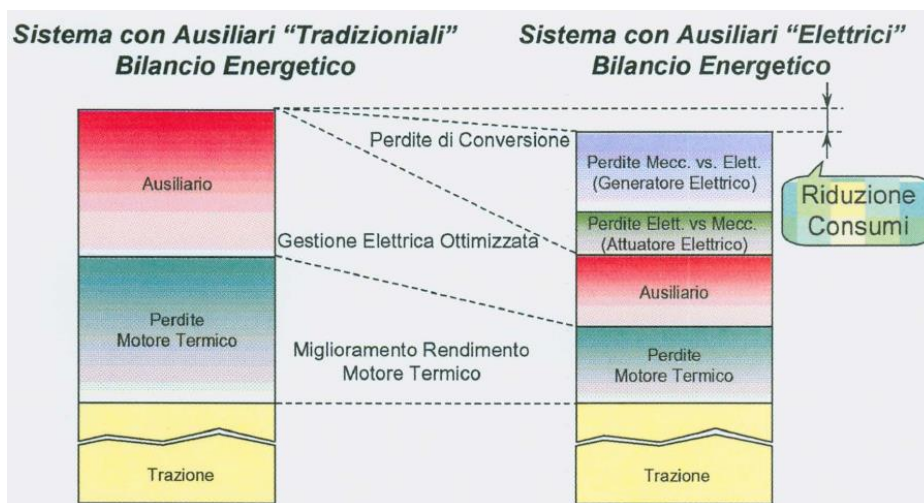
**Full Performance:** gran parte della potenza è fornita dalla macchina elettrica.

**Previsioni di richiesta di potenza – carichi elettrici più rilevanti:**



Già precedentemente all'introduzione dell'ibridazione era stata condotta un'analisi dei vari carichi; si era visto che i carichi degli ausiliari davano un contributo piuttosto rilevante. Dunque sono stati trovati dei sistemi elettrificati per cui tutti gli ausiliari diventavano di natura elettrica.

**Confronto e Bilancio Energetico tra Ausiliari "Tradizionali" e Ausiliari "Elettrici":**



Dobbiamo aggiungere le perdite del motore termico: nel caso tradizionale le perdite sono più alte rispetto al caso con ausiliari elettrificati poiché il motore comanda in modo inefficiente tutti gli ausiliari. L'ausiliario, nel caso tradizionale, assorbe più energia perché non è ottimizzato. A questo punto ci aspetteremmo che la differenza tra i bilanci sia tutta a vantaggio del sistema con ausiliari elettrici; invece, dobbiamo ricordarci delle perdite dovute alla doppia conversione dell'energia: meccanica -> elettrica -> meccanica. In conclusione otteniamo una riduzione dei consumi meno ingente del previsto.

Dunque, questi sistemi con ausiliari elettrici in passato sono stati testati, provati e introdotti ma non hanno trovato grande successo per via dei costi-benefici. Con l'introduzione dello Start and Stop, basso livello di ibridazione, si è ricorsi a questa soluzione. Successivamente, con l'ibridazione, la situazione diventa sempre più a favore del sistema con ausiliari elettrici, in quanto il sistema ibridizzato include di per sé tale sistema, per cui non può che rappresentare un ulteriore vantaggio dell'ibridazione (questa riduzione sui consumi energetici).

## - HEV Complessi

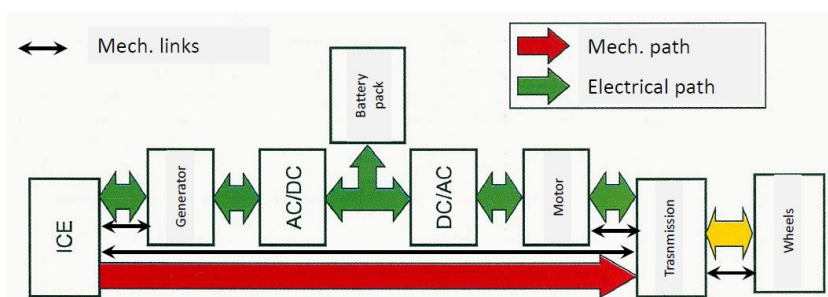
Un ibrido complesso può essere ottenuto (tre vie tecnologiche diverse):

- 1) Installando un maggior numero di macchine di trazione, elettriche/ICE;
- 2) Installando un maggior numero di sorgenti di energia e potenza (per il momento non si fa);
- 3) Mettendo insieme i concetti delle due configurazioni, serie e parallelo, in un'unica architettura del powertrain.

Le vie tecnologiche (1) e (3) sono tra loro in combinazione e rappresentano quelle più ricercate; i target sono: aumentare la penetrazione nel mercato dei veicoli ibridi; migliorare il consumo di carburante; abilitare ulteriori funzioni (trazione integrale; HVAC acceso quando ICE è spento; ...)

Una delle configurazioni più note, che occupa fette di mercato piuttosto importanti e che storicamente è stata una delle prime a essere state introdotte dal gruppo Toyota è un **ibrido complesso** che implementa allo stesso tempo un'architettura che può essere serie o parallelo o un misto delle due con un numero di macchine elettriche di trazione pari a due.

### Serie e parallelo dal punto di vista concettuale:



Un ICE è collegato alla trasmissione (freccia rossa: cammino termico);

(Manca il serbatoio dell'ICE nello schema);

Una macchina elettrica (motore) è collegata alla trasmissione (freccia verde: cammino elettrico);

I link meccanici sono rappresentati dalle frecce nere;

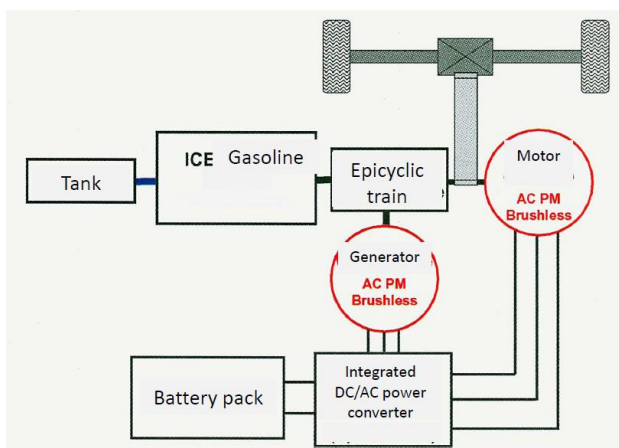
Se immaginiamo non esserci il generatore e l'AC/DC, lo schema rappresenta un HEV Parallelo;

Per poter lavorare anche in serie aggiungiamo il generatore e l'AC/DC (Power converter / inverter); in questa configurazione possiamo pensare di lavorare in serie o in parallelo a seconda della necessità: se vogliamo lavorare in serie scollegiamo l'ICE dalla trasmissione, così che la potenza dell'ICE venga tramutata interamente in elettrica dal generatore; se invece vogliamo lavorare in parallelo disabilitiamo il collegamento meccanico con il generatore tramite un'opportuna frizione.

Questa configurazione non è molto in uso ma è rappresentativa delle possibilità che abbiamo.

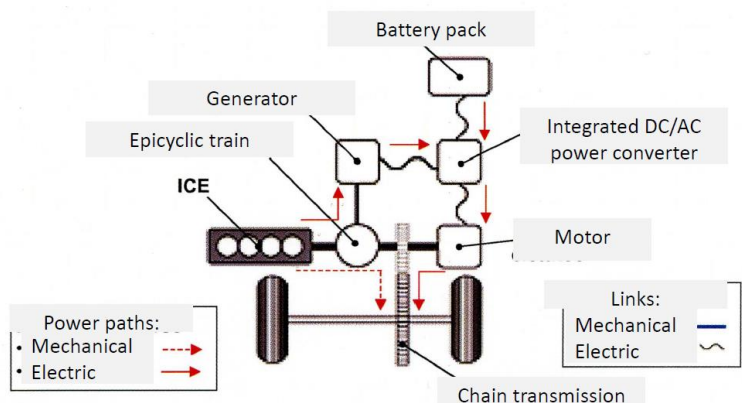
Una delle configurazioni più utilizzate è rappresentata da un **ibrido basato sul concetto di power split**.

**Toyota Prius - Schema a blocchi:**



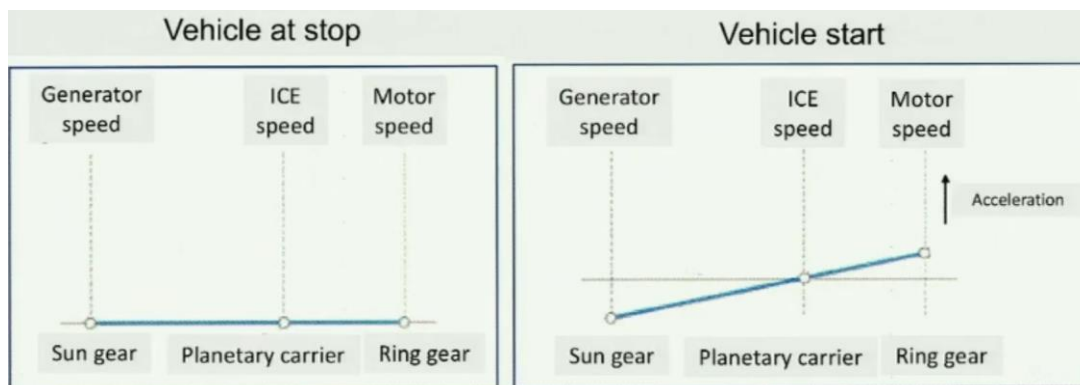
Abbiamo un **unico power converter integrato** che gestisce due macchine elettriche. Le tre macchine (termico + 2 elettriche) sono collegate tramite il componente (sommatoria meccanica) cuore del power split; **la Toyota realizza questa sommatoria meccanica tramite un rotismo epicicloidale**. Il collegamento con le ruote avviene a valle del rotismo epicicloidale: chi è collegato direttamente alle ruote è il motore elettrico; l'ICE e il generatore sono anch'essi collegati meccanicamente alle ruote ma prima di trasferire la loro potenza alle ruote devono passare attraverso il rotismo epicicloidale.

**Toyota Prius - Schema a blocchi: flussi energetici:**



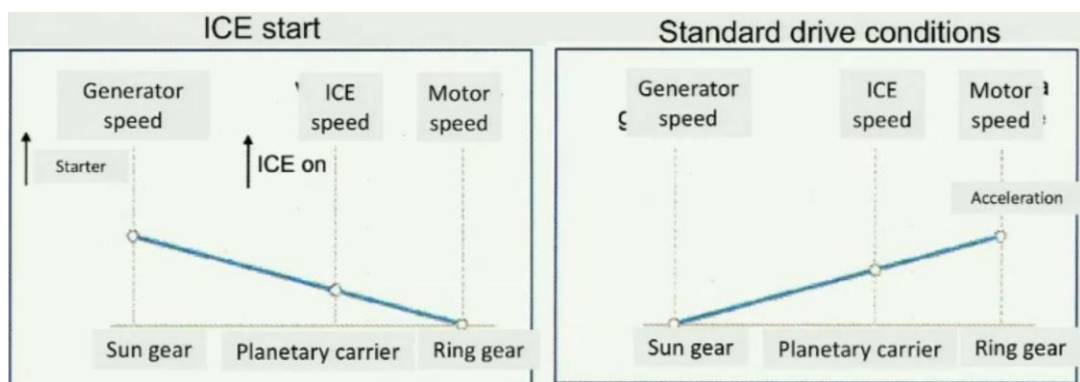
Il motore elettrico, l'ICE e il generatore possono fornire l'energia meccanica alle ruote tramite i collegamenti meccanici riportati nello schema; vediamo che, andando a selezionare opportunamente i componenti, è possibile, per esempio, far in modo che il flusso di energia, anziché seguire il flusso meccanico, segua il flusso elettrico: L'ICE può trasferire la sua potenza al generatore che la converte, tramite il power converter integrato, in energia elettrica a sua volta trasferita al motore elettrico che la ritrasforma in energia meccanica. Quindi anche in questo caso abbiamo un flusso serie e anche un flusso parallelo (oppure la somma dei due).

Analizziamo gli andamenti delle velocità  $\omega_{gen}, \omega_{ICE}, \omega_{mot}$ :



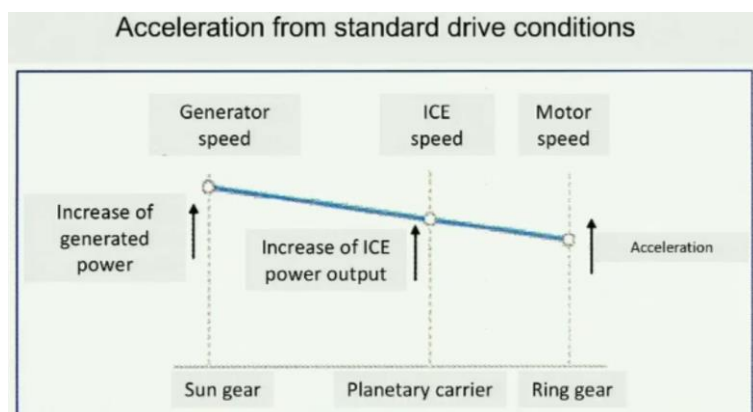
- Se il veicolo è fermo:  $\omega_{gen} = \omega_{ICE} = \omega_{mot} = 0$  (ci possono essere casi particolare in cui il termico è acceso per ricaricare le batterie anche a veicolo fermo).

- Quando facciamo partire il veicolo: teniamo fermo l'ICE  $\omega_{ICE} = 0$  e regoliamo la velocità del solare, ovvero del generatore ( $\omega_{gen}$ ), in modo da generare la corretta accelerazione del motore elettrico. Il veicolo si avvia e accelera in **puro elettrico**.



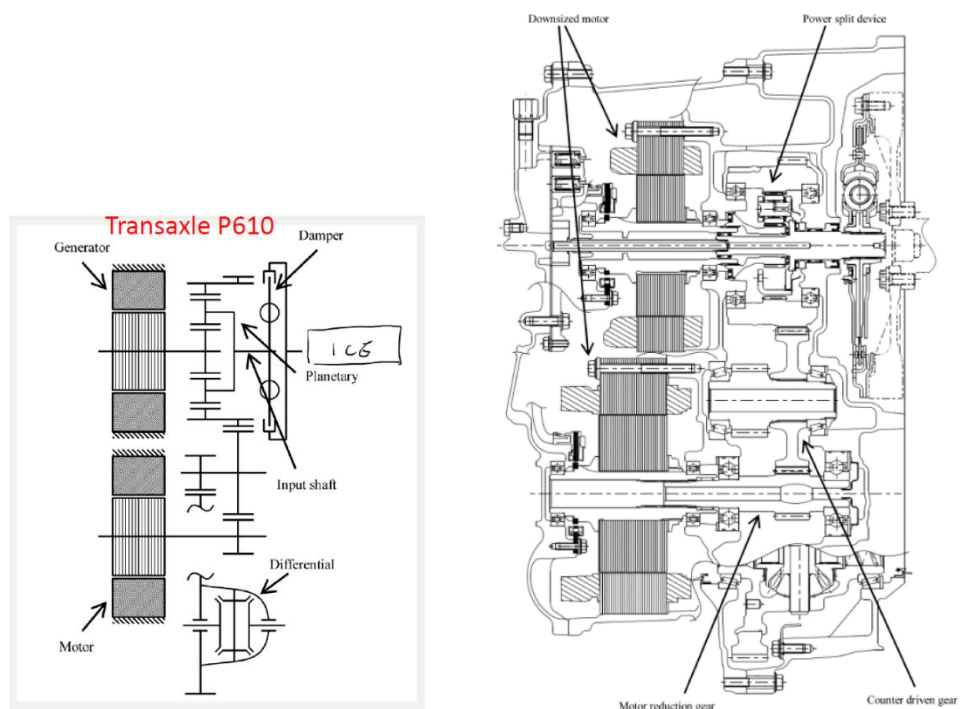
- Supponiamo di voler accendere l'ICE a veicolo fermo:  $\omega_{mot} = 0$ . Cambiamo la velocità del generatore ( $\omega_{gen} \uparrow$ ) determinando l'accensione dell'ICE ( $\omega_{ICE} \uparrow$ ). Se volessimo accendere l'ICE a veicolo già avviato in elettrico cambierebbe il punto rappresentante la velocità del motore elettrico ( $\omega_{mot}$ ) (che troveremmo quindi non a zero ma più in alto nel grafico precedente di sinistra).

- Nelle condizioni di guida normale: regolando la velocità del generatore ( $\omega_{gen}$ ), fissata la velocità delle ruote e quindi del motore elettrico ( $\omega_{mot}$ ), possiamo determinare dove si trova il punto di funzionamento dell'ICE ( $\omega_{ICE}$ ); Nel grafico sulla destra è riportato il caso con  $\omega_{gen} = 0$ ; una situazione più generale è rappresentata dal seguente grafico:





Analizziamo il **secondo cambiamento**:



Il motore termico è collegato al porta planetari, il generatore è collegato al solare; **la corona del primo rotismo epicicloidale non è più collegata a un secondo rotismo epicicloidale ma è semplicemente collegata a un secondo gruppo di ruote meccaniche (gruppo in basso) che serve esclusivamente ad andare a cambiare la velocità del motore elettrico.** Questo consente di **mantenere la velocità del termico più elevata con benefici sulla compattezza del sistema.**

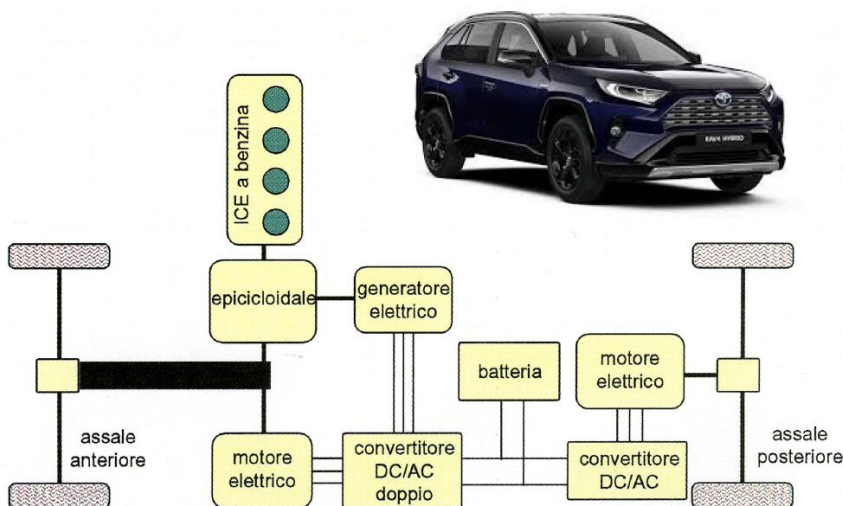
Confrontiamo la configurazione con **due rotismi epicicloidali (P410)** e la configurazione con un rotismo epicicloidali + **cascata di ingranaggi (P610)**: a parità di caratteristiche dell'ICE, il motore di trazione della configurazione **P610 gira a una velocità più alta rispetto che a quella della P410** -> aumento della compattezza (motor reduction ↑).

Nota: nel corso del tempo, anche il motore termico (ICE) ha subito dei cambiamenti (la **prima versione della Prius montava un motore 1.5 [L]**)

| Transaxle                  | P610                 | P410            |
|----------------------------|----------------------|-----------------|
| Vehicle Class              | Compact              |                 |
| Engine                     | Displacement         |                 |
|                            | 1.8 L                |                 |
|                            | Max. Power           | 72kW   73 kW    |
| Max. Torque                | 142 Nm               |                 |
| Motor                      | Type                 |                 |
|                            | Synchronous AC motor |                 |
|                            | Max. Power           | 53 kW   60 kW   |
|                            | Max. Torque          | 163 Nm   207 Nm |
| Max. Speed                 | 17000rpm   13500rpm  |                 |
| Motor Reduction Gear Ratio | 3.117                | 2.636           |
| Differential Gear Ratio    | 3.476                | 3.267           |
| Weight Including ATF       | -5.6 kg              | -               |
| Overall Length             | -47 mm               | -               |



Analizziamo un ulteriore cambiamento (ibrido ancora più complesso): THS + TTR

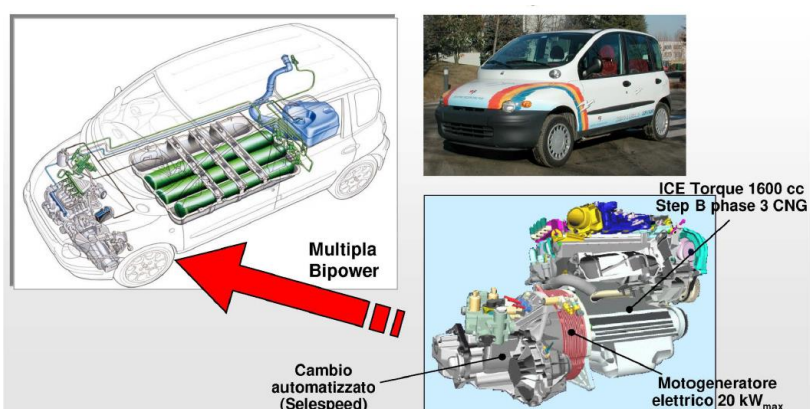


Per complicare ulteriormente le cose aggiungiamo un **terzo motore elettrico sull'assale posteriore** e un **convertitore DC/AC (destra)**: questa configurazione diventa un **power split** a cui abbiniamo un'ibridazione **Through The Road (TTR)**. Abbiamo un **motore elettrico in posizione P4** abbinato a un **ibrido complesso sull'assale anteriore**. Questa configurazione è commercializzata dal gruppo **Toyota per i Suv (Rav 4WD)**. Il **pacco batterie dev'essere più grande** in quanto deve alimentare il sistema di power split sull'assale anteriore e anche il motore elettrico sull'assale posteriore. La strategia di controllo diventa opportunatamente più complessa. In compenso non abbiamo un albero di trasmissione che connetta il motore ICE con l'assale posteriore in quanto questo è comandato dal motore elettrico in P4.

**Più complichiamo il sistema più potenzialmente rendiamo efficiente il sistema (strategia di controllo più complessa).**

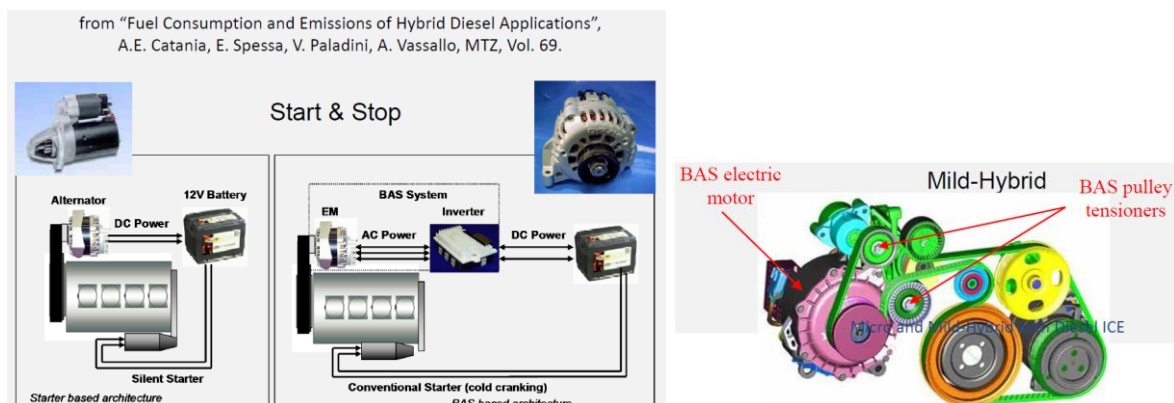
**- Esempi dell'impatto della ibridazione sul Fuel Consumption (FC) e sulle emissioni**

**Hybrid CNG - FIAT Group**



Fino ad adesso abbiamo pensato a un sistema di ibridazione con un motore a benzina (scelta guidata dal fatto che risparmiamo in termini di CO2 prodotta). Teoricamente è possibile ibridare altri sistemi, per esempio un motore a gas naturale. **Un motore a gas naturale ha prestazioni del motore più basse**: il fatto di introdurre un combustibile in forma gassosa impone una limitazione sul coefficiente di riempimento e di conseguenza una limitazione sulla potenza e quindi sulla coppia del motore che è stimabile intorno a un 10% a seconda delle varie configurazioni. Superiamo questo gap sovralimentando oppure **l'ibridazione può venir in aiuto del termico (turbo elettrico)**. **In questo caso l'ibridazione serve non tanto per ridurre i consumi e le emissioni ma piuttosto per aumentare (diminuire) l'indice di prestazione.**

### Micro / Mild Hybrid with Diesel ICE:



Un **motore Diesel** è generalmente **più costoso** di un motore a benzina: pensare anche di **ibridarlo** ne determina un ulteriore **aumento del costo**. Dunque sul mercato abbiamo sempre trovato poche soluzioni **ibride a gasolio**: **oggi giorno ne troviamo in un numero crescente**. La soluzione che qui viene presentata era già stata proposta nel 2006 ma non aveva trovato riscontro per via degli alti costi. **Oggi, per via delle sempre più stringenti normative, anche i costruttori di motori Diesel hanno iniziato sempre più a ibridare le proprie autovetture.**

Vediamo come l'**alternatore** viene sostituito da una **macchina elettrica** più potente con il suo **inverter**. Dunque si tratta di un BSG / BAS. Tecnicamente è un ibrido (anche se i puristi avrebbero a che ridere per via del fatto che se vogliamo andare in puro elettrico ci trasciniamo dietro il termico, il recupero dell'energia in frenata è limitato, ...). In base alla taglia della macchina elettrica parliamo di **Micro (12 [V]) o Mild Hybrid (48 [V])**. In questa configurazione il giro cinghia è montato in modo opportuno sulla macchina elettrica:

### Mild Hybrid with Diesel ICE - ottimizzazione orientata per la minimizzazione dei consumi (FC):

Analizziamo alcuni risultati ottenuti con il **caso ibrido con il BAS (diesel)**:

| Strategy             | NEDC         | RLDC        |
|----------------------|--------------|-------------|
| Downsizing           | 4.0 %        | 3.2 %       |
| Stop&Start           | 2.3 %        | 2.7%        |
| Regenerative braking | 3.1 %        | 4.1 %       |
| ICE load point shift | 0 %          | 0 %         |
| Downspeeding         | -            | 4.0 %       |
| <b>Total</b>         | <b>9.4 %</b> | <b>14 %</b> |

Qui, il calcolo è stato fatto nel **2006 sul NEDC** (di WLTP ancora non se ne parlava); sono riportati anche i valori ottenuti seguendo un ciclo guida più reale, RLDC (studio condotto con GM).

Il sistema di ibridazione Mild, utilizzato per l'analisi, era costituito di una macchina elettrica con una potenza continua di 3 [kW] e una potenza di picco di 9 [kW] e il sistema era a **24 [V]** (**propriamente una via di mezzo tra Micro e Mild**). L'analisi risultò in un vantaggio nell'utilizzo di questo sistema pari a un **risparmio totale di combustibile (FC: Fuel Consumption) tra il 9 e il 14% a seconda del ciclo guida considerato**. Questo risparmio totale era dovuto in primis al downsizing (il primo vantaggio di mettere un BAS consiste nella possibilità di montare un termico più piccolo). **"L'ICE load point shift" non riusciamo a realizzarlo con questa configurazione**; con altre configurazioni è possibile spostare il punto di funzionamento del termico in modo da tenerlo sulla OOL; con una **macchina elettrica e una batteria così piccole** questo non capita quasi mai "perché le poche volte in cui possiamo sfruttarlo la batteria è carica oppure scarica e quindi non possiamo farlo". Questo zero non significa propriamente zero ma qualcosa di trascurabile. Il **Downspeeding sul ciclo NEDC non dava dei vantaggi poiché il cambio marcia era imposto** quindi non potevamo giocare il suo vantaggio, **mentre sul ciclo reale invece sì**. Quindi abbiamo fatto un ibrido Mild e abbiamo ottimizzato la strategia in modo da minimizzare i consumi.

**Mild Hybrid with Diesel ICE - considerazione sull'impatto sui sistemi di After Treatment:**

Soprattutto nei veicoli Diesel, dove il sistema di After Treatment è piuttosto complesso, dobbiamo tener conto di come la strategia di controllo che implementiamo con l'ibridazione vada a impattare sulla gestione termica del sistema di After Treatment: potremmo trovare una **strategia** che teoricamente **riduca molto gli NO<sub>x</sub>, i consumi, i rumori di combustione** ma magari comporterebbe una **riduzione della temperatura dei gas di scarico al di sotto della temperatura ottimale di funzionamento del sistema di After Treatment**, comportando (in particolar specie quando il motore è avviato a freddo) conseguenze negative sulle emissioni di inquinanti; potremmo allora pensare di riscaldare i gas di scarico, ma, mentre nel benzina quest'operazione risulterebbe più facile per via dell'alta temperatura di partenza dei gas scaricati dal motore, in un diesel risulterebbe difficile in quanto la temperatura di partenza dei gas è inferiore; rischieremo di dover accendere il motore termico solo per questa funzione ad hoc di riscaldamento ma allora perderemo i benefici, per esempio in termini di Fuel Consumption (FC), ottenuti precedentemente con la configurazione ibrida.

Dunque, un altro tema importante, discusso oggi, è come fare a gestire l'After Treatment in combinazione con un motore termico abbinato a un'architettura ibrida. Questo problema è molto importante sia nelle autovetture (per le quali potremmo continuare a preferire un motore a benzina ibridato) ma soprattutto per applicazioni di veicoli commerciali leggeri o pesanti (Diesel). **Questo problema sussiste in particolare per i veicoli commerciali, oltre che per via della necessità di montare un motore Diesel, per un discorso commerciale: di solito questi veicoli sono progettati ad hoc per il cliente, sono venduti in stock limitati e dunque le specifiche dei diversi veicoli devono essere studiate attentamente.**

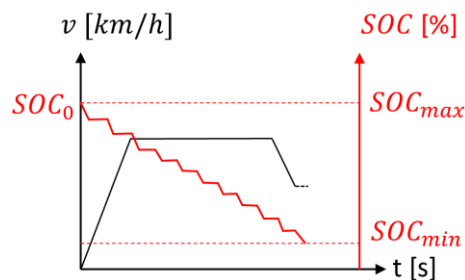
**- Confronto: funzioni dell'ibrido / percezione del cliente**

| FUNCTIONS  | CUSTOMER PERCEPTION |                     |                 |                         |              |                                       |                     |
|--|---------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------|---------------------|
|  | Energy saving       | Pollutant reduction | Noise reduction | Performance improvement | Driveability | Electric auxiliary (comfort, utility) | Cost and complexity |
| Stop and Start   | ↑                   | ↑                   | ↑               | ↔                       | ↔            | ↓                                     | ↑                   |
| Electrically assistance of ICE                         | ↔                   | ↑↑                  | ↑               | ↑                       | ↑            | ↔                                     | ↑↑                  |
| Pure electric traction                                 | ↓                   | ↑↑↑                 | ↑↑↑             | ↓                       | ↑            | ↓                                     | ↑↑↑                 |
| Electric traction at low speeds or during traffic jams | ↑                   | ↑                   | ↑               | ↓                       | ↓            | ↓                                     | ↑↑                  |
| Integrated management of electric loads                | ↑                   | ↑                   | ↔               | ↔                       | ↔            | ↑                                     | ↑                   |
| Regenerative brake                                     | ↑                   | ↑                   | ↑               | ↔                       | ↔            | ↔                                     | ↑↑                  |
| Reduction of vibrations and noise                      | ↓                   | ↑                   | ↑               | ↓                       | ↑            | ↔                                     | ↑                   |

With reference to n.p. Vehicle with automatic transmission

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Charge Declining Control:** Nel caso di veicolo **ibrido Plug-in**, quando spegniamo il veicolo, lo stato di carica potrebbe essere a **“zero”** (mai a zero assoluto, solitamente a **10-15%**) in quanto avremmo la **possibilità di ricaricare le batterie dalla rete elettrica**. In tale configurazione non abbiamo la necessità di aggirarci sempre in un intorno di un valore prefissato ma **possiamo scaricare le batterie a volontà**: cambia totalmente la strategia di controllo (CS). Possiamo ipotizzare che lo stato di carica, a inizio missione, sia uguale allo stato di carica della missione precedente, oppure allo stato di carica massima delle batterie. Quindi la batteria è atta a scaricarsi. Per scaricarsi la batteria deve permettere uno stato di carica adeguato (1) e inoltre la macchina elettrica deve permettere delle potenze per far viaggiare il veicolo in modalità puramente elettrica senza l'ausilio del motore (2). Dunque, il dimensionamento della parte elettrica è completamente diverso. Solitamente nella configurazione Plug-in le **macchine elettriche sono più performanti e le batterie sono molto più grandi**.

**Numero di strategie di controllo possibili:**

- Data un'architettura HEV, **quante** strategie di controllo (CS) **realizzabili** esistono? [molte]

In via teorica sono illimitate, per via pratica sono limitate a un certo numero di soluzioni.

- **Quante**, tra queste, sono strategie di controllo (CS) **ottimali**? [poche]

Poche, relativamente alla funzione che vogliamo di ottimizzare (definita **“funzione obiettivo”**).

Tali funzioni obiettivo possono essere: riduzione del Fuel Consumption (FC), riduzione dello stato di carica, controllo della temperatura del sistema di After Treatment, ...

**Procedura:**

1) Si fissa la **funzione obiettivo** da realizzare mediante la strategia di controllo (CS).

2) Definiamo **l'applicazione finale**: scegliamo un ciclo, il powertrain che vorremmo utilizzare, ...

3) Trovare la **strada migliore per ottimizzare la strategia di controllo (CS) in relazione alla “funzione obiettivo”**, per una determinata applicazione.

**Classificazione dei metodi di ottimizzazione della strategia di controllo (CS):**

- Metodi di ottimizzazione globali (metodi Benchmark) (non implementabili a bordo)

Programmazione dinamica

Algoritmo genetico

Pontryagin's Minimum Principle (PMP)

- Metodi di ottimizzazione istantanei (implementabili a bordo)

ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)

- Metodi di ottimizzazione euristici (implementabili a bordo)

Rule-Based Method basato sulla massimizzazione offline dell'efficienza dei componenti (fuzzy logic)

Rule-Based Method basato sull'ottimizzazione delle mappe di controllo offline (Map Based)

- Metodi di ottimizzazione basati sull'Intelligenza Artificiale (implementabili a bordo)

Rule-Based Method basato sull'apprendimento Non-Supervisionato



## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Dopo aver trovato **tutti i possibili percorsi**, andiamo a definire quella che è in **grado di massimizzare o minimizzare**, in funzione del problema di ottimizzazione, una data **funzione obiettivo**. Quindi, definendo  $J(\pi(s))$  **funzione obiettivo** e  $F$  il **set delle possibili strategie di controllo**:

$$\pi^*(s) = \min_{\pi(s) \in F(s)} J(\pi(s)) \text{ or}$$

$$\pi^*(s) = \max_{\pi(s) \in F(s)} J(\pi(s)) : \text{strategia di controllo (policy) ottimale}$$

### Programmazione dinamica

#### Principio:

Nell'ambito pratico, il principio di ottimalità di Bellman viene applicato a problemi in cui l'algoritmo di gestione di controllo è la programmazione dinamica. La **programmazione dinamica** è essenzialmente l'algoritmo che abbiamo raffigurato precedentemente con l'esempio degli spostamenti da una città all'altra. È dunque un **algoritmo che, in un unico passaggio definito backward, partendo dall'istante finale tornando all'istante iniziale, calcola qual è il percorso ottimale**. La programmazione dinamica restituisce quindi in un unico passaggio la strategia di controllo ottimale che otteniamo tramite il principio di ottimalità di Bellman (per il quale calcoliamo invece tutte i valori delle possibili azioni **per poi** valutare quale sia il valore ottimale rispetto alla funzione obiettivo); una volta che questo algoritmo ha girato siamo sicuri di aver trovato la soluzione ottimale, globale, al problema.

Dunque, dobbiamo essere in grado di creare una griglia come abbiamo fatto per l'esempio delle città: al posto delle città e al posto del valore delle azioni in funzione della scelta del percorso, inseriamo qualcosa che sia rappresentativo della condizione operativa di un powertrain. Nella programmazione dinamica esistono **due tipologie di variabili**, le cosiddette:

**Variabili/parametri di stato**: lo stato di un sistema è definito, nei veicoli ibridi, sicuramente dallo **stato di carica delle batterie (SOC)** e può eventualmente essere aggiunto lo **stato di accensione/spegnimento del motore**. Potremmo aggiungere **ulteriori parametri di stato** quali la **temperatura dei gas di scarico** e la **temperatura dei gas all'interno del sistema di After Treatment**. Ci sono infinite possibilità. Comunque solitamente utilizziamo come variabili lo SOC e a volte lo stato di accensione/spegnimento del motore.

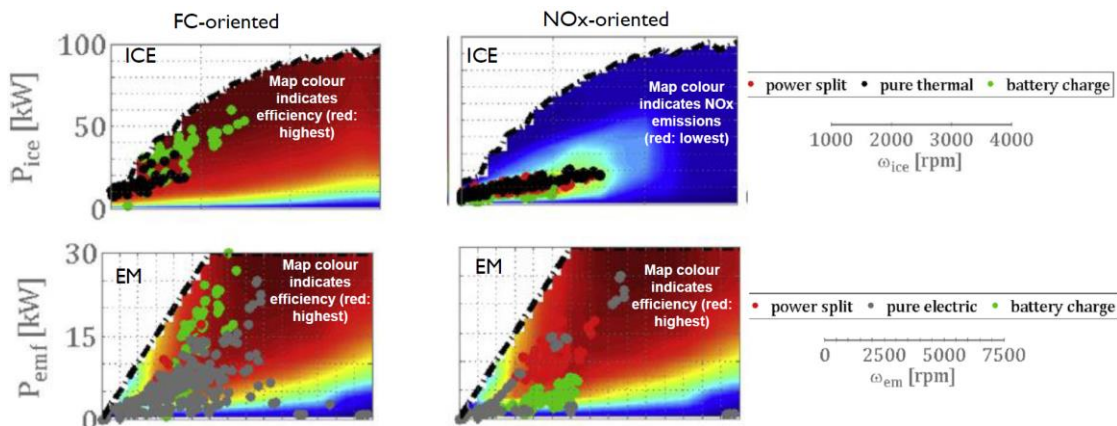
Perché "stati" del sistema? Perché ci permettono di tracciare l'evoluzione del sistema durante la missione.

**Variabili/parametri di controllo**: lasciano più libertà. Se lo stato di un sistema è quasi obbligato (se stiamo simulando in funzionamento di un veicolo ibrido e non facciamo considerazioni sul SOC, difficilmente rappresentiamo lo stato del veicolo) **i parametri di controllo sono più soggetti a libere considerazioni**. Solitamente prendiamo in considerazione il **numero delle marce al cambio** (possiamo avere un cambio a 6, 8, 11 marce... dipende dal veicolo; quindi, per definire a ogni istante di tempo quale marcia è più opportuna), la **condizione operativa del veicolo** (considerando un HEV parallelo, possono essere rappresentate dalla scelta di funzionamento in **puro elettrico**, in **puro termico** o sulla base del **power split** oppure del **battery charging**: condizione nella quale il motore termico fornisce più potenza di quella necessaria perché una parte è destinata alla trazione, l'altra alla ricarica delle batterie). Se abbiamo per esempio 12 condizioni operative: se la strada ci chiede 100 [kW] di potenza per poter viaggiare a 80 [km/h]: per ottenerli in modalità puro termico il motore termico dovrà offrire 100 [kW] più i [kW], quantificabili, dell'inefficienza del powertrain (al pneumatico, alla ruota, al differenziale, al cambio, all'albero, ...); questa rappresenta un'azione 1 / 12; per ottenerli in modalità puro elettrico il motore elettrico dovrà offrire 100 [kW] più i [kW], quantificabili, dell'inefficienza del powertrain; siamo a 2 / 12; nella configurazione power split si utilizzano alcuni valori/rapporti rappresentativi, per esempio 10%, 20%, 50%, 75%, 90% (5 livelli); siamo a 7 / 12; stesso discorso per il battery charging: quanta potenza in più deve produrre il termico per ricaricare le batterie? Possiamo sceglierlo in funzione delle curve limite delle macchine (supponiamo 5 livelli); siamo a 12 / 12.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

### Distribuzione dei punti operativi (ICE e EM):

Analizziamo la **distribuzione dei punti operativi (ICE e EM)** per un veicolo ibrido parallelo su un ciclo AMDC per  $a = 1$ : “FC oriented” e per  $a = 0$ : “ $NO_x$  oriented”:



### Algoritmo genetico

#### Premesse:

1. Non viene utilizzata dal gruppo di ricerca del Politecnico di Torino;
2. Ha un utilizzo minore da parte sia delle case automobilistiche sia delle case controllistiche.

L'algoritmo genetico si basa su una **variazione stocastica** delle prove fatte dall'utente.

Difficilmente utilizziamo un algoritmo genetico: la **dimostrazione della convergenza** è “quasi impossibile”, o meglio, è molto complicato raggiungere una dimostrazione di come l'algoritmo genetico, per quanto puntualmente preciso, raggiunga la convergenza. Invece per la programmazione dinamica esiste il teorema che già alla base dimostra che tutto funzionerà.

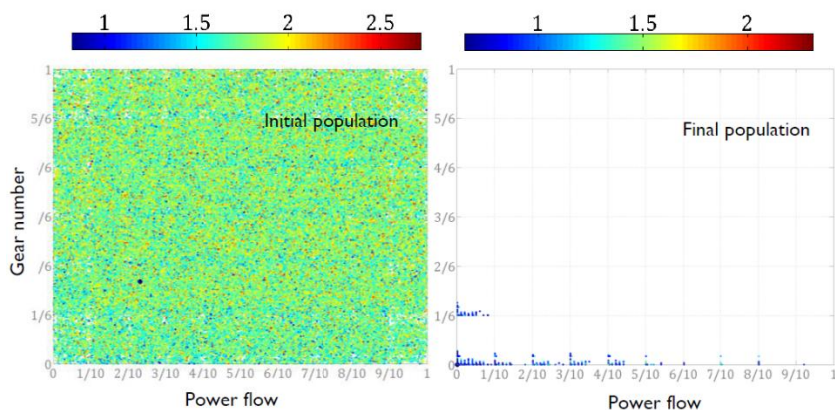
#### Principio:

Il **ciclo è diviso in istanti** in funzione della discretizzazione che scegliamo per il profilo di guida. A **ogni istante di tempo** dobbiamo selezionare le **azioni** (quelle che in programmazione dinamica si chiamano variabili di controllo). Per far ciò possiamo basarci o sul principio di ottimizzazione dinamica oppure possiamo **applicare per ogni istante di tempo un'azione a caso (random)** che sia una **marcia** oppure una **condizione operativa** (che nel modello viene rappresentata con un numero – indice: per esempio quando  $i=1$ : modalità puro termico; quando  $i=2$ : modalità puro elettrico; ...). Quindi immaginiamo che la sequenza di controllo sia generata in modo random **per N volte**, dove N è grande a piacere ed è definita “popolazione”. Ogni sequenza viene definita “individuo”. **Scegliamo N, il numero di individui  $\leftrightarrow$  strategie di controllo.**

Facciamo N tentativi nella prima popolazione (composta N individui) e a ogni tentativo corrisponderà un determinato risultato. I risultati quali possono essere? Innanzitutto che la strategia di controllo che abbiamo ipotizzato in modo random per ogni istante di tempo, **sia fattibile o meno** (esempio: se ci troviamo a 10 [km/h] e vogliamo accelerare a 11 [km/h] è molto difficile realizzare questo obiettivo con la marcia 6: difficilmente la strategia di controllo risulterà nel suo complesso fattibile se, nel punto considerato, l'algoritmo genetico ha selezionato una marcia diversa dalla prima o dalla seconda). **Se la strategia risulta fattibile allora viene restituito un valore finale della funzione obiettivo** (che può essere, nuovamente, il FC, gli  $NO_x$ , una miscelanea delle due, ...). Una volta arrivati alla fine di tutta la “popolazione” N, **vengono presi due “individui”, due strategie di controllo random, definiti “genitore 1” e “genitore 2”**. Una volta selezionati, cerchiamo di trovare quei due individui che permettono di passare in maniera intelligente da una prima popolazione a una seconda. Se le prime sequenze selezionate sono randomiche è molto facile che ci sia un



**Analisi dei risultati dell’algoritmo genetico:**



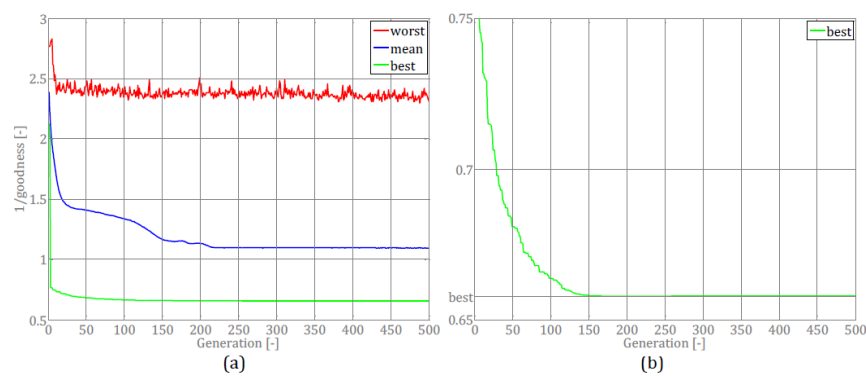
L’ottimalità degli individui in termini di idoneità rispetto alla funzione di costo J è indicata dal colore.

Nel grafico verde vediamo la popolazione iniziale di N individui: azioni marce sull’asse delle ordinate e le condizioni operative (power flow) sull’asse delle ascisse. Nella prima popolazione dispersione dei punti: tutto casuale. Attraverso la mutazione genetica che creiamo nel corso delle popolazioni (**sempre più ristrette**), alla fine delle iterazioni troviamo una definita distribuzione di punti che ci dice quale marcia sia più opportuna in funzione delle condizioni operative (power flow).

Questo risultato in particolare di cosa potrebbe essere rappresentativo? Immaginiamo di avere un HEV con una macchina elettrica in posizione P3, quindi prima del cambio, se il veicolo fosse plug in, avesse sufficiente capacità all’interno della batteria, una macchina elettrica sufficientemente potente e il ciclo magari non troppo performante, probabilmente il grafico vorrebbe dirci che potremmo riuscire a realizzare l’obiettivo in modalità puramente elettrica e quindi, dal punto di vista di codice la marcia rimarrebbe sempre la stessa, oppure combinando modalità diverse con diverse distribuzioni di utilizzo delle marce.

Dunque la successione di questi grafici ci racconta come l’algoritmo genetico, partendo da situazioni randomiche, raggiunge un certo valore di convergenza.

**Evoluzione dell’ottimalità della popolazione rispetto al numero di generazioni (Non analizzato a lezione):**



(b: Zoom)

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Con questo passaggio tra ottimalità e sub-ottimalità, possiamo ora alla seconda parte di tutti gli algoritmi di controllo implementabili on board, tutti quelli che possono essere effettivamente iscritti nella centralina. La programmazione dinamica non può essere iscritta per via delle “infinite” computazioni oltre che per il fatto che in partenza non conosciamo la missione. Quindi, la programmazione dinamica viene utilizzata solo durante le fasi di progettazione per valutare quale possa essere la performance massima che può essere ottenuta, percorrendo un determinato ciclo, da parte di un veicolo (variando le taglie dei componenti ricerchiamo le corrispondenti strategie ottimali di controllo; per ogni possibile powertrain, le combinazioni di architetture ottimali, rispetto a diversi cicli cambiano; pertanto, utilizziamo la programmazione dinamica per poter trovare quale sia il design ottimale, per un dato veicolo, su più cicli, con più architetture).

**- Metodi di ottimizzazione istantanei (implementabili a bordo) [ ↓ LEZIONE 32: 11/12/19 ] Ing. C. Maino**

**ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)**

Prendiamo in considerazione un istante di tempo  $t$  su una determinata missione, definiamo a priori qual è la **funzione obiettivo** e cerchiamo di trovare una **soluzione al problema istantaneo** sulla base della **funzione obiettivo**. Sono implementabili on board perché hanno una complessità algoritmica limitata, e inoltre perché permettono di individuare un certo valore della cost-to-go function (funzione obiettivo) all'istante di tempo considerato.

**ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)**

**Principio:**

La funzione obiettivo si basa su due contributi: un contributo relativo al consumo di combustibile istantaneo e un contributo di consumo di combustibile equivalente legato alla componente elettrica: questa tipologia di controllo cerca di dirci: “se vogliamo ridurre il consumo istante per istante va bene, ma teniamo presente che così facendo riduciamo anche lo stato di carica e probabilmente questa riduzione la ripagheremo più avanti: se scarichiamo per tanto tempo, dovremo ricaricare”; dunque, **cerca di trovare un opportuno compromesso tra il consumo puntuale di combustibile dettato dal termico e un contributo di potenza elettrica da poter inglobare all'interno dell'ottimizzazione istantanea.**

$$J_t = \dot{m}_{ICE}(P_{ICE}(t)) + \zeta(P_{EM}(t))$$

$\zeta(P_{EM}(t))$  : combustibile equivalente legato alla componente elettrica

$$\zeta(P_{EM}(t)) = \gamma \cdot s_{dis} \frac{1}{\eta_{batt}(P_{EM})\eta_{EM}(P_{EM})} \frac{P_{EM}(t)}{H_{LHV}} + (1 - \gamma) \cdot s_{chg} \cdot \eta_{batt}(P_{EM})\eta_{EM}(P_{EM}) \frac{P_{EM}(t)}{H_{LHV}}$$

$$\text{con } \gamma = \frac{1 + \text{sign}(P_{EM}(t))}{2}$$

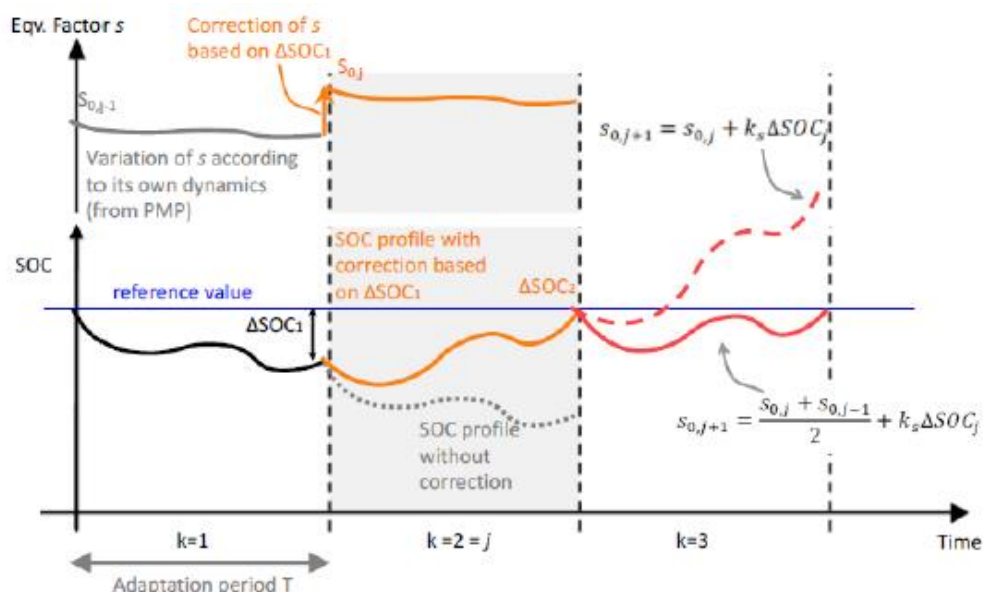
$\gamma \cdot s_{dis} \frac{1}{\eta_{batt}(P_{EM})\eta_{EM}(P_{EM})} \frac{P_{EM}(t)}{H_{LHV}}$ : primo contributo legato alla parte di scarica delle batterie

$(1 - \gamma) \cdot s_{chg} \cdot \eta_{batt}(P_{EM})\eta_{EM}(P_{EM}) \frac{P_{EM}(t)}{H_{LHV}}$ : secondo contributo legato alla parte di carica delle batterie

$s_{dis}$  e  $s_{chg}$  rappresentano i **fattori di equivalenza quando l'energia elettrica viene scaricata o ricaricata** rispettivamente e possono essere considerati **parametri di controllo** dell'approccio ECMS. Quanto valgono questi coefficienti? Qui subentra il grosso problema: non li conosciamo a priori; esistono delle procedure iterative che permettono di calcolare qual è il loro valore ottimale per un determinato ciclo per un determinato veicolo. Come facciamo a calcolarli, dovendo implementare il sistema on board? E se il ciclo cambia?  $s_{dis}$  e  $s_{chg}$  non saranno più ottimali... Dunque subentra, all'interno di un principio già di sub-ottimalità, anche il problema di trovare i coefficienti numerici che permettano di calibrare opportunamente la parte elettrica e la parte termica all'interno di una funzione obiettivo dato il veicolo, dati N cicli.

### Adaptive-ECMS:

Tramite la A-ECMS vogliamo trovare un metodo sensato per poter modificare  $s_{dis}$  e  $s_{chg}$  durante la corsa, al variare dello stato di carica (SOC).



Bianchi, D., Rolando, L., Serrao, L., Onori, S., Rizzoni, G., Al-Khayat, N., Hsieh, T.-M., Kang, P., Layered control strategies for hybrid electric vehicles based on optimal control (2011) International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 3 (2), pp. 191-217. DOI: 10.1504/IJEHV.2011.042147

Linea blu: valore di riferimento dello stato di carica ( $SOC_0$ )

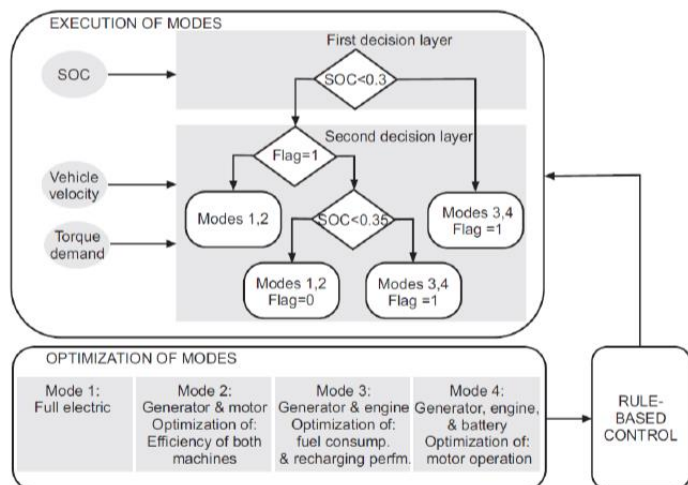
$s_{dis}$  e  $s_{chg}$  assumono valori iniziali a un certo intervallo di tempo  $k_0$ . Da  $k_0$  a  $k_1$  abbiamo una variazione di carica dettata dalla condizione operativa del veicolo. Immaginiamo che dopo 10 [s] abbiamo scaricato le batterie di una certa % che ci porta  $\Delta SOC_1$ . Quando arriviamo a  $k = 1$ , introduciamo un contatore; passato tot tempo andiamo a rivalutare cosa sta succedendo allo stato veicolo e aggiorniamo  $s_{dis}$  e  $s_{chg}$ , mediante l'utilizzo di due formule (diverse in funzione di come vogliamo valutare il  $\Delta SOC$ , puntale o come intervallo), sulla base della quantità di SOC che si è persa o si è guadagnata nel corso della missione stessa.

### Considerazione su ECMS e A-ECMS:

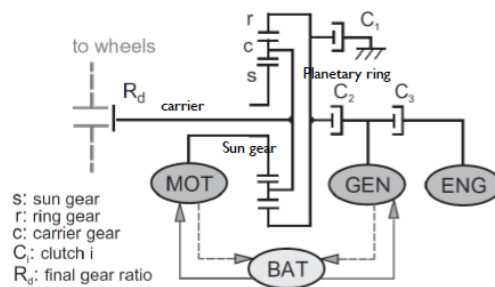
Esistono strategie di controllo più semplici che richiedono meno calcoli e che portano più o meno agli stessi benefici (semplificazione maggiore dell'algoritmo all'interno della centralina stessa). Sia l'ECMS (che non è praticamente mai stato effettivamente implementato a bordo) che l'A-ECMS (che ha avuto alcune implementazioni a bordo prototipali – in America alcune vetture costose usano questo algoritmo) sono stati "by-passati".

**Esempio pratico: metodo RB (Rule-Based) per un'architettura power split:**

Algoritmo di controllo:



Architettura: power split



Applied Energy 113 (2014) 816–824

All'interno di questa architettura abbiamo 4 plausibili modalità operative:

Modalità 1 (Puro elettrico): la frizione C1 è bloccata, C2 e C3 sono aperte e il motore è spento;

[funzionamento in puro elettrico]

Modalità 2 (Puro elettrico 2 movimenti): C1 e C3 sono aperti, C2 è bloccato e il motore è spento;

[funzionamento delle macchine elettriche: una da generatore e una da motore, relativa al power split]

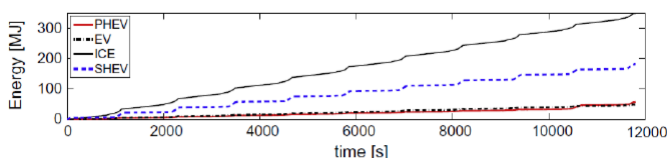
Modalità 3: (HEV serie): C1 e C3 sono bloccati, C2 è aperto e il motore è acceso (Nota come Range-Extended);

[funzionamento delle macchine elettriche: una da generatore e una da motore, relativa al battery charging]

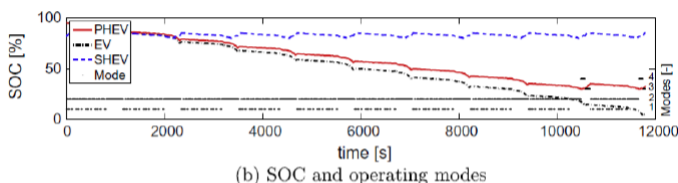
Modalità 4: (modalità power split): C1 è aperto, C2 e C3 sono bloccati e il motore è acceso. Pertanto, le tre macchine sono tutte collegate tra loro.

[funzionamento delle macchine elettriche: una da generatore e una da motore, più utilizzo delle batterie, relativa al puro elettrico]

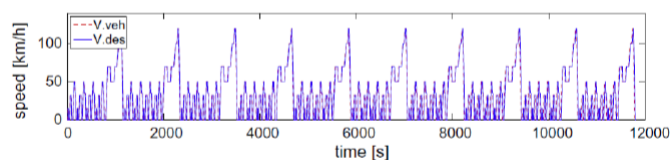
**Risultati (Ciclo NEDC):**



(a) Energy consumption



(b) SOC and operating modes



(c) Actual and desired speed

Applied Energy 113 (2014) 816–824

**PHEV:** Plug-in HEV

**EV:** Electric Vehicle: variante del modalità Plug in: modalità 1.

**SHEV:** Series-HEV: variante della modalità Plug in: modalità 1 e 3.

## - Metodi di ottimizzazione basati sull'Intelligenza Artificiale (implementabili a bordo)

### Rule-Based Method basato sull'apprendimento Non-Supervisionato

Machine Learning (ML): "apprendimento automatico": indica un gruppo di tecniche nel quadro dell'intelligenza artificiale (AI). Con il **termine Intelligenza Artificiale (AI)** si intende una **famiglia di algoritmi** all'interno della quale distinguiamo **tre categorie**:

- 1) Categoria di algoritmi basati sui cosiddetti problemi Supervised;
- 2) Categoria di algoritmi basati sui cosiddetti problemi Unsupervised;
- 3) Categoria di algoritmi basati sui cosiddetti problemi Reinforced;

1) I problemi Supervised sono i classici problemi di **supervisione delle immagini**. In questa tipologia di algoritmi disponiamo un determinato **Dataset di allenamento** con il quale definiamo alcuni elementi, denominate **features**, che secondo noi siano **rappresentativi dell'immagine**; una volta che abbiamo definito, **sulla base delle features, quale sia l'output, ossia l'immagine**, componiamo una sequenza logica nell'algoritmo. Passiamo al nostro algoritmo **tante di queste sequenze** e cerchiamo di fargli "imparare" quale sia la correlazione tra l'input e l'output.

Questa categoria di algoritmi sono difficilmente applicabili a una strategia di controllo: se non conosciamo il ciclo a priori non possiamo "insegnare" all'algoritmo cosa fare sulla base dell'esperienza passata, in quanto non conosciamo gli istanti futuri.

2) La categoria di algoritmi, basati sui problemi Unsupervised, funzionano in modo completamente diverso: non conoscono quale sia l'output del problema di allenamento ma cercano di trovare delle correlazioni, solitamente altamente non lineari, tra tutte le variabili d'ingresso. Una volta definite, secondo noi, quali siano le variabili rappresentative del problema, cerchiamo di "insegnare" all'algoritmo quali sono i pattern di queste variabili e quindi a classificare determinate famiglie di output.

Questa categoria di algoritmi è ampiamente utilizzata. Chiediamo all'algoritmo, **sulla base delle variabili acquisite**, quali lo SOC, le potenze, la velocità, la pendenza del ciclo, gli istanti di tempo precedenti, ecc., di capire in che tratto del ciclo ci troviamo e dunque di attuare una predeterminata strategia di controllo.

3) La categoria di algoritmi, basati sui problemi Reinforced, si basano sull'allenamento dell'algoritmo che può ricevere o meno delle **ricompense** sulla base del **corretto svolgimento di una funzione che gli è stata passata**. L'algoritmo non conosce a priori il ciclo e **ricerca una strategia** di controllo **basata su un insieme di mappe frutto dell'allenamento**.

### Rule-Based Method basato sull'apprendimento Non-Supervisionato

Analizziamo l'applicazione CORE: "Clustering Optimized Rule Extraction".

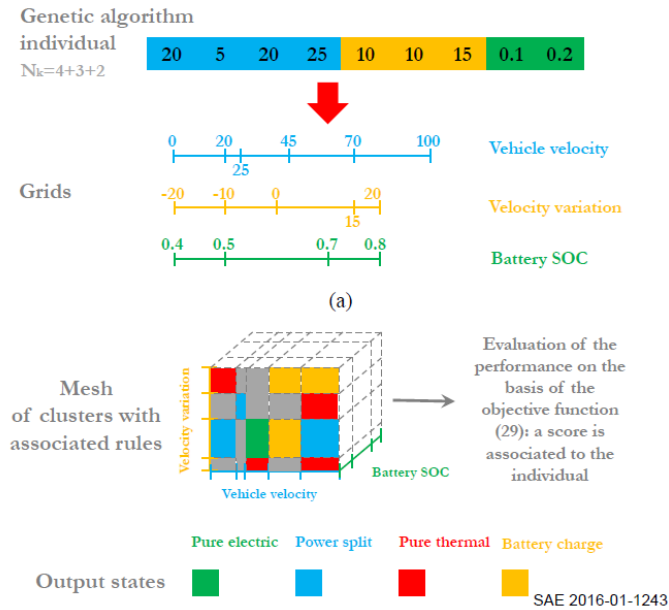
#### Principio:

Abbiamo la **possibilità di utilizzare**, per un dato layout e per un determinato ciclo, la **programmazione dinamica** per definire qual è sicuramente la strategia di controllo ottimale (ovvero la strategia di controllo che è in grado di minimizzare o massimizzare una determinata funzione obiettivo sulla base di un principio di ottimalità). La programmazione dinamica restituisce le scelte e gli istanti di tempo corrispondenti. Quindi, per un determinato veicolo e per un determinato ciclo, conosciamo le configurazioni ottimali che il sistema deve assumere istante dopo istante. Cerchiamo di far capire all'algoritmo se esiste un pattern, una **correlazione**, tra le **variabili di input che decidiamo** e il **ciclo di riferimento utilizzato nella programmazione dinamica**.



### Un cluster – una scelta:

Dunque, ogni cubetto viene così caratterizzato da un'unica scelta:



La complicazione più grande è rappresentata dalla definizione di un'opportuna discretizzazione degli assi: se modificiamo la discretizzazione di un asse, cambiando quindi la posizione dei cubetti all'interno della matrice, i punti operativi, nonostante cadano sempre nella stessa regione, potrebbero entrare una volta in un cubetto e una volta in un altro; pertanto le distribuzioni in frequenza nei cubetti cambiano e di conseguenza anche la scelta del controllo più ottimale. Utilizzando alcune tecniche, quali per esempio algoritmi genetici, modificiamo in maniera pseudo-intelligente la discretizzazione dei tre assi nel corso delle prove: quando la discretizzazione ottimale è stata trovata si sceglie e mantiene per il controllo delle strategie.

### Vantaggi e problemi:

Questo metodo ha il grosso vantaggio di riuscire a unire la **programmazione dinamica** a un **controllo implementabile on board** ma porta con sé **due problemi**:

1. La **tipologia di scelte che fa la programmazione dinamica**: se all'interno del calcolo della programmazione dinamica introducessimo dei vincoli (per esempio: se cambia lo stato di carica finale i consumi non sono più comparabili da un ciclo a un altro e quindi i risultati della programmazione dinamica non sarebbero più comparabili: quello che si fa solitamente è **aggiungere un vincolo sullo stato di carica finali ( $SOC_{end}$ )**) la programmazione dinamica farebbe delle scelte per cercare di rispettare la condizione di ottimalità e i vincoli; quindi la scelta che compie l'algoritmo è dettata dal contributo di un vincolo alla condizione di ottimalità; quindi se all'interno della programmazione dinamica che utilizziamo per allenare l'algoritmo inseriamo dei vincoli, creiamo all'interno dell'algoritmo un **apprendimento basato anche su quei vincoli**. Allora ecco il problema: **se quei vincoli non sono riproducibili nella realtà o non vengono riprodotti nella realtà**, otteniamo una **matrice sbagliata** rispetto all'applicazione reale. Le ipotesi di calcolo della programmazione dinamica a monte dell'algoritmo devono essere opportunamente valutate.

2. Il secondo problema è relativo all'**utilizzo del algoritmo stesso**: se utilizziamo come ciclo di allenamento un ciclo urbano, il set di regole che finisce all'interno della matrice 3D sarà relativa a un ciclo urbano; se poi prendiamo il veicolo e lo utilizziamo in autostrada per esempio, il **set di regole non sarà ottimale**. Quindi, nella fase di allenamento, l'algoritmo deve essere istruito su un **insieme dei cicli** (un po' urbani, un po' extraurbani, un po' autostradali, ecc., in funzione dell'applicazione finale del veicolo) che analizziamo con la programmazione dinamica.



## - Contesto normativo legato alle Autovetture e ai Veicoli Commerciali Leggeri

Normativa EU per le Emissioni di Inquinanti

Normativa EU per le Emissioni di  $CO_2$

Sguardo ad altri Contesti Normativi

### Omologazione del veicolo e certificazione sulla produzione di $CO_2$ :

Quando parliamo di autovetture o veicoli commerciali leggeri distinguiamo un **contesto normativo** relativo alle **emissioni di inquinanti** e un **contesto normativo** legato alle **emissioni di  $CO_2$** .

Le **emissioni di inquinanti** vengono verificate su cicli guida (oggi giorno WLTP) riprodotti in laboratorio: se le emissioni del veicolo preso in esame rientrano nei limiti di legge allora il veicolo ottiene l'**omologazione secondo la normativa vigente** (oggi giorno la normativa è: Euro 6). **Inoltre, a partire dal 2017, a regime dal 2019, è stato introdotto il test RDE: Real Driving Emissions.** La verifica delle emissioni non viene più fatta solo in laboratorio ma viene fatta anche su strada: la vettura viene equipaggiata con un sistema portatile di misura delle emissioni, viene messa su strada, le si fa percorrere un percorso opportuno, dunque, in condizioni "reali", si misurano le emissioni (senza pretendere che siano uguali a quelle riprodotte in laboratorio) e si confrontano con dei limiti diversi da quelli da rispettare nella prova su banco in laboratorio (limite test su banco moltiplicato per un fattore di conformità > 1). **Dunque, una vettura, per essere omologata, deve superare questi due test, basati uno sul limite imposto per il ciclo WLTP e l'altro sul limite imposto sulle RDE.**

Le **emissioni di  $CO_2$**  sono normate non per un fine omologativo ma per ottenere per il veicolo una **certificazione sulla quantità di  $CO_2$  che emette**: mentre ci occupiamo dell'esecuzione del ciclo WLTP per il calcolo delle emissioni, determiniamo anche la produzione di  $CO_2$ . Queste emissioni vengono registrate; a fine anno il costruttore deve dichiarare quanti e quali tipi di veicoli ha venduto, si fa la media delle emissioni di  $CO_2$  che i vari veicoli del costruttore hanno emesso e si verifica che tale media sia al di sotto di un certo target. Se la media è al di sopra del target allora si paga una multa (normativa ex post).

La **stessa struttura** vale anche **per i veicoli commerciali leggeri**: le procedure sono più o meno le stesse; **cambiano i limiti imposti.**

## Normativa EU per le Emissioni di Inquinanti:

**La normativa madre è la Direttiva 70/220/EEC: è stata modificata ed emendata nel tempo n. volte.**

La regolamentazione delle emissioni dell'Unione Europea per i nuovi veicoli leggeri (autovetture - PC - veicoli commerciali leggeri - LCVs) una volta erano specificati nella direttiva 70/220/EEC con un numero di emendamenti adottati fino al 2004. **Nel 2007 la presente direttiva è stata abrogata e sostituita da Regolamento 715/2007 (Euro 5/6).** Infine, è stato integrato dal **Regolamento 2017/1151 del 1° giugno 2017**. Alcune delle importanti misure normative che implementano lo standard di emissione per LD veicoli erano:

- Standard Euro 1 (noto anche come EC 93): Direttive 91/441/EEC (solo autovetture) o 93/59/EEC (autovetture e camion leggeri);
- Standard Euro 2 (EC 96): Direttive 94/12/EC o 96/69 /EC;
- Norme Euro 3/4 (2000/2005): Direttiva 98/69/EC, ulteriori modifiche nel 2002/80/EC;
- Standard Euro 5/6 (2009/2014): regolamento 715/2007 (legislazione "politica") e diversi regolamenti di comitatologia:

o Regolamento 692/2008 e rettifiche: la principale normativa di attuazione (abrogata da 2017/1151 e 2017/1221. 2017/1151 è a sua volta modificato da 2017/1154 - e la sua rettifica - e corretta entro da 2017/1347);

o Regolamento 459/2012 - Limiti PN per veicoli a benzina e OBD finale Euro 6;

o Regolamento 630/2012 - disposizioni per idrogeno, idrogeno / gas naturale (H2NG) e ibrido e veicoli elettrici;

o Emissioni reali di guida (RDE): regolamento 2016/427, regolamento 2016/646, regolamento 2017/1154 e rettifiche, regolamento 2018/1832;

o Test WLTP/WLTC: regolamento 2017/1151 e rettifiche, regolamento 2017/1347.

I **requisiti di emissione** nel **regolamento 2017/1151 del 1° giugno 2017** dovrebbe applicarsi a:

- **Nuove omologazioni di:**
  - o 1° settembre 2017 per i veicoli delle categorie M1, M2 e categoria N1 di classe I;
  - o 1° settembre 2018 nel caso di veicoli N1 di classe II e III e veicoli di categoria N2;
- **Nuovi veicoli da:**
  - o 1° settembre 2018 per i veicoli delle categorie M1, M2 e categoria N1 di classe I;
  - o 1° settembre 2019 per i veicoli N1 dei veicoli di classe II e III e di categoria N2.

Gli standard 2000/2005 sono stati accompagnati dall'introduzione di **norme più rigorose sul carburante** che richiedono un numero minimo di cetano diesel pari a 51 (anno 2000), un **contenuto massimo di zolfo nel diesel** di 350 [ppm] nel 2000 e 50 [ppm] nel 2005 e un **massimo di zolfo nella benzina contenuto** di 150 [ppm] nel 2000 e 50 [ppm] nel 2005. I carburanti diesel e benzina "senza zolfo" ( $\leq 10$  [ppm]) dovevano essere disponibili dal 2005 e sono diventati obbligatori dal 2009.

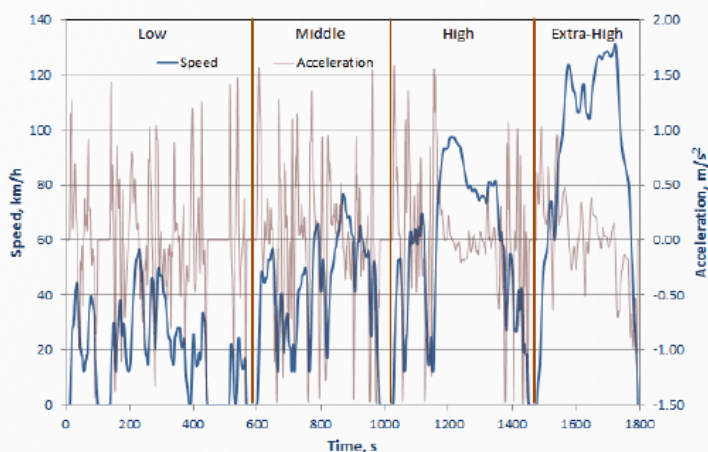
Le normative UE introducono diversi limiti di emissione per i veicoli ad accensione spontanea (diesel) e ad accensione comandata (benzina, GN, GPL, etanolo, ...). **I Diesel hanno standard di CO più rigorosi ma sono ammessi NOx più elevati. I veicoli ad accensione comandata (SI) sono stati esonerati dagli standard PM attraverso la fase Euro 4. Le normative Euro 5/6 introducono standard di emissione di massa PM, pari a quelli per i diesel, per veicoli ad accensione comandata (SI) con motori DI.**

Le emissioni sono testate sulla procedura del dinamometro del telaio WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle), che ha sostituito la NEDC. I requisiti dei test RDE (Real Driving Emissions) sono introdotti gradualmente dal 2017 per controllare le emissioni dei veicoli durante il funzionamento reale, al di fuori del test delle emissioni di laboratorio.

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Ciclo per veicoli di Classe 3:

| Phase      | Duration | Stop Duration | Distance | p_stop | v_max | v_ave w/o stops | v_ave w/ stops | a_min            | a_max            |
|------------|----------|---------------|----------|--------|-------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
|            | s        | s             | m        |        | km/h  | km/h            | km/h           | m/s <sup>2</sup> | m/s <sup>2</sup> |
| Low        | 589      | 156           | 3095     | 26.5%  | 56.5  | 25.7            | 18.9           | -1.47            | 1.47             |
| Middle     | 433      | 48            | 4756     | 11.1%  | 76.6  | 44.5            | 39.5           | -1.49            | 1.57             |
| High       | 455      | 31            | 7158     | 6.8%   | 97.4  | 60.8            | 56.6           | -1.49            | 1.58             |
| Extra-High | 323      | 7             | 8254     | 2.2%   | 131.3 | 94.0            | 92.0           | -1.21            | 1.03             |
| Total      | 1800     | 242           | 23262    |        |       |                 |                |                  |                  |



Ci sono 4 fasi in funzione della velocità raggiunta: Low, Middle, High, Extra-High.

Fase Low:  $v < 60 [km/h]$

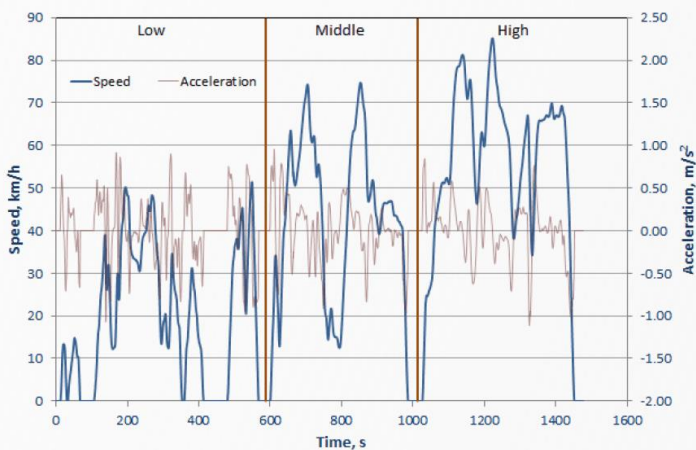
Fase Middle:  $v < 80 [km/h]$

Fase High:  $v < 100 [km/h]$

Fase Extra-High:  $v < 136 [km/h]$  (massima velocità raggiunta nel ciclo WLTC)

Ciclo per veicoli di Classe 2:

| Phase  | Duration | Stop Duration | Distance | p_stop | v_max | v_ave w/o stops | v_ave w/ stops | a_min            | a_max            |
|--------|----------|---------------|----------|--------|-------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
|        | s        | s             | m        |        | km/h  | km/h            | km/h           | m/s <sup>2</sup> | m/s <sup>2</sup> |
| Low    | 589      | 155           | 3132     | 26.3%  | 51.4  | 26.0            | 19.1           | -1.07            | 0.92             |
| Middle | 433      | 48            | 4712     | 11.1%  | 74.7  | 44.1            | 39.2           | -0.99            | 0.96             |
| High   | 455      | 30            | 6820     | 6.6%   | 85.2  | 57.8            | 54.0           | -1.11            | 0.85             |
| Total  | 1477     | 233           | 14664    |        |       |                 |                |                  |                  |

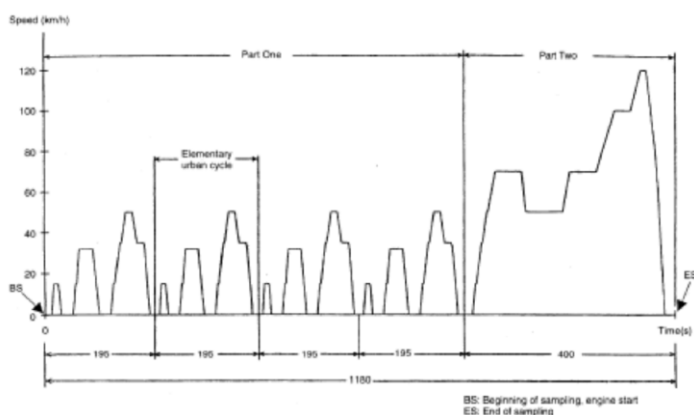


I veicoli di Classe 2 non sono testati nella fase Extra-High.

### Cenni Storici + preview sulla CO<sub>2</sub>:

Il ciclo è stato introdotto nel **settembre 2017** ma soltanto per le vetture di **nuova omologazione**; i veicoli omologati con il ciclo NEDC possono essere ancora venduti. Dal **settembre 2018** tutti i veicoli devono essere **omologati rispettando il WLTP**. Da **gennaio 2019** è obbligatorio che tutte le carte di circolazione dei veicoli riportino esclusivamente i valori di CO<sub>2</sub> ottenuti sul WLTP (prima potevano essere ottenuti sul NEDC). La **normativa sulla CO<sub>2</sub>** è stata introdotta nel **2012**: consisteva di **due step** che dovevano **finire nel 2020**; cosa succede nel periodo di transizione durante il quale, nel 2018, è introdotto il ciclo WLTC per l'omologazione mentre per la CO<sub>2</sub> i limiti sono fissati ancora con il ciclo NEDC? Si calcola tutto sul WLTP, inclusa la CO<sub>2</sub>, poi, per verificare la compatibilità con i livelli di CO<sub>2</sub>, si fa la cosiddetta **Back Correlation** tramite un Software che si chiama **CO2MPAS**, rilasciato dalla **Commissione Europea**: questo Software, noto il valore ottenuto sul ciclo WLTC, stima il valore corrispondente che si otterrebbe con il ciclo NEDC: usiamo questo valore **per certificare** il veicolo fino al 2020. **Dal 2021**, finita la transizione, tutto sarà basato sul ciclo WLTC.

### Excursus sul ciclo NEDC (New European Driving Cycle):



È costituito da **tratti a velocità costante** raccordati con **accelerazioni e decelerazioni**. È rappresentativo di condizioni reali di guida **a livello statistico**: ci dice che il veicolo in città mediamente stà a 15, 35, 50 [km/h] per periodi più o meno lunghi, sta fermo un tot; Le % di stop e le velocità caratteristiche sono state ricavate facendo una statistica dei dati reali di guida. **La parte 1**, chiamata **ECE** (da **Economic Commission for Europe**), **composta da 4 sotto-cicli ripetuti uguali**, rappresenta le **condizioni di guida urbana**; la **parte 2**, chiamata **EUDC (Extra-Urban Driving Cycle)** si riferisce alle **condizioni di guida su strade extraurbane**. Storicamente è stato introdotto prima l'ECE; **fino al 2002 (Euro 2)** il ciclo si chiamava **ECE+EUDC**: il veicolo veniva messo sul banco a rulli, veniva acceso e, **dopo 40 [s]**, iniziava la percorrenza della missione ECE+EUDC; **successivamente (Euro3)** il ciclo viene chiamato **NEDC** e differisce dal ciclo precedente in quanto non bisognava più attendere 40 [s] dall'accensione del motore prima dell'analisi.

| Characteristics                     | Unit             | ECE 15 | EUDC   | NEDC†   |
|-------------------------------------|------------------|--------|--------|---------|
| Distance                            | km               | 0.9941 | 6.9549 | 10.9314 |
| Total time                          | s                | 195    | 400    | 1180    |
| Idle (standing) time                | s                | 57     | 39     | 267     |
| Average speed (incl. stops)         | km/h             | 18.35  | 62.59  | 33.35   |
| Average driving speed (excl. stops) | km/h             | 25.93  | 69.36  | 43.10   |
| Maximum speed                       | km/h             | 50     | 120    | 120     |
| Average acceleration <sup>1</sup>   | m/s <sup>2</sup> | 0.599  | 0.354  | 0.506   |
| Maximum acceleration <sup>1</sup>   | m/s <sup>2</sup> | 1.042  | 0.833  | 1.042   |

- **Durata complessiva del ciclo: 1180 [s] = 19.7'** di cui 267 [s]  $\cong$  4.45' sono di Stop (percentualmente, la % di minimo nel ciclo NEDC è molto maggiore della % di minimo del ciclo WLTC: quindi interventi tecnologici come lo Start&Stop sono molto più impattanti sul ciclo NEDC piuttosto che sul ciclo WLTC).

- **Distanza percorsa:  $\cong$  11[km];**

**Standard delle emissioni dei veicoli  $M_1$  per motore a benzina e motore Diesel: [ ↓ LEZIONE 34: 11/12/19 ]**

| Stage                                | Date                 | CO          | HC                | HC+NOx      | NOx  | PM                   | PN                       |
|--------------------------------------|----------------------|-------------|-------------------|-------------|------|----------------------|--------------------------|
|                                      |                      | g/km        |                   |             |      |                      |                          |
| <b>Positive Ignition (Gasoline)</b>  |                      |             |                   |             |      |                      |                          |
| Euro 1†                              | 1992.07              | 2.72 (3.16) | -                 | 0.97 (1.13) | -    | -                    | -                        |
| Euro 2                               | 1996.01              | 2.2         | -                 | 0.5         | -    | -                    | -                        |
| Euro 3                               | 2000.01              | 2.30        | 0.20              | -           | 0.15 | -                    | -                        |
| Euro 4                               | 2005.01              | 1.0         | 0.10              | -           | 0.08 | -                    | -                        |
| Euro 5                               | 2009.09 <sup>b</sup> | 1.0         | 0.10 <sup>d</sup> | -           | 0.06 | 0.005 <sup>e,f</sup> | -                        |
| Euro 6                               | 2014.09              | 1.0         | 0.10 <sup>d</sup> | -           | 0.06 | 0.005 <sup>e,f</sup> | 6.0×10 <sup>11</sup> e,g |
| <b>Compression Ignition (Diesel)</b> |                      |             |                   |             |      |                      |                          |
| Euro 1†                              | 1992.07              | 2.72 (3.16) | -                 | 0.97 (1.13) | -    | 0.14 (0.18)          | -                        |
| Euro 2, IDI                          | 1996.01              | 1.0         | -                 | 0.7         | -    | 0.08                 | -                        |
| Euro 2, DI                           | 1996.01 <sup>a</sup> | 1.0         | -                 | 0.9         | -    | 0.10                 | -                        |
| Euro 3                               | 2000.01              | 0.64        | -                 | 0.56        | 0.50 | 0.05                 | -                        |
| Euro 4                               | 2005.01              | 0.50        | -                 | 0.30        | 0.25 | 0.025                | -                        |
| Euro 5a                              | 2009.09 <sup>b</sup> | 0.50        | -                 | 0.23        | 0.18 | 0.005 <sup>f</sup>   | -                        |
| Euro 5b                              | 2011.09 <sup>c</sup> | 0.50        | -                 | 0.23        | 0.18 | 0.005 <sup>f</sup>   | 6.0×10 <sup>11</sup>     |
| Euro 6                               | 2014.09              | 0.50        | -                 | 0.17        | 0.08 | 0.005 <sup>f</sup>   | 6.0×10 <sup>11</sup>     |

\* At the Euro 1..4 stages, passenger vehicles > 2,500 kg were type approved as Category N<sub>1</sub> vehicles  
† Values in brackets are conformity of production (COP) limits  
a. until 1999.09.30 (after that date DI engines must meet the IDI limits)  
b. 2011.01 for all models  
c. 2013.01 for all models  
d. and NMHC = 0.068 g/km  
e. applicable only to vehicles using DI engines  
f. 0.0045 g/km using the PMP measurement procedure  
g. 6.0×10<sup>12</sup> 1/km within first three years from Euro 6 effective dates

Il **motore Diesel** in Europa da molto tempo ha una **% di penetrazione sul mercato importante** perché è un motore di per sé **di più economico esercizio**: ci sono svariati motivi per cui un motore CI è più efficiente di un motore a benzina, **soprattutto ai carichi parziali**; inoltre il gasolio costa meno rispetto alla benzina. È stata fatta una **politica di incentivazione** perché **in Europa** dipendiamo in larga misura dalle stazioni di petrolio estere: per scelta, non tanto per favorire il motore Diesel ma piuttosto **per non sfavorirlo**, i vincoli sulle **emissioni sono meno stringenti** per quanto riguarda **gli HC e i NOx** per questa tipologia di motore: **se fossero stati richiesti gli stessi limiti** che vi sono per il motore a benzina, **all'introduzione dell'Euro 3**, ci sarebbe stato un **delta costo**, per soddisfare la richiesta, tale da sfavorire la scelta del motore Diesel.

In altri Paesi sono state fatte altre scelte. **Negli Stati Uniti** i limiti per il motore Diesel **sono gli stessi** che per il motore a benzina (tant'è che negli Stati Uniti non troviamo molte vetture a gasolio).

Per un lungo periodo le **emissioni di particolato (PM)** da parte del **motore a benzina** non sono state normate in quanto i motori erano **tutti di tipo PFI** che abbiamo visto che di particolato non ne emette. A partire dal 2009 (Euro 5), per questioni legate all'economia di esercizio, si è incominciato a mettere in commercio **motori GDI** per i quali la produzione di particolato diventa importante: è dunque diventata necessaria l'introduzione dei **limiti anche per questi motori (stessi limiti del motore Diesel sia in massa che per il numero di particelle)**.

Per quanto riguarda **il limite in massa [mg/km] del particolato (PM)** notiamo una indicazione segnata con la lettera **"P"** che ci dice che **il limite di 5 [mg/km] diventa 4.5 [mg/km]** quando si utilizza la **procedura PMP**. **il limite sul numero di particelle di particolato (PM)** è stato l'ultimo introdotto: a partire **dall'Euro 5b** per i **motori Diesel** e **dall'Euro 6** per i **motori a benzina**.

Notiamo che per ogni limite c'è la data di introduzione; teniamo presente che, anche per questi limiti, **la data di introduzione si riferisce ai veicoli di nuova omologazione** (per i **veicoli di nuova immatricolazione** slitta a un anno dopo).



### Classificazione Euro 5 ed Euro 6:

**Euro 5a** - Esclude la revisione della procedura di misurazione (PMP) per i test PM, PN e per le emissioni a bassa temperatura di veicoli a combustibile flessibile con biocarburante;

**Euro 5b** - Requisiti di emissione Euro 5 completi compresa la procedura di misurazione PMP per PM, norma PN per veicoli CI e prove di emissioni a bassa temperatura per veicoli a combustibile flessibile con biocarburante;

**Euro 6a** - Esclude la procedura di misurazione del PMP per i test PM, PN e per le emissioni a bassa temperatura di veicoli a combustibile flessibile con biocarburante (questa fase si applica ai veicoli che soddisfano gli standard Euro 6 prima delle scadenze regolamentari);

**Euro 6b** - Requisiti di emissione Euro 6 inclusa la procedura di misurazione PMP per PM, norme PN (valori preliminari per veicoli PI) e prove di emissione a bassa temperatura di veicoli a combustibile flessibile con biocarburanti (E10 e B7);

**Euro 6c** - Requisiti di emissione Euro 6 completi senza test RDE, ovvero standard di emissione Euro 6b e standard PN finali per veicoli PI.

**Euro 6d-TEMP** - Requisiti di emissione Euro 6 completi, ovvero standard di emissione Euro 6c e test RDE su fattori di conformità temporanei.

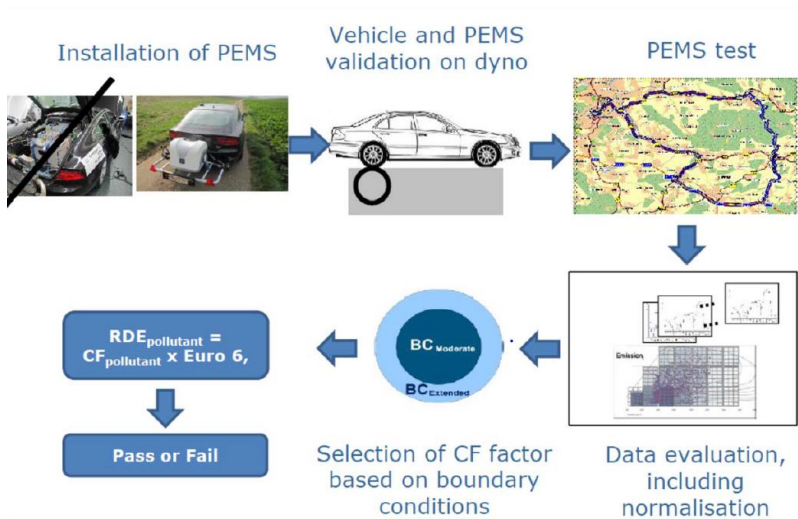
**Euro 6d** - Requisiti di emissione Euro 6 completi, ovvero standard di emissione Euro 6c e test RDE a fronte di fattori di conformità finali.

In particolare, ricordiamoci che:

**Dall'Euro 6b** è obbligatorio utilizzare la **procedura PMP**.

**Dall'Euro 6c** si incomincia a parlare dello **RDE**: è stato introdotto solo a livello di monitoraggio (non obbligatorio). **A partire dall'Euro 6d**, oltre al test in laboratorio sul ciclo WLTC, **è obbligatorio anche lo RDE**. **L'Euro 6d TEMP** rappresenta una via intermedia: si fanno entrambi i test ma si utilizza come **fattore di conformità (CF) un fattore intermedio (temporaneo)**.

### RDE: Real Driving Emissions:



Questo test serve a evitare che il costruttore progetti la vettura esclusivamente in vista del superamento del test effettuato mediante il ciclo WLTC. L'introduzione di questo test ha portato all'equipaggiamento per vetture con motore Diesel di un sistema per il controllo degli NOx After Treatment (SCR, UREA, TNT).

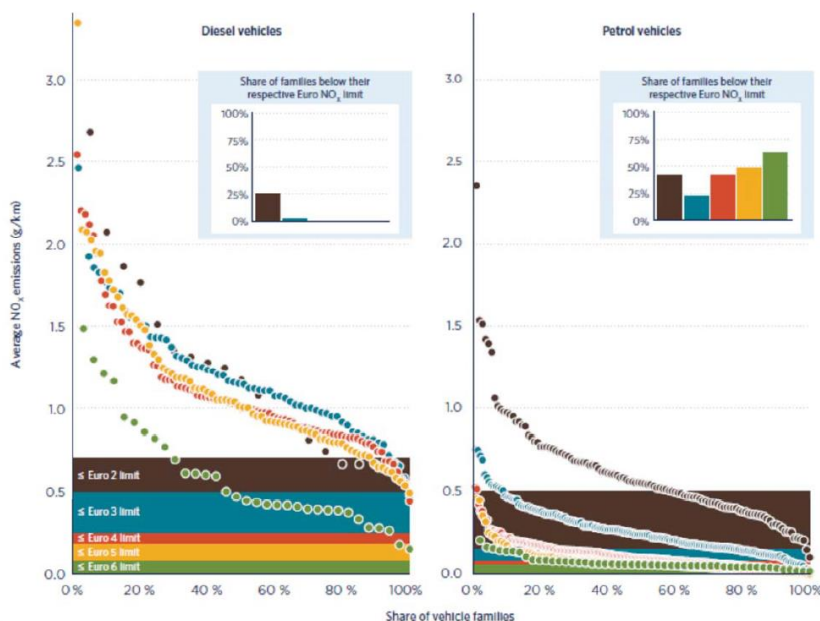
La vettura viene dotata di un sistema PEMS (Portable Emissions Measurement System) **che consente di fare la misura delle emissioni durante la missione**. Sono state fatte una serie di test di validazione di queste tecniche PEMS su banco a rulli. È stato definito un Test PEMS consistente di un percorso con caratteristiche definite. Si estraggono i dati che la vettura ha raccolto. Si verifica che le condizioni vincolanti siano state rispettate durante il Test PEMS. Si elaborano i dati: viene effettuato un calcolo di conversione in cui i limiti Euro 6 vengono moltiplicati per un Fattore di Conformità ( $CF > 1$ ), stabilito dalla legge: se le misure RDE risultano minori allora il Test è superato.



### Giugno 2018: calcolo delle emissioni da parte del consorzio TRUE:

Oltre gli studi condotti dalla CEA sul Test RDE sono stati condotti altri studi fatti da altri enti.

**Il consorzio che si chiama TRUE (The Real Urban Emissions)** ha misurato con tecniche remote, basate sull'utilizzo di sensori, le emissioni delle vetture mentre circolano su strada (senza considerare una percorrenza definita).



La fascia verde rappresenta il limite Euro 6.

Se consideriamo i veicoli a benzina vediamo che il 80% dei veicoli rientra nei limiti fissati Euro 6; il 20% emette un po' di più: se sia dovuto alla vettura o alla condizione di guida non è dato saperlo in questo studio. Tenendo conto del Fattore di Conformità (CF) allora rientrano tutti nei limiti fissati per il Test RDE.

Se invece consideriamo i veicoli a gasolio vediamo che nessun veicolo rispetta il limite Euro 6 e molte poche rientrano nel limite moltiplicato dal Fattore di Conformità (CF).

Studi di questo tipo evidenziamo le **criticità dei veicoli che montano un motore Diesel**; poi bisognerebbe analizzare nel dettaglio la correlazione delle tecniche adottate con quelle previste dalla normativa.

### Fattori di invecchiamento e durabilità:

Per tenere conto dell'invecchiamento del veicolo, quando andiamo a omologare il veicolo, **aumentiamo le emissioni misurate per un fattore di invecchiamento/deterioramento** imposto dalla **Commissione Europea**. Le emissioni così ottenute devono rientrare nei limiti precedentemente esaminati in modo tale che il veicolo, invecchiando, possa continuare a rispettare i limiti. **Il fattore di invecchiamento è diverso per benzina e gasolio e per i diversi inquinanti ed è evoluto nel tempo.**

**Per la benzina, Euro 5/6:** 1.5 per il CO, 1.3 per gli HC, 1.6 per gli NO<sub>x</sub> e 1.0 per il PM;  
(garantiscono il rispetto dei limiti per 160.000 [km] o 5 anni)

**Per il gasolio, a partire dall'Euro 6** non vi è più questo fattore di invecchiamento imposto dalla Commissione Europea ma è il costruttore che lo decide a seguito di opportuni test.

**Con un Test, chiamato di "tipo V"** possiamo analizzare le emissioni effettivamente prodotte dopo 160.000 [km] e vedere se rientrano nei limiti; in alternativa, e più comodamente, utilizziamo i fattori di invecchiamento imposti dalla commissione.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

## Soglie OBD (On Board Diagnostic) per un motore Diesel:

| Category†                     | Class | Stage | Date    | CO    | NMHC‡ | NOx   | PM    |
|-------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Compression Ignition (Diesel) |       |       |         |       |       |       |       |
| M <sub>1</sub>                |       | EU 3  | 2003    | 3.20  | 0.40  | 1.20  | 0.18  |
|                               |       | EU 4  | 2005    | 3.20  | 0.40  | 1.20  | 0.18  |
|                               |       | EU 5  | 2009.09 | 1.900 | 0.320 | 0.540 | 0.050 |
|                               |       | EU 6  | (a)     | 1.900 | 0.320 | 0.240 | 0.050 |
|                               |       |       | 2014.09 | 1.750 | 0.290 | 0.180 | 0.025 |
|                               |       |       | 2017.09 | 1.750 | 0.290 | 0.140 | 0.012 |
| N <sub>1</sub>                | I     | EU 3  | 2005    | 3.20  | 0.40  | 1.20  | 0.18  |
|                               |       | EU 4  | 2005    | 3.20  | 0.40  | 1.20  | 0.18  |
|                               |       | EU 5  | 2009.09 | 1.900 | 0.320 | 0.540 | 0.050 |
|                               |       | EU 6  | (a)     | 1.900 | 0.320 | 0.240 | 0.050 |
|                               |       |       | 2014.09 | 1.750 | 0.290 | 0.180 | 0.025 |
|                               |       |       | 2017.09 | 1.750 | 0.290 | 0.140 | 0.012 |
|                               | II    | EU 3  | 2006    | 4.00  | 0.50  | 1.60  | 0.23  |
|                               |       | EU 4  | 2006    | 4.00  | 0.50  | 1.60  | 0.23  |
|                               |       | EU 5  | 2010.09 | 2.400 | 0.360 | 0.705 | 0.050 |
|                               |       | EU 6  | (a)     | 2.400 | 0.360 | 0.315 | 0.050 |
|                               |       |       | 2015.09 | 2.200 | 0.320 | 0.220 | 0.025 |
|                               |       |       | 2018.09 | 2.200 | 0.320 | 0.180 | 0.012 |
|                               | III   | EU 3  | 2006    | 4.80  | 0.60  | 1.90  | 0.28  |
|                               |       | EU 4  | 2006    | 4.80  | 0.60  | 1.90  | 0.28  |
|                               |       | EU 5  | 2010.09 | 2.800 | 0.400 | 0.840 | 0.050 |
|                               |       | EU 6  | (a)     | 2.800 | 0.400 | 0.375 | 0.050 |
|                               |       |       | 2015.09 | 2.500 | 0.350 | 0.280 | 0.030 |
|                               |       |       | 2018.09 | 2.500 | 0.350 | 0.220 | 0.012 |
| N <sub>2</sub>                |       | EU 5  | 2010.09 | 2.800 | 0.400 | 0.840 | 0.050 |
|                               |       | EU 6  | (a)     | 2.800 | 0.400 | 0.375 | 0.050 |
|                               |       |       | 2015.09 | 2.500 | 0.350 | 0.280 | 0.030 |
|                               |       |       | 2018.09 | 2.500 | 0.350 | 0.220 | 0.012 |

Per esempio: per **motori Diesel Euro 6** la soglia OBD per gli NOx è **140 [mg/km]**; il limite di legge è **80 [mg/kg]**.

La spia di fatto si accende quando la vettura non è più un Euro 6 ma ~Euro 4.

### Emissioni specifiche di CO<sub>2</sub>, Target dei costruttori, ed emissioni specifiche CO<sub>2</sub> effettive:

$$Emissioni\ specifiche\ di\ CO_2 = 130 + 0.0457(M - M_0) \quad \text{deve essere} < \text{limite [g/km]}$$

*M*: massa del veicolo;

*M*<sub>0</sub> = 1372 [kg]: massa di riferimento;

0.0457: fattore che dice ogni kg in più o in meno che malus o bonus ci dà. Esempio se *M* – *M*<sub>0</sub> = 100 [kg] allora il veicolo può emettere 4.57 [g/km] di CO<sub>2</sub> in più.

Emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> è un **target che si pone il costruttore**. Dopo di chè, l'effettiva produzione di CO<sub>2</sub> viene ricavata durante la prova su banco con il WLTC, back correlata sul NEDC.

Da **gennaio 2019** è obbligatorio che tutte le carte di circolazione dei veicoli riportino esclusivamente i valori di CO<sub>2</sub> ottenuti sul WLTP (prima potevano essere ottenuti sul NEDC). La **normativa sulla CO<sub>2</sub>** è stata introdotta **nel 2012**: consisteva di **due step** che dovevano **finire nel 2020**; cosa succede nel periodo di transizione durante il quale, nel 2018, è introdotto il ciclo WLTC per l'omologazione mentre per la CO<sub>2</sub> i limiti sono fissati ancora con il ciclo NEDC? Si calcola tutto sul WLTP, inclusa la CO<sub>2</sub>, poi, per verificare la compatibilità con i livelli di CO<sub>2</sub>, si fa la cosiddetta **Back Correlation** tramite un Software che si chiama **CO2MPAS**, rilasciato dalla **Commissione Europea**: questo Software, noto il valore ottenuto sul ciclo WLTC, stima il valore corrispondente che si otterrebbe con il ciclo NEDC: usiamo questo valore **per certificare** il veicolo fino al 2020. **Dal 2021**, finita la transizione, tutto sarà basato sul ciclo WLTC.

Il valore effettivo viene confrontato con il valore di target: se il valore effettivo è inferiore tutto va bene, altrimenti bisogna prendere dei provvedimenti. La commissione chiede di fare una media su tutto quello che è stato venduto in un anno da parte di un stesso costruttore: se tale media rientra nel limite tutto va bene, altrimenti bisogna pagare una multa alla commissione. **La multa consiste nel pagare per ogni [g/km] in più 95 Euro moltiplicato il numero di veicoli venduti**:

$$multa = [g/km]_{CO_2\ in\ più} \cdot x[Euro] \cdot n_{veicoli\ venduti\ nell'anno}$$

#### Evoluzione del prezzo della multa:

**2012 - 2018**: *x* = 5€ per il 1° grammo in più; 15€ per il 2° grammo; 25€ per il 3° grammo; 95€ dal 4° grammo;

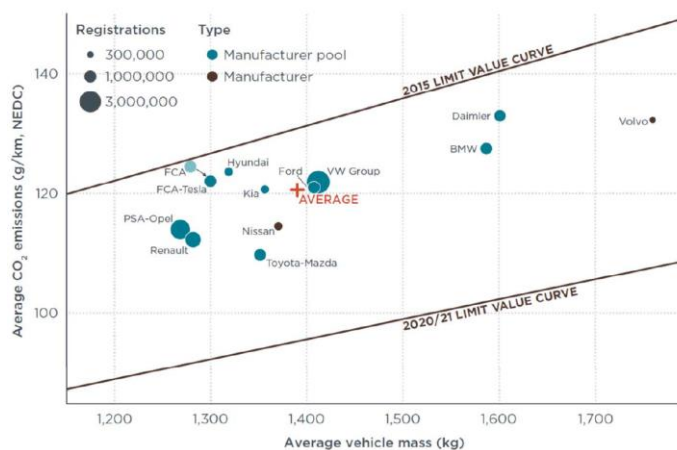
**Dal 2019**: *x* = 95€ per ogni grammo in più.

#### Evoluzione del limite fissato dalla Commissione:

**Step 1 (/Set 1)**: dal 2012 il limite è fissato a 130 [g/km] di CO<sub>2</sub> (prima normativa introdotta);

**Step 2 (/Set2)**: dal 2020 il limite è fissato a 95 [g/km] di CO<sub>2</sub>;

**Step 3 (/Set 3)**: dal 2025: - 15% rispetto al 2021 (rispetto ai 95 [g/kg] sul NEDC) → 81 [g/km] su NEDC;  
dal 2030: - 37.5% rispetto al 2021 (rispetto ai 95 [g/kg] sul NEDC) → 59 [g/km] su NEDC;



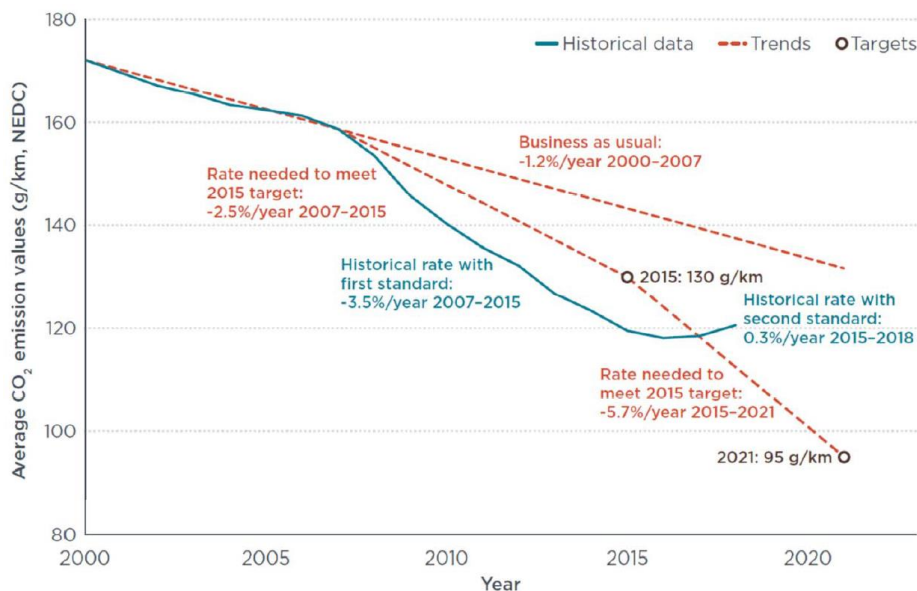
Dove siamo "oggi"?

Il diagramma si riferisce al 2015.  
(Massa media: 1372 [kg]):

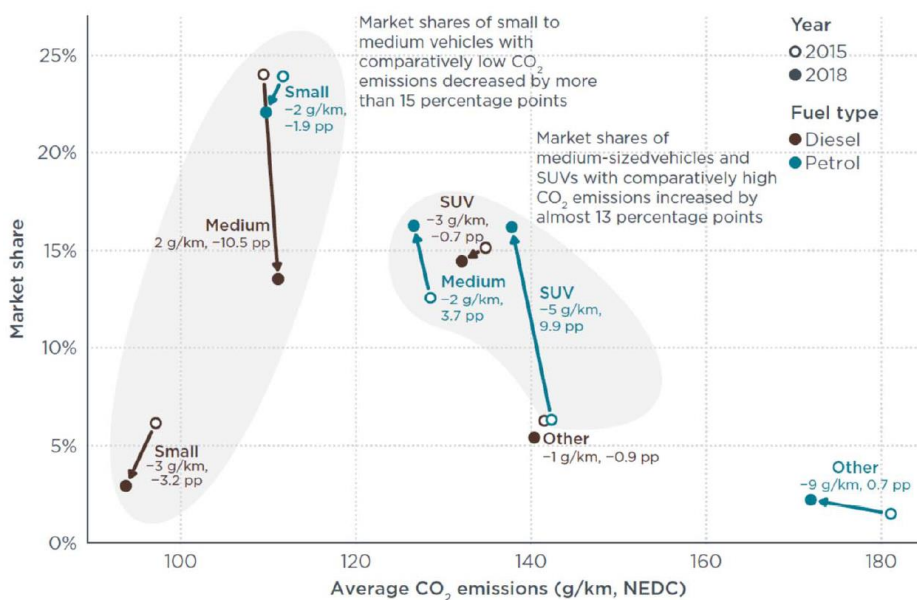
Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Risultati:**

Da quando è stata introdotta la normativa, considerando anche gli sgravi permessi dalla commissione, c'è stata una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> piuttosto importante. Il target dei 130 [g/km] è stato ampiamente raggiunto. Tra il 2015 e il 2018 riscontriamo un leggera risalita dovuta al fatto la che % di veicoli Diesel venduti è diminuita per tanti motivi, favorendo così un aumento delle vendite dei veicoli a benzina, la cui produzione di CO<sub>2</sub> è più alta, anche per via dei cambiamenti del market share e in generale per l'aumento delle dimensioni medie dei veicoli.



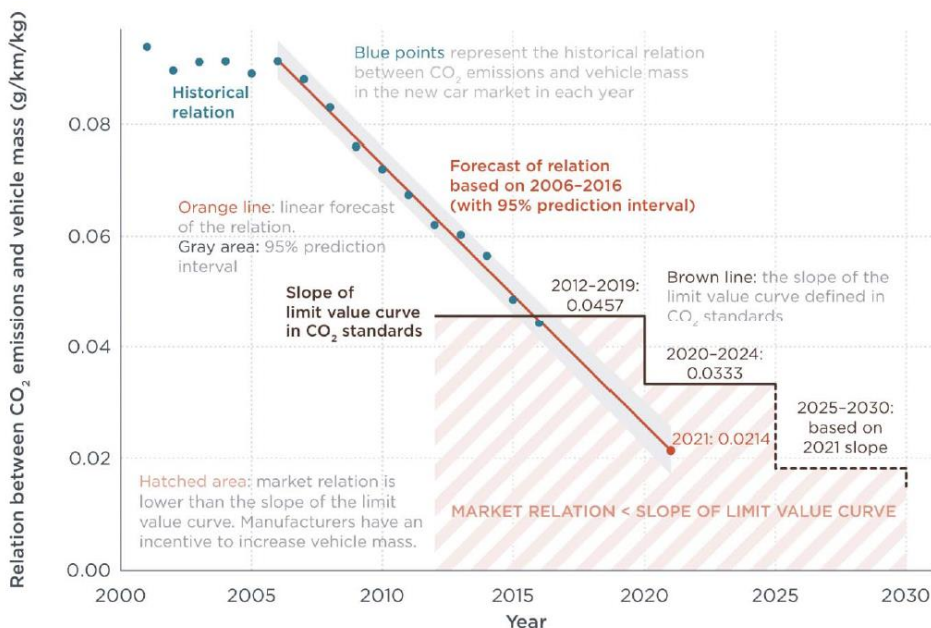
**Market share:**



Tra il 2015 e il 2018 sono aumentate le vendite dei veicoli pesanti, quali i SUV.

**Set 3: nuova linea di pendenza (relazione tra emissioni di CO<sub>2</sub> e massa del veicolo):**

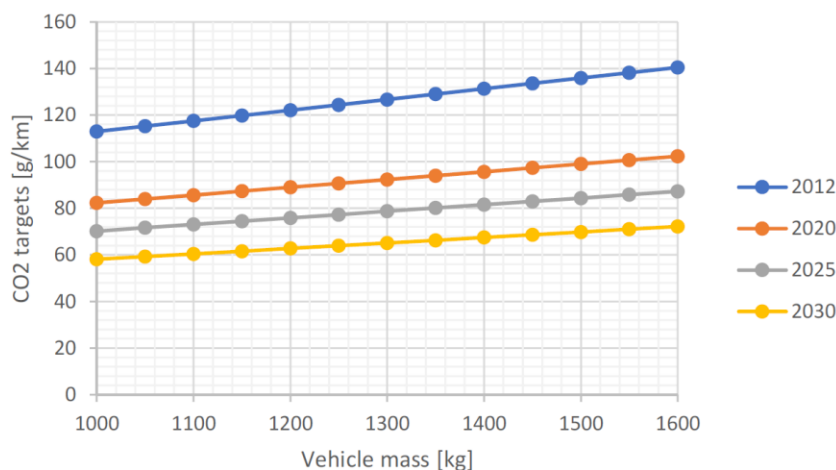
Un altro aspetto che introduce la nuova normativa Set 3 è il cambio della linea di pendenza. La linea di pendenza ci diceva che aumentando di  $(M - M_0) = 100 [kg]$  il peso di una vettura, le emissioni di CO<sub>2</sub> (target) sarebbero aumentate di 4.57 [g/km].



La linea di pendenza esprimeva relazione storica tra emissioni di CO<sub>2</sub> e massa del veicolo, considerando il venduto. Negli anni, notiamo che la curva è in diminuzione: migliorando le tecnologie, nel 2016 ci si è accorti che, aumentando la massa del veicolo di 100 [kg] le emissioni non aumentavano di 4.57 [g/km], ma di 4 [g/km]: dunque poteva essere conveniente appesantire la vettura.

Allora, dal 2020, la Commissione Europea cambia la curva: la pendenza non sarà più rappresentata da 0.0457 ma da 0.0333. Quindi per ogni 100[kg] in più, aumenta di 3.33[g/km]. La Commissione Europea prevede di rivedere questo numero nel 2025.

**Relazione tra emissioni di CO<sub>2</sub> e massa del veicolo:**



Considerando la curva grigia relativa al 2025: non soltanto scenderà del 15% il limite rispetto al 2021 (2020) ma si appiattirà anche un po' la curva (la curva gialla relativa al 2030 potrà essere in realtà un po' più piatta).

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Dopo di chè il bonus è +0% se non raggiungiamo il target oppure se raggiungiamo esattamente il 15%; se raggiungiamo il 20% prendiamo un bonus +5%. Tra il 15 e il 20%: andamento lineare. Lo stesso discorso vale per il bonus del 2035.



**LDV: Light Duty Vehicles:**

Vale esattamente lo stesso discorso, ma cambiano i target.

Per quanto riguarda il Set 1: **mentre quello per le autovetture è stato introdotto nel 2012, questo viene introdotto nel 2017** (normativa per i LDV introdotta 5 anni dopo). Il limite anziché essere 130 [g/km] è **175 [g/km]**. La pendenza anziché essere 0.0457 è **0.093** e la massa  $M_0$  invece di essere 1372 [kg] è **1706 [kg]**.

$$Emissioni\ specifiche\ di\ CO_2 = 175 + 0.093(M - M_0) \quad \text{deve essere} < \text{limite [g/km]}$$

Anche per gli LDV si prevede nel 2025 e nel 2030 una diminuzione del target 130 [g/km]: **nel 2025: -15%, come per le autovetture, mentre nel 2030: -31%, un po' meno rispetto alle autovetture (-37.5%)** (questi valori sono frutto di analisti, proposte da parte della commissione e controproposte da parte die costruttori).

Anche per i LDV il valore della pendenza viene aggiornato, a **0.096, valido fino al 2024, e vale il discorso degli ZLEV.**



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Tier 3:**

la Classe Tier 3 è stata **proposta nel 2013 dall'EPA** e, attraverso un successivo processo normativo, sono stati emanati gli Standard federali che sono stati **introdotti a partire dal 2017**; ci sarà un periodo transitorio che durerà fino al 2025 in cui, progressivamente, questi standard andranno a regime e saranno in vigore.

Gli standard sono classificati a "bidoni" (Bin) / "contenitori":

Tier 3 Certification bin standards (FTP; 150,000 miles)

| Bin     | NMOG+NOx | PM*   | CO   | HCHO  |
|---------|----------|-------|------|-------|
|         | mg/mi    | mg/mi | g/mi | mg/mi |
| Bin 160 | 160      | 3     | 4.2  | 4     |
| Bin 125 | 125      | 3     | 2.1  | 4     |
| Bin 70  | 70       | 3     | 1.7  | 4     |
| Bin 50  | 50       | 3     | 1.7  | 4     |
| Bin 30  | 30       | 3     | 1.0  | 4     |
| Bin 20  | 20       | 3     | 1.0  | 4     |
| Bin 0   | 0        | 0     | 0    | 0     |

\* In MYs 2017-20, the PM standard applies only to that segment of a manufacturer's vehicles covered by the percent of sales phase-in for that model year, Table 3.

| Tier 3 certification bin standards in mg/km |          |      |      |      |
|---|----------|------|------|------|
|   | NMOG+NOx | PM*  | CO   | HCHO |
| mg/km                                       |          |      |      |      |
| Bin 160                                     | 99.42    | 1.86 | 2.61 | 2.49 |
| Bin 125                                     | 77.67    | 1.86 | 1.30 | 2.49 |
| Bin 70                                      | 43.50    | 1.86 | 1.06 | 2.49 |
| Bin 50                                      | 31.07    | 1.86 | 1.06 | 2.49 |
| Bin 30                                      | 18.64    | 1.86 | 0.62 | 2.49 |
| Bin 20                                      | 12.43    | 1.86 | 0.62 | 2.49 |
| Bin 0                                       | 0.00     | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Per ciascun **Bin** sono fissati dei valori di riferimento per le emissioni; la prima colonna riguarda un limite sulla somma **NMOG + NOx**; sono messi insieme in quanto sono i principali responsabili dello smog fotochimico; troviamo inoltre i limiti per il **PM**, il **CO** e gli **HCOH** (aldeidi). Il nome della classe Bin corrisponde con il limite **NMOG + NOx**.

Un costruttore può decidere in quale categoria omologare il veicolo, a patto che ne rispetti i limiti; La media del venduto in un anno solare deve essere pari o inferiore alla **soglia del Bin 30**, ovvero < 30 [mg/mi] di **NMOG + NOx**.

I limiti sulla media sulla flotta di **NMOG + NOx** sono progressivamente decrescenti da qui al **2025** fino ad arrivare a **30 [mg/mi]** (Phase-in).

Tier 3 fleet average NMOG+NOx FTP standards (mg/mi)

| Vehicle Category       | 2017* | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| LDV, LDT1              | 86    | 79   | 72   | 65   | 58   | 51   | 44   | 37   | 30   |
| LDT2, LDT3, LDT4, MDPV | 101   | 92   | 83   | 74   | 65   | 56   | 47   | 38   | 30   |

\* For LDVs and LDTs over 6,000 lbs GVWR and MDPVs, the fleet average standards apply beginning in MY 2018.

Phase-in of Tier 3 PM FTP standards (mg/mi)

| Phase-In               | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Percentage of sales    | 20%* | 20%  | 40%  | 70%  | 100% | 100% |
| Certification standard | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    |
| In-use standard        | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 3    |

\* Manufacturers comply in MY 2017 with 20% of their LDV and LDT fleet under 6,000 lbs GVWR, or alternatively with 10% of their total LDV, LDT, and MDPV fleet

La normativa Tier 3 prevede un limite per il **particolato (PM) pari a 3 [mg/mi]**: Non si applica al 100% dei veicoli ma a una % crescente con il passar degli anni (**a regime nel 2022**) (in questo caso, invece del limite, è stato rilassato la % di veicoli che deve rispettarlo).



**Standard CAFE dal 1978:**

| Year | Cars | Light Trucks |      |      |
|------|------|--------------|------|------|
|      |      | Combined     | 2WD  | 4WD  |
| 1978 | 18.0 |              |      |      |
| 1979 | 19.0 |              | 17.2 | 15.8 |
| 1980 | 20.0 |              | 16.0 | 14.0 |
| 1981 | 22.0 |              | 16.7 | 15.0 |
| 1982 | 24.0 | 17.5         | 18.0 | 16.0 |
| 1983 | 26.0 | 19.0         | 19.5 | 17.5 |
| 1984 | 27.0 | 20.0         | 20.3 | 18.5 |
| 1985 | 27.5 | 19.5         | 19.7 | 18.9 |
| 1986 | 26.0 | 20.0         | 20.5 | 19.5 |
| 1987 | 26.0 | 20.5         | 21.0 | 19.5 |
| 1989 | 26.5 | 20.5         | 21.5 | 19.0 |
| 1990 | 27.5 | 20.0         | 20.5 | 19.0 |
| 1991 | 27.5 | 20.2         | 20.7 | 19.1 |
| 1992 | 27.5 | 20.2         |      |      |
| 1993 | 27.5 | 20.4         |      |      |
| 1994 | 27.5 | 20.5         |      |      |
| 1995 | 27.5 | 20.6         |      |      |
| 1996 | 27.5 | 20.7         |      |      |
| 2005 | 27.5 | 21.0         |      |      |
| 2006 | 27.5 | 21.6         |      |      |
| 2007 | 27.5 | 22.2         |      |      |
| 2008 | 27.5 | 22.5         |      |      |
| 2009 | 27.5 | 23.1         |      |      |
| 2010 | 27.5 | 23.5         |      |      |
| 2011 | 27.5 | a            |      |      |

a Reformed CAFE standards

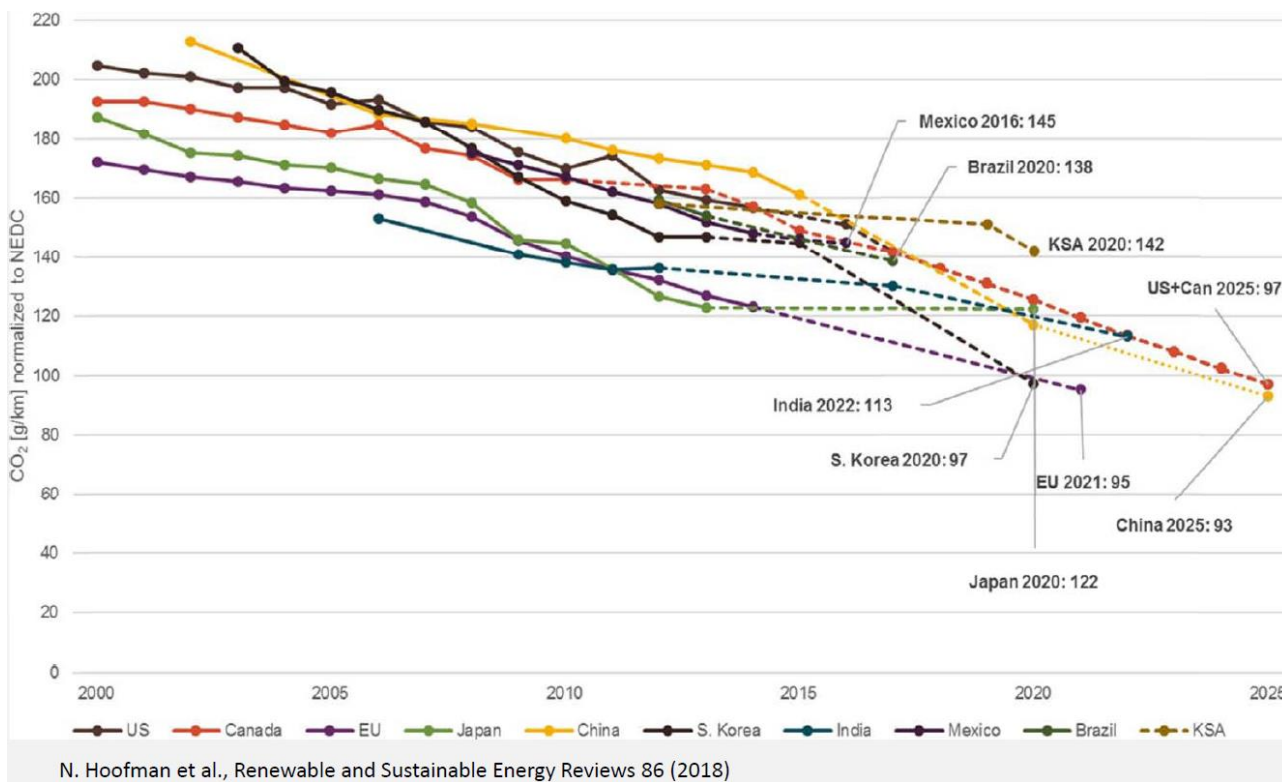
**CAFE riformata:**

**Nel 2011 è stata introdotta la normativa CAFE riformata (Reformed CAFE).**

- È stato esteso il set di veicoli a cui si applica: non solo più alle autovetture ma anche ai **Light Trucks**;
- I limiti sono stati ulteriormente inaspriti;
- I limiti sono resi variabili in funzione di un **Utility Factor**: in Europa il limite di legge sulla CO<sub>2</sub> è medio, fissato a 130, modulato in funzione al peso; negli Stati Uniti, dal 2012, vale un discorso analogo: anziché modulare in funzione al peso, si modula in funzione dell'**impronta a terra**. L'impronta a terra (vehicle's footprint) è l'area di un rettangolo che ha un lato pari alla distanza tra i centri tra le ruote e l'altro è la distanza tra gli assali anteriore e posteriore. Se utilizziamo come utility factor la massa appesantire o alleggerire vuol dire che consumiamo di più / di meno ma contestualmente andiamo a cambiare il target, per cui se non viene ben modulato corriamo il rischio di rendere favorevole l'appesantimento; se invece utilizziamo l'impronta a terra e se a parità di impronta cambiamo il peso, alleggerendo il veicolo, il guadagno è maggiore (il **target non cambia**, ma avendo alleggerito il veicolo emetto e consumo di meno).

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Overview a livello mondiale:



Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Standard:**

Anche in questo caso, come per le autovetture, vi è una prima colonna che definisce la Classe (Stage), una colonna per la Data di introduzione dello standard, una colonna con il Ciclo omologativo di riferimento, quindi la procedura di prova utilizzata, e le colonne con i limiti emissivi, espressi in [g/kWh].

Una differenza importante consiste nel fatto che per i veicoli pesanti la certificazione viene fatta sul motore e non sul veicolo. Un veicolo HD non viene venduto in una configurazione standard ma è molto spesso customizzato; quindi, se venisse richiesta una certificazione sul veicolo, si avrebbe un importante aumento di costi (a ogni richiesta di veicolo allestito in un certo modo bisognerebbe fare un'omologazione).

Dunque l'omologazione si fa a **livello di motore su banco dinamometrico**. Dal momento che il motore sta fermo non parliamo più di [g/km] ma di [g/kWh].

Solitamente i combustibili utilizzati per le applicazioni Heavy Duty sono il gasolio e il gas naturale (compresso o liquido). Qui sono presenti due test emissivi diversi: **Steady-State Testing** e **Transient Testing**. Un veicolo HD spende molto tempo in condizioni di funzionamento fisse. Il **Transient Testing** è stato introdotto dall'**Euro III**. **Avere una procedura Worldwild, o per lo meno un ciclo Worldwide, è stata un'esigenza sentita dai costruttori specialmente per i veicoli HD; infatti il WHSC viene introdotto prima del WLTC.**

EU Emission Standards for Heavy-Duty Diesel Engines: Steady-State Testing

| Stage    | Date             | Test     | CO        | HC   | NOx  | PM    | PN                   | Smoke |      |
|----------|------------------|----------|-----------|------|------|-------|----------------------|-------|------|
|          |                  |          | g/kWh     |      |      |       | 1/kWh                | 1/m   |      |
| Euro I   | 1992, ≤ 85 kW    | ECE R-49 | 4.5       | 1.1  | 8.0  | 0.612 |                      |       |      |
|          | 1992, > 85 kW    |          | 4.5       | 1.1  | 8.0  | 0.36  |                      |       |      |
| Euro II  | 1996.10          |          | 4.0       | 1.1  | 7.0  | 0.25  |                      |       |      |
|          | 1998.10          |          | 4.0       | 1.1  | 7.0  | 0.15  |                      |       |      |
| Euro III | 1999.10 EEV only |          | ESC & ELR | 7.5  | 0.25 | 2.0   | 0.02                 |       | 0.15 |
|          | 2000.10          |          |           | 2.1  | 0.66 | 5.0   | 0.10 <sup>a</sup>    |       | 0.8  |
| Euro IV  | 2005.10          | 1.5      |           | 0.46 | 3.5  | 0.02  |                      | 0.5   |      |
| Euro V   | 2008.10          | 1.5      |           | 0.46 | 2.0  | 0.02  |                      | 0.5   |      |
| Euro VI  | 2013.01          | WHSC     | 1.5       | 0.13 | 0.40 | 0.01  | 8.0×10 <sup>11</sup> |       |      |

a - PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>

EU Emission Standards for Heavy-Duty Diesel and Gas Engines: Transient Testing

| Stage    | Date             | Test | CO    | NMHC              | CH <sub>4</sub> <sup>a</sup> | NOx  | PM <sup>b</sup>   | PN <sup>c</sup>      |
|----------|------------------|------|-------|-------------------|------------------------------|------|-------------------|----------------------|
|          |                  |      | g/kWh |                   |                              |      |                   | 1/kWh                |
| Euro III | 1999.10 EEV only | ETC  | 3.0   | 0.40              | 0.65                         | 2.0  | 0.02              |                      |
|          | 2000.10          |      | 5.45  | 0.78              | 1.6                          | 5.0  | 0.16 <sup>c</sup> |                      |
| Euro IV  | 2005.10          |      | 4.0   | 0.55              | 1.1                          | 3.5  | 0.03              |                      |
| Euro V   | 2008.10          |      | 4.0   | 0.55              | 1.1                          | 2.0  | 0.03              |                      |
| Euro VI  | 2013.01          | WHTC | 4.0   | 0.16 <sup>d</sup> | 0.5                          | 0.46 | 0.01              | 6.0×10 <sup>11</sup> |

a - for gas engines only (Euro III-V: NG only; Euro VI: NG + LPG)

b - not applicable for gas fueled engines at the Euro III-IV stages

c - PM = 0.21 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>

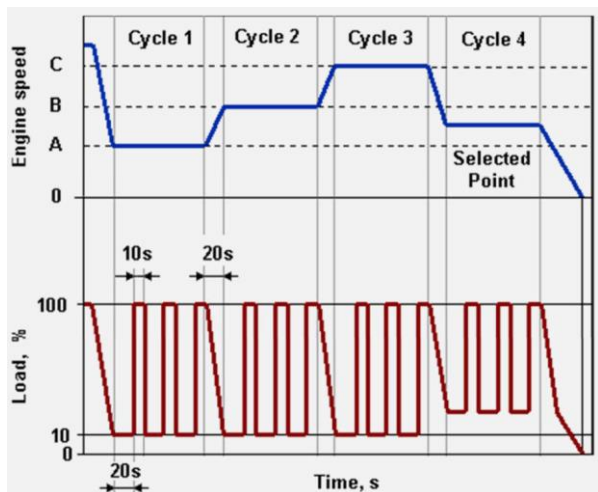
d - THC for diesel engines

e - for diesel engines; PN limit for positive ignition engines TBD

**La regolamentazione Euro VI include anche dei limiti per l'ammoniaca.** Come vedremo, esistono dei sistemi di Post-trattamento nei veicoli Diesel che controllano gli NOx iniettando ammoniaca allo scarico. L'ammoniaca reagisce con gli NOx e si riduce; se non avviene questa reazione possiamo trovare anche l'ammoniaca, come inquinante, allo scarico. **Inoltre prevede test come l'OBd**, Test legati alla durability e ulteriori disposizioni accessorie.

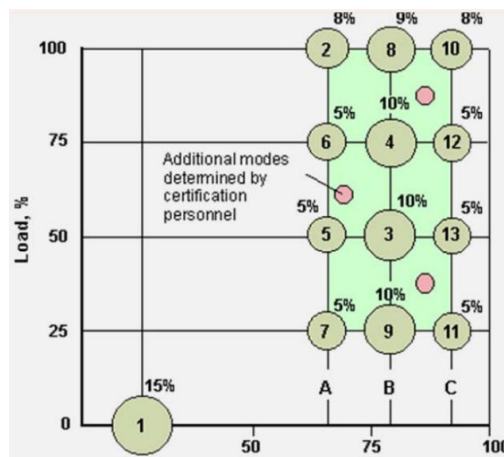
### Ciclo ELR (European Load Response cycle):

Accanto a questo ciclo Steady, tra l'Euro III e l'Euro VI, veniva condotto un test su un altro ciclo Steady, chiamato ELR (European Load Response). Quando si è passati dall'ECE R49 al ciclo ESC, è stato introdotto in parallelo il ciclo ELR. Un veicolo HD è spesso soggetto a delle variazioni di carico a velocità costante: dunque questa prova simulava il comportamento del motori in date condizioni. Venivano condotte diverse prove in cui la velocità era mantenuta costante e per ciascun tratto, a velocità costante, venivano fatte **brusche variazioni del carico**. In questa prova non venivano misurati tutti gli inquinanti ma **era misurata solo l'opacità dei fumi**. Dunque questo test utilizzava come strumento **l'opacimetro**. I limiti di legge erano dati in termini di opacità o coefficiente di estinzione (segnato in tabella con "Smoke" [1/m]).



### Ciclo WHSC (World Harmonized Stationary Cycle):

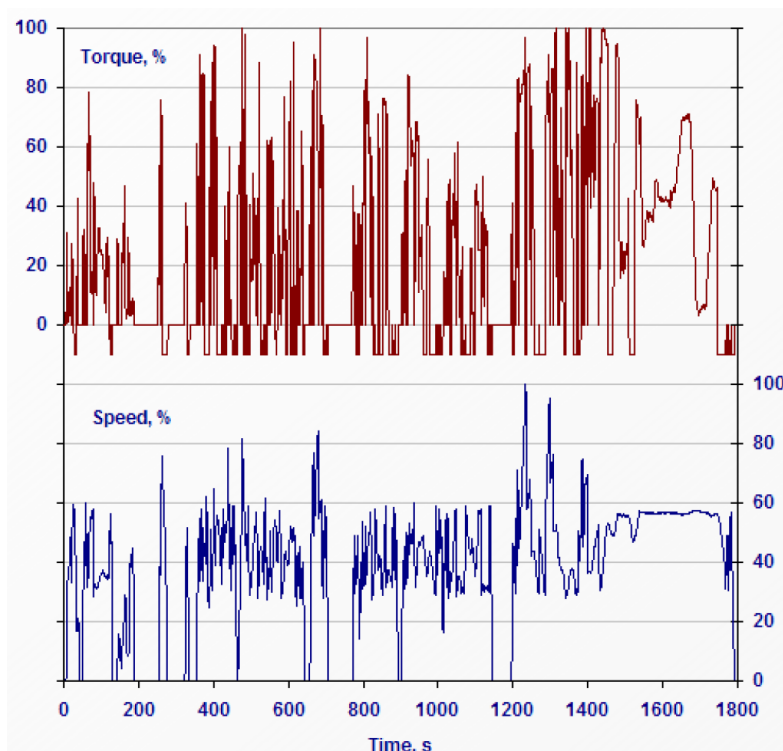
A partire dall'Euro VI, il ciclo ELR non viene più condotto in Europa (ci possono essere Paesi nel mondo che adottano ancora le normative per gli standard Euro III e IV). **Nel 2012 – 2013 viene introdotto il ciclo WHSC:** World Harmonized Stationary Cycle. **Non viene più misurata l'opacità ma viene introdotto il numero di particelle.** È un ciclo uguale identico al ciclo ESC, a 13 modi, con area di controllo modificata. La differenza **consiste nel fatto che il ciclo è "rampato"**. Nel ciclo ESC mettevamo il motore nelle condizioni rappresentate da un punto di funzionamento, modo 1 per esempio, venivano misurate le emissioni, si interrompeva la raccolta delle emissioni in suddette condizioni stazionarie; intanto il motore veniva portato nelle condizioni del modo 2 e, una volta raggiunte, iniziava la raccolta nelle nuove condizioni e così via. **Con il WHSC vengono raccolte e misurate anche le emissioni prodotte per passare da un modo all'altro: dunque la misura non viene interrotta finché non sono passati in rassegna tutti i modi.** Viene misurata in continuazione anche la **potenza del motore** la quale, **integrata**, ci permette di ricavare le **emissioni in [g/kWh]** (emissioni complessive diviso la potenza integrata) (anziché considerare le emissioni per ogni punto motore, legate quindi a una certa potenza, per poi sommarle, ma procediamo con un calcolo integrale). Per tener conto dei pesi, questi saranno influenzati dalla durata di ciascun modo. I **pesi** (la grandezza dei pallini rappresentativi dei modi) **rappresentano il tempo in cui il motore viene mantenuto in un determinate condizioni** (il 10% del tempo il motore è mantenuto nelle condizioni del modo 3, il 5%, del modo 6, ...).





### Ciclo WHTC (World Harmonized Transient Cycle):

A partire dall'Euro VI il ciclo ETC viene sostituito dal ciclo WHTC: su banco dinamometrico viene fatto percorrere al motore un profilo di velocità e coppia che ripercorre un ciclo guida di riferimento che dovrebbe realizzare il veicolo.



### Ulteriori Test richiesti dalla normativa Euro VI (NTE e Verifica di conformità mediante PEMS):

La normativa Euro VI introduce anche altre specifiche:

- **NTE Test: Not To Excede Test:** si tratta di test di laboratorio in cui occorre verificare che al di fuori dei 13 modi il motore non ecceda un massimo limite emissivo.
- **Verifica delle emissioni Off-Cycle mediante PEMS (Portable Emissions Measurement Systems)** come sulle autovetture. Vengono identificati i fattori di conformità e le soglie che non devono essere superate.

Nota: inoltre, come per le autovetture, la normativa prevede il concetto di **OBD, On Board Diagnostic**: il veicolo deve essere dotato di dispositivi che, se verificano delle anomalie di funzionamento di parti del motore o nel sistema di After Treatment che impattino sulle emissioni, avvisi l'utente e lo costringa ad andare in assistenza, de-tarando le prestazioni del veicolo.

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Introduzione della normativa:**

A partire dagli anni '90 questa tendenza si è un po' appiattita perché sono stati introdotti dei limiti sugli inquinanti, comportando efficienze minori. Si ha incominciato a dover trovare dei compromessi tra emissioni e consumi (Trade off). Cercando di rispettare i target emissivi cerchiamo anche di non aumentare i consumi (ecco che il trend si è appiattito).

Da qui in avanti si prevede che lo standard emissivo rimanga più o meno invariato per quanto riguarda le emissioni di inquinanti mentre la commissione europea incomincia a focalizzare l'attenzione sulle emissioni di  $CO_2$ .

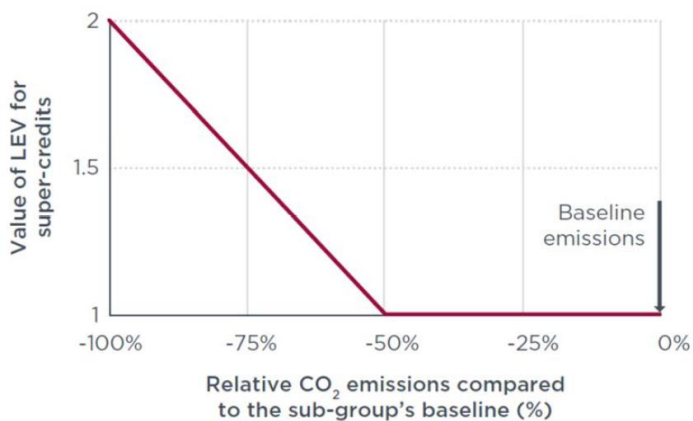
La **delibera** sulla normativa sulla  $CO_2$  risale al **19 febbraio 2019**. Sono stati determinati dei target per quanto riguarda le emissioni di  $CO_2$  da parte dei veicoli Heavy Duty: **riduzione del 15% nel 2025 e del 30% nel 2030**. La **base di riferimento** va calcolata: a partire dal 1° luglio 2019 fino al luglio 2020 viene calcolata questa base. **Per ogni costruttore** viene dunque calcolata la base; successivamente si farà una media e verranno così definiti i target per il 2025 e il 2030. La regolamentazione per il monitoraggio e reporting per il successivo calcolo della base originariamente doveva entrare in vigore entro gennaio 2019 ma è stata ritardata di 6 mesi.

| Axle type | Chassis configuration | Gross vehicle weight (tonnes) | Vehicle groups | Date of certification requirement   |
|-----------|-----------------------|-------------------------------|----------------|---|
| 4x2       | Rigid                 | >3.5 - <7.5                   | 0              | Not considered by the certification regulation  |
|           | Rigid/Tractor         | 7.5 - 10                      | 1              | January 1, 2020 for all new registrations.  |
|           | Rigid/Tractor         | >10 - 12                      | 2              |   |
|           | Rigid/Tractor         | >12 - 16                      | 3              |   |
|           | Rigid                 | >16                           | 4              | January 1, 2019 for new produced vehicles.<br>July 1, 2019 for all new registrations. |
|           | Tractor               | >16                           | 5              |   |
| 4x4       | Rigid                 | 7.5 - 16                      | 6              | Not considered by the certification regulation  |
|           | Rigid                 | >16                           | 7              |   |
|           | Tractor               | >16                           | 8              |   |
| 6x2       | Rigid                 | all weights                   | 9              | January 1, 2019 for new produced vehicles.<br>July 1, 2019 for all new registrations. |
|           | Tractor               | all weights                   | 10             |   |
| 6x4       | Rigid                 | all weights                   | 11             | July 1, 2020 for new registrations.   |
|           | Tractor               | all weights                   | 12             |   |
| 6x6       | Rigid                 | all weights                   | 13             | Not considered by the certification regulation  |
|           | Tractor               | all weights                   | 14             |   |
| 8x2       | Rigid                 | all weights                   | 15             | July 1, 2020 for new registrations.   |
| 8x4       | Rigid                 | all weights                   | 16             |   |
| 8x6/8     | Rigid                 | all weights                   | 17             | Not considered by the certification regulation  |

Note: Only the highlighted vehicle groups form part of the scope of the HDV  $CO_2$  standards.

In arancione sono riportati i veicoli ai quali verrà applicata questa normativa: veicoli dei **gruppi 4, 5, 9, 10**; queste categorie sono state scelte in quanto da sole coprono **l'80% dei veicoli HD circolanti**. Prossimamente verrà **esteso ai gruppi 1, 2, 3, 11, 12 e 16**. Quindi, progressivamente, verrà applicata a tutto il parco circolante.

**ZLEV: Super-credit phase (2019-2024):**



$$ZLEV\ factor = \frac{V}{V_{conv} + ZLEV_{in} + ZEV_{out}}$$

*V*: numero totale di HDV;

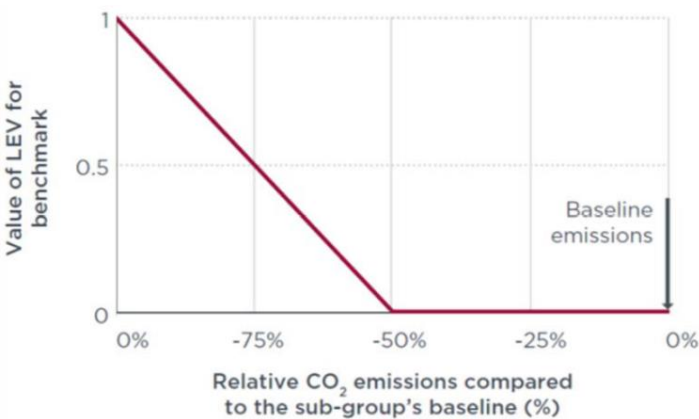
*V<sub>conv</sub>*: numero di HDV con powertrain convenzionale;

*ZLEV<sub>in</sub>*: numero risultante di veicoli ZLEV all'interno dei gruppi regolamentati considerando i super crediti;

*ZEV<sub>out</sub>*: numero risultante considerando il numero di veicoli ZEV venduti al di fuori dei gruppi regolamentati, moltiplicato per 2 (quindi anche se non fanno parte dei gruppi regolamentati vengono contati lo stesso).

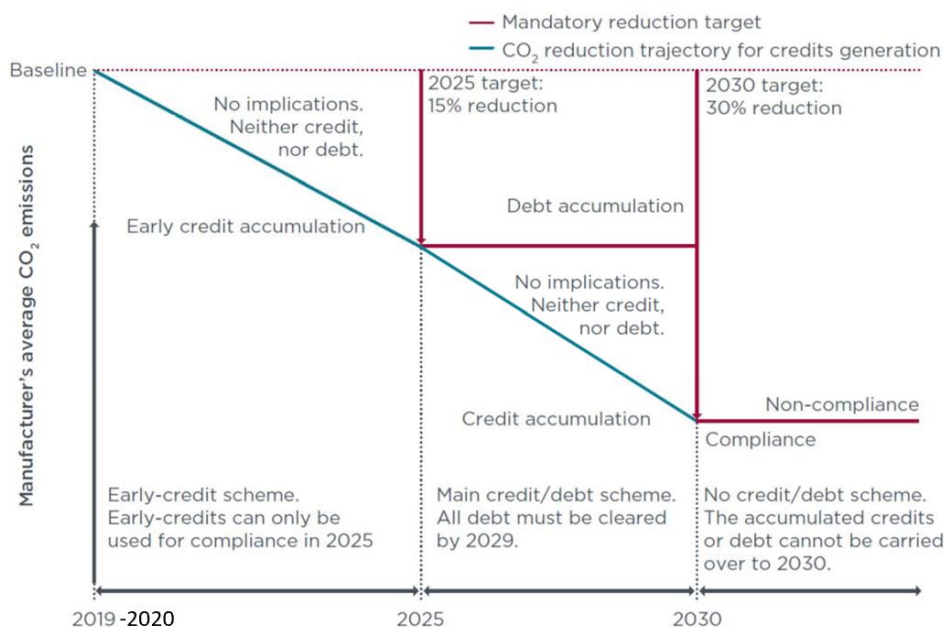
**ZLEV: Benchmark phase (dal 2025):**

Dopo il 2024 ci sarà un meccanismo analogo in cui cambia il conto per ricavare lo ZLEV factor da moltiplicare per la Base line del singolo costruttore.



$$ZLEV\ factor = 1 - (ZLEV_{sales\ share} - 2\%)$$

### Soglie 2025 e 2030:



Guardando alla soglia del 2030 sembrerebbe tutto chiaro: potremo essere sopra (non-compliance) o sotto la soglia (compliance). Se si sarà sopra la soglia si pagherà una multa a oggi fissata a 6.800 [Euro] per veicolo per [gCO<sub>2</sub>/t-km] di emissioni in eccesso. Fissati i limiti tracciamo **due rette di tendenza**. Dalla fine del periodo di monitoraggio fino al 2025 vediamo una zona del diagramma chiamata **“Early credit accumulation”**: per ogni anno si faranno questi conti e si confronteranno con il target corrispondente. Se un costruttore, in un certo anno, produrrà più CO<sub>2</sub> rispetto al suo target, non succede niente (no implications); se invece produrrà meno CO<sub>2</sub> allora potrà accumulare dei crediti. Quando arriverà il 2025 potrà usare questi crediti per rispettare il limite imposto dalla normativa. Dal 2025 in avanti si continuerà con un meccanismo simile: si azzerano i crediti precedenti; se il costruttore si manterrà sotto il target accumulerà crediti; se si troverà al di sopra del target della linea di tendenza (linea blu) ma al di sotto del limite del 2025, non succederà niente (No implications); se invece si troverà al di sopra del target precedente fissato nel 2025 allora accumulerà debiti. Nel 2030 se si avranno dei crediti questi potranno essere usati per rientrare in una zona al di sotto del limite fissato per il 2030, per evitare la multa di **6.800 [Euro]** per veicolo per [gCO<sub>2</sub>/t-km] di emissioni in eccesso calcolate nell’anno 2030. **Se invece, arrivati al 2030, si ha un eccesso di debiti accumulati**, i costruttori saranno tenuti a pagare una penalità per veicolo di **4.250 [Euro]** per ogni [gCO<sub>2</sub>/t-km] di emissioni in eccesso **nel periodo 2025-2029**. Successivamente si azzerano i crediti e i debiti e si procederà con l’evoluzione della normativa. (Nota: i crediti e i debiti non possono essere condivisi da più costruttori)

[Domanda (19) per il Prof.: non ho capito se nel 2025 paghiamo la multa di 6.800 [Euro] per veicolo per [gCO<sub>2</sub>/t-km] di emissioni in eccesso (rispetto al limite calcolato per il 2025) come a partire dal 2030. Perché da un lato mi pare di capire che gli eventuali crediti accumulati prima del 2025, e non più validi oltre il 2025, servono appunto come bonus per far rientrare il costruttore nel limite fissato al 2025; quindi, tenendo conto del fatto che verranno riazzerati, al costruttore interessa portarsi avanti accumulando crediti perché diversamente pagherebbero già una multa nel 2025; dall’altra parte sembrerebbe che tale sistema serva per “alleggerire” i costruttore per permettergli più tempo per mettersi a norma, e in tal caso allora perché fargli pagar già una multa così severa nel 2025? E se non fosse così, cioè, in ogni caso nel 2025 nessuna maxi multa, allora, a cosa servono i crediti accumulati prima del 2025 se poi verranno azzerati [1:00:38]? Forse che sia che i crediti che si accumulano prima del 2025 servono per evitare di pagare la penalità per veicolo di 4.250 [Euro] per ogni [gCO<sub>2</sub>/t-km] di emissioni in eccesso già nel 2025? In attesa di un chiarimento credo che la interpreterò così.]

Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

**Table 3**  
Stage III B Standards for Nonroad Engines

| Cat.                  | Net Power     | Date    | CO           | HC   | NO <sub>x</sub> | PM    |
|-----------------------|---------------|---------|--------------|------|-----------------|-------|
|                       | <i>kW</i>     |         | <i>g/kWh</i> |      |                 |       |
| L                     | 130 ≤ P ≤ 560 | 2011.01 | 3.5          | 0.19 | 2.0             | 0.025 |
| M                     | 75 ≤ P < 130  | 2012.01 | 5.0          | 0.19 | 3.3             | 0.025 |
| N                     | 56 ≤ P < 75   | 2012.01 | 5.0          | 0.19 | 3.3             | 0.025 |
| P                     | 37 ≤ P < 56   | 2013.01 | 5.0          | 4.7† |                 | 0.025 |
| † NO <sub>x</sub> +HC |               |         |              |      |                 |       |

Stage IV Standards for Nonroad Engines

| Cat. | Net Power     | Date    | CO           | HC   | NO <sub>x</sub> | PM    |
|------|---------------|---------|--------------|------|-----------------|-------|
|      | <i>kW</i>     |         | <i>g/kWh</i> |      |                 |       |
| Q    | 130 ≤ P ≤ 560 | 2014.01 | 3.5          | 0.19 | 0.4             | 0.025 |
| R    | 56 ≤ P < 130  | 2014.10 | 5.0          | 0.19 | 0.4             | 0.025 |

Nota: analogamente alle normative per i veicoli Off-road ci sono le normative **per le due ruote**.

### Sistema completo e ottimizzato:

- 1) **Reattore di capacità opportuna**, così da realizzare adeguati tempi di permanenza degli inquinanti al variare della portata e della T dei gas di scarico del motore; **per stimare la capacità opportuna** del reattore viene preso come riferimento la cosiddetta **“Space Velocity (SV)”**: è il **rapporto tra la portata in volume che attraversa il convertitore e il volume stesso del convertitore**; dunque è **uguale all'inverso del tempo di permanenza**. La dimensione/capacità deve essere opportuna affinché la Space Velocity corrisponda a un tempo di residenza compatibile con il tipo di reazione che si deve ottenere.
- 2) **Uso di acciaio** per garantirne la resistenza strutturale alle alte T di funzionamento;
- 3) **Minimizzazione degli scambi termici** tra i gas di scarico e l'ambiente esterno, mediante ad esempio l'adozione di **collettori e reattore a doppia parete**;
- 4) **Introduzione di un flusso di aria secondaria** (in modo da garantire l'ossidazione)(10-20% della portata in massa dei gas di scarico), **fortemente preriscaldata in modo da mantenere le temperature del gas nel reattore il più possibile elevate**;
- 5) **Ottimizzazione del funzionamento del motore in funzione dell'accoppiamento ad un reattore termico**, che comportava l'utilizzo di miscele **leggermente ricche** e di **anticipi di accensione inferiori a quelli di MBT(anticipi ritardati)**, in modo da elevare le temperature allo scarico e **limitare la formazione di NOx**.

### Conseguenze (svantaggi):

- 1) **Minore efficienza del propulsore**  
(ritardo dell'anticipo di accensione rispetto all'MBT e adozione di miscele ricche);
- 2) **Complicazioni costruttive**  
(alte T, sistemi per l'introduzione di aria secondaria – compressore e valvola dosatrice);
- 3) **Problemi di controllo durante i transitori**  
(necessità di regolare i quantitativi di aria secondaria introdotti);
- 4) **Non permettevano l'abbattimento delle emissioni di NOx**;
- 5) Nonostante i numerosi accorgimenti, **l'efficienza ossidante media** raggiunta nelle usuali condizioni di funzionamento del motore **non superava il 50%**.  
Per questi motivi, l'utilizzo dei reattori termici viene abbandonato già negli anni '70 (**vengono largamente utilizzati negli USA fino al 1974**).

### - Convertitori catalitici

#### Cenni storici:

I **reattori termici** vengono sostituiti dai **convertitori catalitici**: l'approccio, come suggerisce il nome, è diverso: **vengono introdotte delle sostanze catalizzanti** (nel caso del catalizzatore a tre vie, si tratta principalmente di metalli nobili) **che favoriscono le reazioni**.

Il **primo** convertitore catalitico che è stato introdotto è il **catalizzatore ossidante**. È interessante analizzarlo in quanto molte parti sono rivisitate dal catalizzatore a tre vie e anche perché nei motori Diesel viene ancora utilizzato (con qualche differenza; i concetti di base sono gli stessi).

Il catalizzatore ossidante

Nomenclatura del convertitore 'monolitico'

Analisi parametrica del convertitore 'monolitico'

Meccanismo e analisi chimico-fisica della catalisi eterogenea

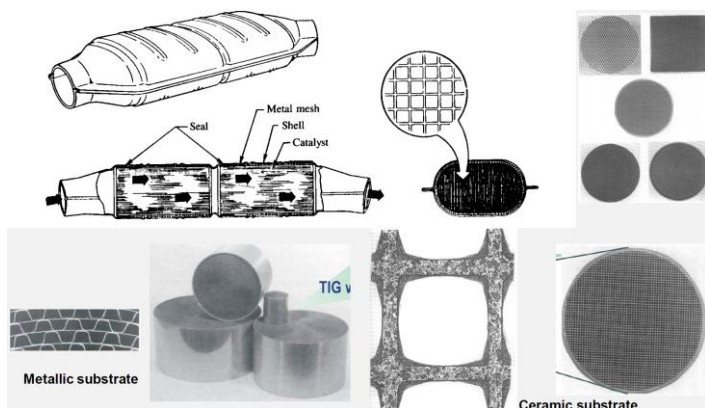
Il catalizzatore a tre vie

Terza generazione di convertitori catalitici

Quarta generazione di convertitori catalitici



## B) Struttura “monolitica”:



La struttura di base di questo dispositivo è costituita da un **supporto strutturato** (monolite ceramico o in lega metallica) dotato di **canali assiali a sezione quadrangolare, esagonale od ottagonale** (per migliorare via via il rapporto tra la superficie a contatto con i gas e il volume del catalizzatore). Questo tipo di struttura si definisce «flow-through substrate». La **sezione del supporto** è di tipo **ellittico o circolare**. La soluzione è caratterizzata da:

- **Adeguate compattezza** (grazie alla elevata superficie di contatto per unità di volume)
- **Ridotte cadute di pressione** (grazie all'ampia sezione frontale ed alle ridotte resistenze lungo i canali)

Lungo le pareti interne dei canali viene depositato un **materiale altamente poroso** (chiamato “**carrier**”: normalmente  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  + **ossido di cerio** + **altri ossidi (Silicio, Bario, Lantanio)**) in cui sono **finemente dispersi i metalli nobili**: l'insieme “**carrier**” + **metalli nobili** si chiama “**washcoat**” (il termine deriva dall'applicazione di questo sottile strato di materiale poroso mediante immersione del monolite in una opportuna sospensione che contiene carrier ed elementi nobili intimamente miscelati). **L'ossido di cerio**, come vedremo, ha la **capacità di immagazzinare ossigeno quando siamo nel povero e di restituire ossigeno quando siamo nel ricco**; gli altri ossidi (di silicio, bario e lantanio) sono **stabilizzatori di superficie specifica: servono per evitare che la  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  degradi in  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$**  e questo è un problema dato che la **sua superficie specifica è 100 volte inferiore**.

Il washcoat, molto poroso e avente un elevatissima superficie specifica (1 [g] di questo materiale da superfici dell'ordine dei  $100[\text{m}^2]$ ), viene disposto sui canali del supporto strutturato in maniera non perfettamente uniforme: **dove ci sono gli angoli lo spessore è leggermente maggiore**.

Il supporto strutturato è posto all'interno di un **contenitore in lamiera di acciaio**. Il contenitore è a diretto contatto con il monolite nel caso di supporto metallico; **se il monolite è di tipo ceramico si interpone uno strato di vermiculite** che funge da **antivibrante, isolante termico** e di **tenuta per i gas di scarico**.

Dal momento che il **reagente è gassoso** mentre le **specie catalitiche (i metalli nobili) sono solidi**, si realizza una “**catalisi eterogenea**” (due fasi diverse). Questa soluzione permette di **abbinare la macrostruttura del supporto strutturato con la microstruttura del washcoat** in modo tale da **massimizzare la superficie di contatto**.

### Caratteristiche dell'ambiente in cui il catalizzatore si trova ad operare:

- **Elevate temperature** (1200°C);
- **Significative variazioni di temperatura nel tempo e nello spazio** (nel catalizzatore si instaurano infatti gradienti spaziali di temperatura per effetto delle reazioni esotermiche che in esso avvengono);
- **Presenza di gas corrosivi** come il **vapor d'acqua** ad alta temperatura e di agenti aggressivi provenienti dagli **HC di combustibile e lubrificante** (zinco, fosforo, vanadio, zolfo) ed **erosività della corrente fluida**;
- **Vibrazioni**.

**Metalli nobili:****TABLE 6.1 Comparison of relative activities of precious and base metal catalysts for different reactants. Reprinted from Ref. 15 with permission, copyright © 1975, American Chemical Society.**

| Reactant                             | 1% CO | 0.1% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0.1% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|--------------------------------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|
| Pd                                   | 500   | 100                                | 1                                  |
| Pt                                   | 100   | 12                                 | 1                                  |
| Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 80    | 0.6                                | 0.05                               |
| CuO • Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40    | 0.8                                | 0.02                               |
| Au                                   | 15    | 0.3                                | <0.2                               |
| MnO <sub>2</sub>                     | 4.4   | 0.04                               |                                    |
| CuO                                  | 45    | 0.6                                |                                    |
| LaCoO <sub>3</sub>                   | 35    | 0.03                               |                                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 0.4   | 0.006                              |                                    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 0.03  | 0.004                              | 0.008                              |
| NiO                                  | 0.013 | 0.0007                             | 0.0008                             |

Reaction in Oxidizing Atmosphere at 300° C

In tabella troviamo la **capacità di queste sostanze di promuovere l'ossidazione di specie chimiche specifiche** (CO; C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>: etene, rappresentativa di un'olefina; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: etano, rappresentativo di un alcano); più è alto il numero più è efficace il metallo.

Non potendo mettere grandi quantitativi di questi materiali, per via dei vincoli sull'ingombro, utilizziamo dei **materiali aventi un'alta reattività specifica**. I candidati principali sono il **palladio (Pd)** e il **platino (Pt)**.

L'attività ossidante di Pt e Pd varia in funzione dei reagenti. Per CO, olefine, metano e propano il **Pd** ha **maggiore attività catalizzatrice** rispetto al Pt. Per gli **aromatici e l'etano** Pt e Pd si equivalgono, mentre per tutti gli **altri HC** prevale il **Pt**.

| Reactant                                       | Activity ranking |
|--|------------------|
| CO   | Pd > Pt          |
| CH <sub>4</sub> -C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | Pd > Pt          |
| Higher MW alkanes                              | Pt > Pd          |
| Olefins  | Pd > Pt          |
| Aromatics - C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>      | Pt ≈ Pd          |

A seconda di cosa vogliamo ossidare dovremo fare un'opportuna formulazione.

**Nomenclatura del convertitore "monolitico"****Definizione del monolite:**

Il monolite è definito da:  $\Phi(A \times B) \times C/D/E$

A: diametro principale dell'ellisse (in [mm])

B: diametro minore dell'ellisse (in [mm])

C: lunghezza (in [mm])

D: densità di celle in [cps] (cell per square inches) (celle per pollice quadrato;  $100[\text{cps}] \cong 5[\text{celle}/\text{cm}^2]$ )

E: spessore di parete in [mil] (**1 millesimo di pollice; 1[mil]  $\cong$  25[ $\mu\text{m}$ ]**)

Un tipico catalizzatore della attuale generazione per **un'auto di 2000 [cm<sup>3</sup>]** di cilindrata ha le seguenti caratteristiche:  **$\Phi(110 \times 80) \times 150/600/2$** .

- Cell density typically 400 ÷ 800 [cps]
- Wall thickness typically 1 ÷ 2 [mil]
- Volume Engine displacement
- Space velocity: typically 105 [ $h^{-1}$ ]

**Altri parametri importanti:**

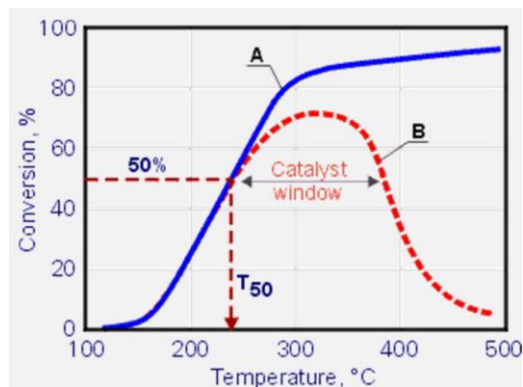
- Spessore del washcoat: **al max 20 ÷ 40[ $\mu\text{m}$ ]**

- Precious Metal loading [ $\text{g}/\text{ft}^3$ ]  $\cong$  **3.5[ $\text{g}/\text{l}$ ]** (volume apparente; non si tiene conto dei volumi vuoti)

- PM ratio (Precious Metal ratio): se abbiamo 2 PM, viene indicato come un **rapporto in peso indicato: .../...**

### Temperatura e Tempo di Light-Off:

La **temperatura di Light-Off** è la temperatura per la quale si raggiunge il **50% dell'efficienza di conversione**. Siamo interessati anche al **tempo impiegato** per raggiungere tale condizione. Il tempo non dipende solo dalle caratteristiche del catalizzatore ma dipende anche da come viene guidato il veicolo: se partiamo a freddo e percorriamo un tratto a carichi importanti il catalizzatore si scalda più velocemente. **Per stimare il tempo di Light-Off** i costruttori utilizzano i **cicli omologativi** (un tempo il NEDC, oggi il WLTC).



Ci sono alcuni catalizzatori in cui il comportamento viene descritto dalla curva rossa: a T elevate l'efficienza di conversione scende. In tal caso non parliamo solo di T di Light-Off ma anche di **"finestra di funzionamento"**: tra le due T per le quali si raggiunge il 50% di efficienza di conversione

- Dunque la **missione** è importante.

- È importante anche la **posizione** in cui mettiamo il catalizzatore: una volta veniva installato **"under-floor"**. Oggi viene installato **subito dopo l'exhaust manifold** in modo da poter raggiungere prima la temperatura di Light-Off in un tempo più ridotto ("close-coupled" layout); in tal caso, una volta raggiunta la temperatura di Light-Off, il problema è rappresentato dal fatto che il catalizzatore rimane esposto all'eccessivo calore derivante dal motore e le **temperature molto elevate potrebbero dare problemi di invecchiamento** del catalizzatore oltre che il **problema dell'ingombro**: dobbiamo installare **catalizzatori più piccoli** rispetto alla soluzione "under-floor"; per ovviare a questi problemi possiamo pensare a una configurazione con **due catalizzatori uno**, di dimensioni contenute, **"close-coupled"** e uno un po' più grande un po' più lontano.



- **Durante il warm-up** del motore possiamo far in modo di **umentare la T** o la **portata dei gas di scarico** con degli opportuni accorgimenti, quali **l'EGR**.

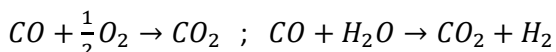
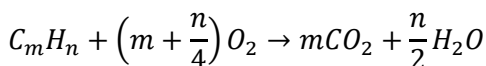
- È possibile anche **riscaldare elettricamente il catalizzatore** (costoso). Oggi si stanno studiando dei sistemi che permettono di accumulare e stoccare il calore che produce il motore in modo da restituirlo all'occorrenza.

**Il catalizzatore a tre vie [ ↓ LEZIONE 38: 10/01/20 ]**

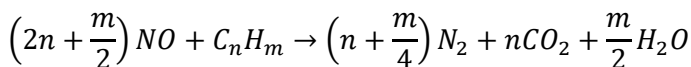
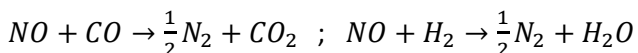
**Evoluzione da catalizzatore ossidante a catalizzatore riducente a tre vie:**

Il **catalizzatore a tre vie**, oltre ad avere i **due letti** ossidanti per CO e HC, consta di un **letto riducente** per gli NOx: per realizzare questo (terzo) letto riducente occorre inserire un **ulteriore metallo** che si occupi della **riduzione di NOx**. In una prima soluzione venne introdotto il **rutenio (Ru)** che però presentava alcune **problematiche (tendeva a volatilizzarsi)**. Successivamente è stato sostituito dal **rodio (Rh)**. Dunque i catalizzatori a tre vie moderni consistono dei tre materiali: **Pt, Pd e Rh**.

**Reazioni di ossidazione:**

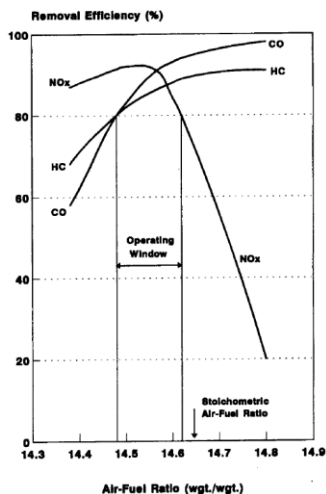


**Reazioni di riduzione:**



Nota: teoricamente dovremmo considerare **anche la reazione dello NO<sub>2</sub>** che però è presente in quantitativi trascurabile allo scarico dei motori SI.

**Funzionamento del catalizzatore a tre vie con λ = 1:**



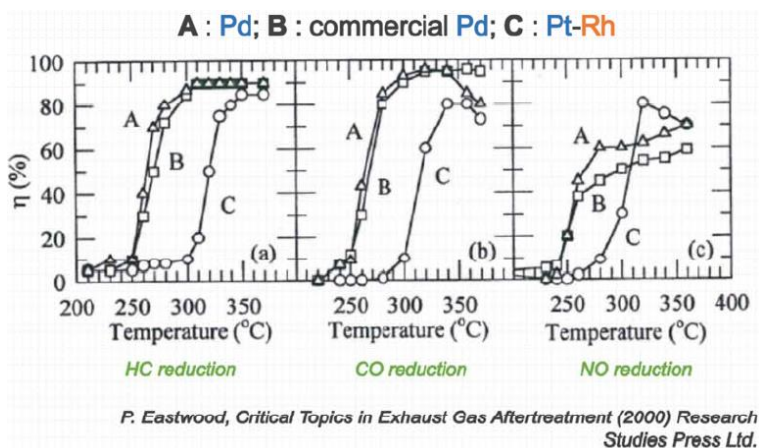
(Sonda Lambda)

Nel grafico sono riportate le 3 curve che danno l'efficienza di conversione dello HC, del CO e degli NOx, in funzione della dosatura (Attenzione: non sono delle concentrazioni!)

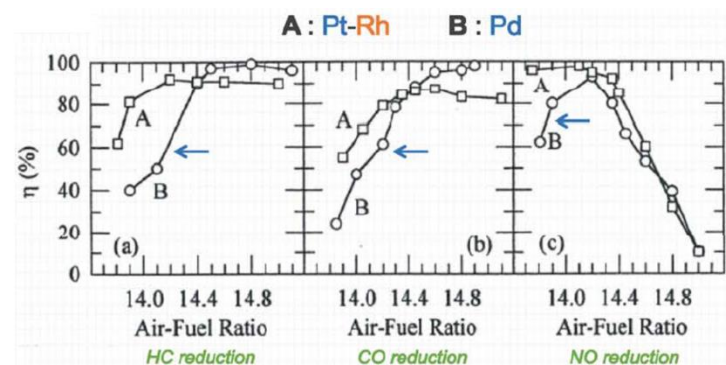
Dobbiamo far in modo che tutti e tre i letti (2 ossidanti, 1 riducente) funzionino alla **massima efficienza**. Per completare la combustione di specie da ossidare e specie da ridurre - in modo tale che ci sia **sufficiente ossigeno per l'ossidazione** e **al tempo stesso non ci sia ossigeno in eccesso per contrastare la formazione di NO** – dobbiamo **tenerci quanto più possibile sullo stechiometrico**. Allora si definisce una **finestra di funzionamento** per ottimizzare le due tipologie di reazioni: stabiliamo una **soglia** per la quale l'efficienza di conversione sia superiore allo **80%**. Questa stretta finestra operativa richiede un **controllo in retroazione del motore**, basato su una **sonda lambda** installata **a monte del TWC** (a tale proposito, si rimanda al paragrafo dedicato all'accoppiamento tra sistema di controllo della dosatura in anello chiuso e il convertitore catalitico) (la sonda lambda ha un segnale che è funzione del livello di ossigeno allo scarico).

### Quarta generazione di convertitori catalitici

La quarta generazione di convertitori catalitici, coincisa con l'introduzione delle normative antinquinamento europee, è stata caratterizzata da una attenzione notevole alla **riduzione dei costi di fabbricazione del convertitore**, a causa della notevole pressione sui prezzi del Pt e del Rh (in particolare il costo del Pt cresceva). Si è assistito quindi a una progressiva sostituzione in tali cat. sia del Pt che del Rh con il **meno caro Pd**.



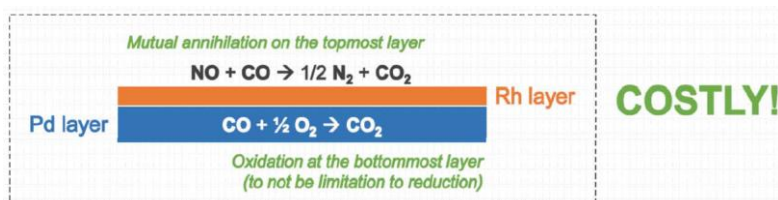
- Innanzitutto si è provato a utilizzare il **Pd da solo**. Confrontando il Pd (A, B) con la combinazione di Pt e Rh (C) notiamo come **la soluzione con il Pd è addirittura migliore rispetto all'utilizzo dei metalli nobili**. Il problema del Pd è rappresentato dalla **finestra Lambda**.



Confrontando il Pd (B) con la combinazione di Pt e Rh (A) e considerando l'utilizzo del Pd, notiamo come il punto di massimo funzionamento è spostato troppo verso il povero, quindi **nelle condizioni di stechiometrico / ricco viene soppressa molto rapidamente l'efficienza di conversione del sistema**. Questo comporta in particolare un problema per la conversione degli NOx.

- Dunque la soluzione monometallica del Pd non è stata molto utilizzata.

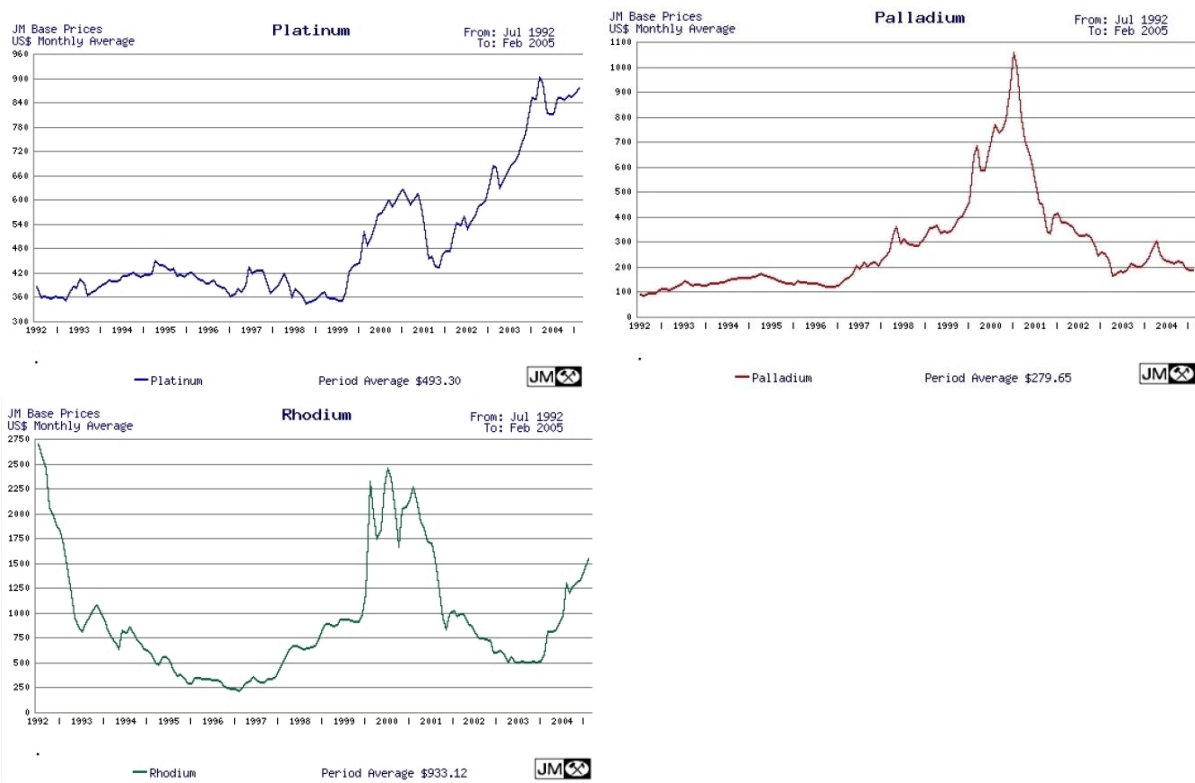
Successivamente è stata provata la **combinazione Pd e Rh** (che costava meno di Pd e Pt). In questo caso il problema era rappresentato dal fatto che il **Pd ha un effetto negativo sul Rh**. Per ovviare a questo problema si è pensato di realizzare washcoat speciali composti da **strati separati di Pd (sotto) e Rh (sopra)**. Tuttavia tale soluzione comportava dei costi di produzione che compensavano il risparmio ottenuto grazie all'utilizzo del Pd.





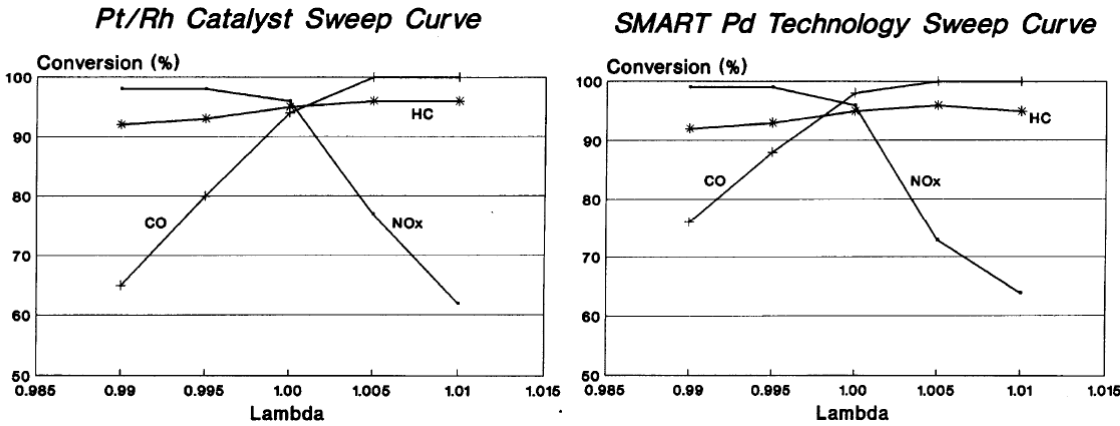
Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Tale formulazione deve tener conto anche delle **variazioni nel tempo dei prezzi del Pt, Pd e Rh.**

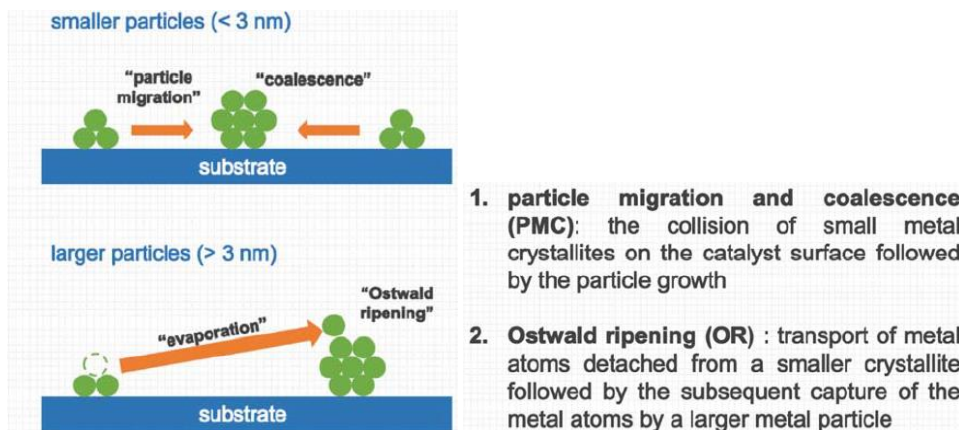


Sempre per questa quarta generazione di catalizzatori, all'evoluzione dei convertitori catalitici hanno inoltre contribuito:

- **Il miglioramento del sistema di controllo del titolo in anello chiuso**, con ampiezza della finestra lambda ulteriormente ridotta e frequenza di oscillazione della dosatura aumentata;
- **La maggiore resistenza alle elevate temperature** dei nuovi substrati (per effetto dell'ottimizzazione sia della progettazione strutturale, sia della composizione e del drogaggio con stabilizzanti) **hanno permesso una disposizione del convertitore più ravvicinata agli scarichi dei cilindri** e dunque una maggiore temperatura di esercizio, con effetti benefici sull'efficienza;
- **Riduzione del tenore di zolfo e fosforo** a cui il catalizzatore è esposto durante il funzionamento: **lo zolfo e il fosforo sono due elementi che caratterizzano l'invecchiamento del catalizzatore**. Inizialmente è stato tolto il piombo; successivamente si è cercato di ridurre il tenore di zolfo: le prime benzine, negli anni 90', avevano tenori di zolfo dell'ordine di centinaia di [ppm], oggi giorno le benzine ne contengono meno di 10 [ppm] (le benzine definite "senza zolfo" contengono meno di 10 [ppm] di zolfo).







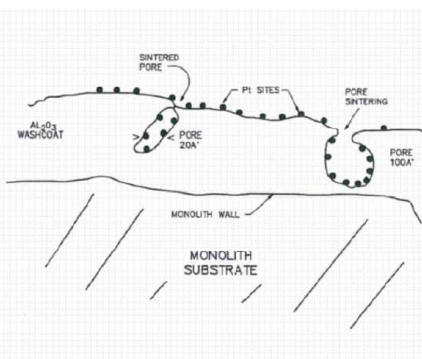
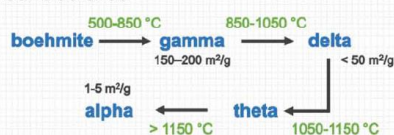
- **Le elevate temperature** agiscono anche sul carrier, provocando la graduale **occlusione dei micropori** che lo percorrono. Al limite, per stazionamento a temperature particolarmente elevate, si possono avere **cambiamenti di fase del carrier** (per esempio il passaggio da  $\gamma - Al_2O_3$  a  $\delta - Al_2O_3$  o  $\alpha - Al_2O_3$ ) che portano a consistenti **diminuzioni della superficie attiva dello stesso**.

Anche in questo caso è usuale aggiungere **sostanze stabilizzanti** come  $BaO$ ,  $La_2O_3$ ,  $SiO_2$  o  $ZrO_2$  che formano soluzioni solide con il carrier in grado di ritardare fortemente i fenomeni di sinterizzazione o di cambiamento di fase.

Sintering mechanism of a **catalyst carrier** (e.g.

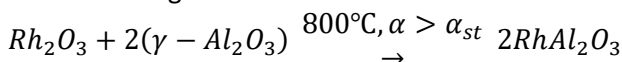
$\gamma - Al_2O_3$ ):

1. collapse of pores  $\rightarrow$  progressive decrease in pore opening  $\rightarrow$  increase in pore diffusion resistances
2. conversion of crystal structure  $\rightarrow$  loss of surface area

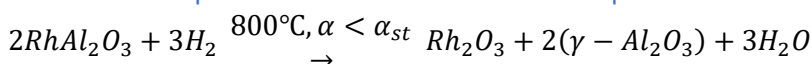


- Infine, anche le **interazioni chimiche** tra le specie attive ed il carrier possono essere significative. La più importante è quella che avviene per esposizione ciclica del convertitore ad **alte temperature** e ad **atmosfera ossidanti** e che determina la **disattivazione del Rh**.

Il **Rh reagisce con la  $\gamma - Al_2O_3$**  del carrier per formare un **alluminato di rodio** privo di proprietà catalizzanti secondo la seguente reazione:



Tale reazione è **parzialmente reversibile**: durante i periodi di funzionamento con miscela ricca si ha:



Per minimizzare gli effetti descritti i costruttori di catalizzatori **hanno fatto ricorso a carrier meno reattivi**, quali  $SiO_2$  o  $ZrO_2$  o  $TiO_2$

Inoltre, durante le escursioni nel povero ad alta temperatura, il **Rh** può anche interagire con il **CeO<sub>2</sub>** (un componente del washcoat con capacità regolarizzante per il tenore di ossigeno nei gas di scarico del motore: v. oltre) **riducendo l'attività di entrambe le specie chimiche e quindi portando ad una minore efficienza di riduzione degli NOx**.

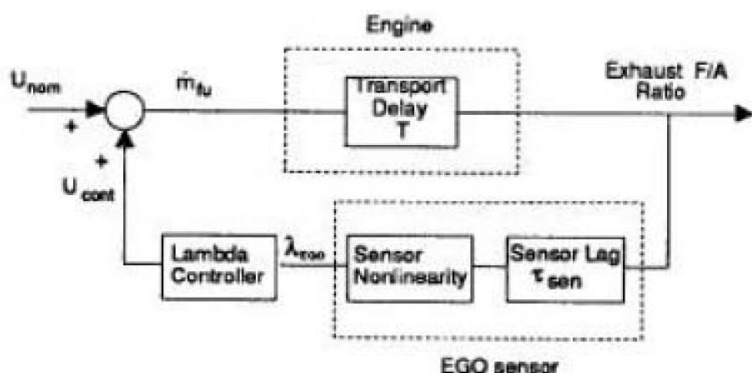
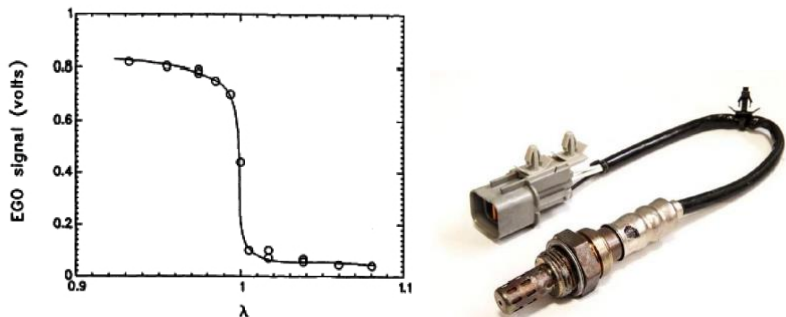
Il washcoat venne realizzato a strati multipli, con rodio e ceria depositati in strati differenti al fine di mantenerli separati ed impedirne l'interazione. Infine, il Ce e l'allumina possono essere stabilizzati facendo ricorso a ossidi di Zr, Ba e La.

**- Accoppiamento del catalizzatore con il sistema di controllo del titolo**

**Controllo in retroazione del titolo**

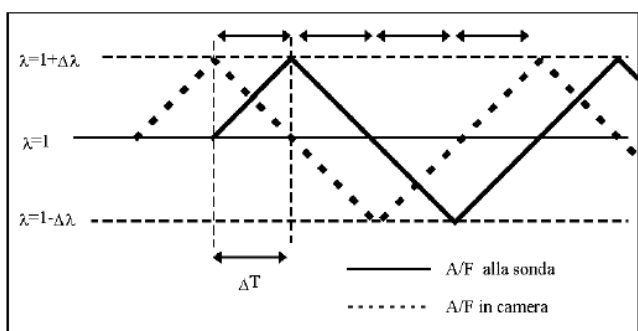
La sperimentazione ha mostrato che è possibile regolare la dosatura con la precisione richiesta solo mediante un **sistema di controllo in retroazione**.

Allo scarico del motore, prima del catalizzatore a tre vie, viene montata la **sonda Lambda** (anche detto sensore **EGO, Exhaust Gas Oxygen**): si tratta di un **sensore "on-off"**: restituisce un **segnale alto di tensione** quando ci troviamo nel **ricco**, un **basso segnale di tensione** quando siamo nel **povero** (non ci dice quanto siamo nel ricco o nel povero ma riesce ad individuare una transizione da ricco a povero e viceversa).



Entra un certo quantitativo di combustibile (e aria); avviene la combustione; viene prelevato una porzione di gas di scarico e analizzata nella sonda Lambda; tale sensore, soggetto a due ritardi (uno dovuto al **ciclo motore** e uno dovuto alla misura stessa, quindi un **ritardo del sensore**), manda l'informazione a un **"controllore"**; tale controllore dev'essere opportunamente calibrato.

**Controllo integrativo puro**



**Controllore integrativo puro:** introdotta una certa quantità di combustibile, in anello aperto, viene **corretta** mediante il **controllo ad anello chiuso**:

$$\Delta \dot{m}_{fuel}(t) = \int_0^t k_i e(\tau) d\tau$$

$$e(\tau) = \text{sign}[\lambda_{EGO}(t - \Delta t) - 1]$$

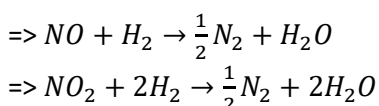
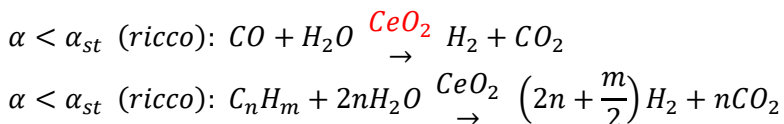
$k_i$ : costante dell'integrativo;  
 $e(\tau)$ : errore: si tratta di un segno: + o -.

Si innesca così un funzionamento "a ciclo limite":

È facile verificare che, se  $k_i$  è costante, la **dosatura** oscillerà attorno al **valore stechiometrico** con frequenza pari a  $f_i = 1/(4 \cdot \Delta T)$ , con opportuna **ampiezza** proporzionale al **ritardo**.

Quando siamo nel povero  $\alpha > \alpha_{st}$  l'ossido di cerio reagisce con l'ossigeno catturandone un atomo; quando torniamo nel ricco cosa succede? Quale problema potremmo avere? Nel ricco, ossigeno per ossidare il CO non ce n'è; tuttavia vi è il cerio che l'ha catturato precedentemente; il cerio, reagendo con il CO gli passa l'ossigeno che aveva catturato nel povero permettendone la trasformazione in  $CO_2$ .

Questa trasformazione, pilotata grazie all'aggiunta del Cerio, favorisce allo stesso tempo la riduzione degli NOx e degli HC: il Cerio favorisce, quando ci troviamo nel ricco, le reazioni di CO e idrocarburi con l'acqua dando luogo alla formazione di idrogeno che a sua volta, reagendo con lo NO, porta alla formazione di azoto.



Dunque, la presenza del Cerio e la presenza di questo funzionamento a ciclo limite, se opportunamente abbinati, consentono di migliorare l'efficienza del catalizzatore. Cosa significa "opportunamente abbinati"? Immaginiamo di avere un quantitativo di cerio sul washcoat; quanto ossigeno possiamo immagazzinare? Dipende da quanto Cerio abbiamo stoccato. Se abbiamo una piccola oscillazione intorno allo stechiometrico proporzionata al quantitativo di Cerio l'efficienza del sistema cresce; se invece si aumenta l'ampiezza e quindi si riduce la frequenza, risulta chiaro che potremmo avere un'oscillazione che va troppo nel povero: andando troppo nel povero quando l'ossido di cerio ha stoccato tutto l'ossigeno che riesce a stoccare non riesce a stoccarne altro e quindi restituirlo dall'altra parte quando ci troviamo nel ricco; di conseguenza non abbiamo più un miglioramento dell'efficienza, anzi questa peggiora.

### Efficienza di conversione e ampiezza di oscillazione

Riducendo l'ampiezza di oscillazione risulta evidente nei seguenti grafici come migliori l'efficienza di conversione.

### Efficienza di conversione degli NOx e ampiezza di oscillazione

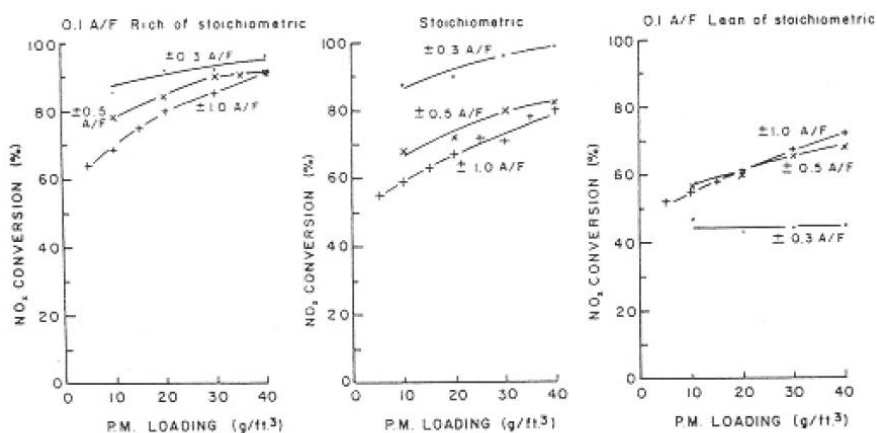


Fig. 16 - Effect of air/fuel ratio amplitude on NOx conversion efficiency of engine aged monolithic Pt/Rh TWC catalysts at set points 0.1 A/F rich of stoichiometric, stoichiometric, and 0.1 A/F lean of stoichiometric at 400°C and 100,000 VHSV

### Efficienza di conversione degli CO e frequenza di oscillazione

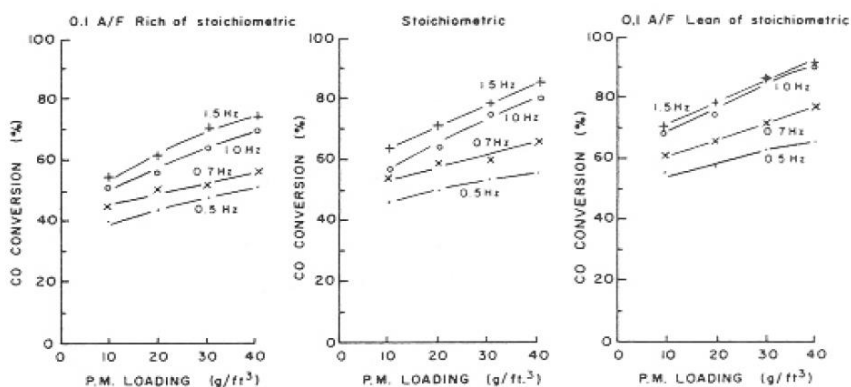


Fig.20-Effect of perturbation frequency on CO conversion of engine aged monolithic Pt/Rh TWC catalysts at set points 0.1 A/F ratio rich of stoichiometric, stoichiometric, and 0.1 A/F lean of stoichiometric. A/F amplitude constant at  $\pm 1.0$ , 100,000 VHSV and 400° C

### Efficienza di conversione degli HC e frequenza di oscillazione

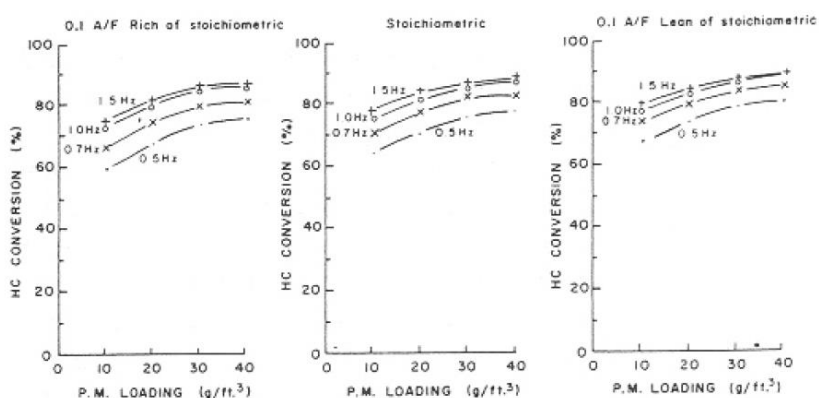
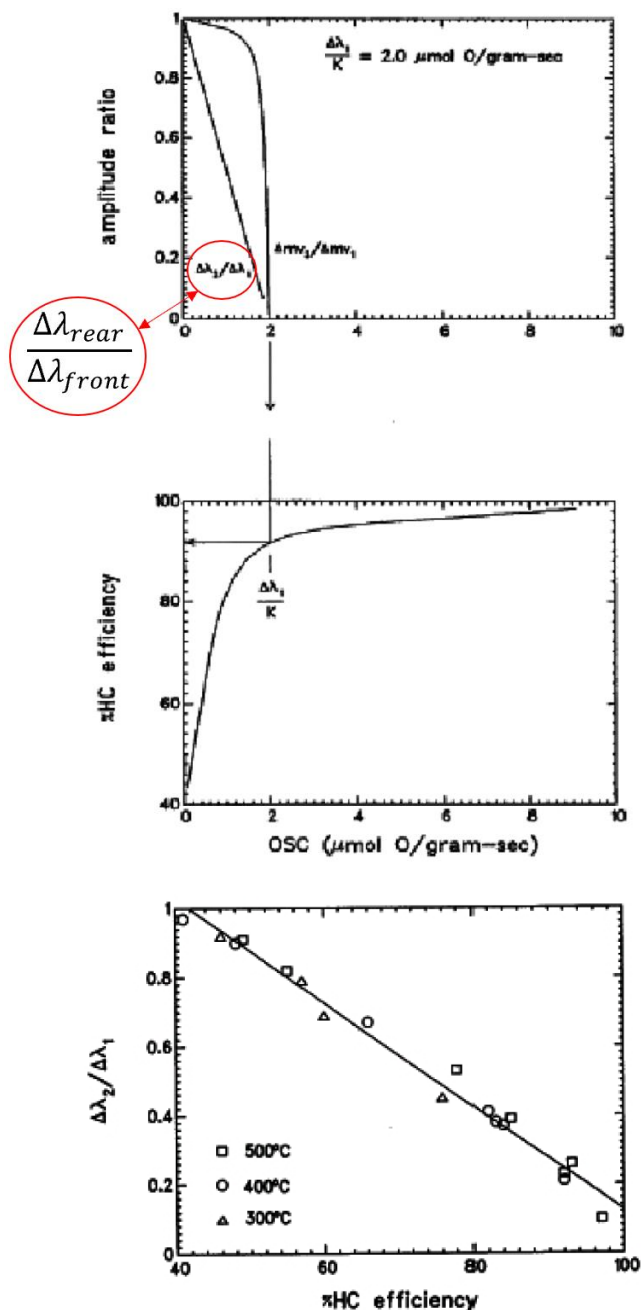


Fig. 21-Effect of perturbation frequency on HC conversion efficiency of engine aged monolithic Pt/Rh TWC catalysts at set points 0.1 A/F rich of stoichiometric, stoichiometric, and 0.1 A/F lean of stoichiometric. A/F amplitude constant at  $\pm 1.0$ , 100,000 VHSV and 400° C

### Nota

Immaginiamo di **essere nel povero** e **prendiamo in considerazione gli NOx**. Se, invece di oscillare nell'intorno dello stechiometrico, **oscilliamo nell'intorno di un valore nel povero**, **dobbiamo aumentare l'ampiezza e quindi ridurre la frequenza** per avere un miglioramento dell'efficienza di conversione. Mentre per gli HC ci aspettiamo il contrario (**in ogni caso, più importante il discorso nell'intorno dello stechiometrico**).

-> Due sonde Lambda: una a monte (front) e una a valle (rear) del catalizzatore.



Se il catalizzatore funziona a elevata efficienza il  $\Delta\lambda_{rear}$  è praticamente pari a zero (curva quasi piatta) mentre il  $\Delta\lambda_{front}$  è quello imposto; dunque il rapporto  $\frac{\Delta\lambda_{rear}}{\Delta\lambda_{front}}$  è quasi pari a zero e l'efficienza del catalizzatore è elevata. Viceversa, quando  $\Delta\lambda_{rear}$  incomincia ad aumentare il rapporto  $\frac{\Delta\lambda_{rear}}{\Delta\lambda_{front}}$  aumenta e l'efficienza scende.

Il sistema OBD riconosce quando il rapporto di conversione è sceso al di sotto (salito al di sopra) di un certo valore, quindi corrispondente a un basso valore di efficienza, comunicando all'utenza di recarsi in assistenza.

Nota: per capire come sia correlata la OSC (Oxygen Storage Capacity) al rapporto  $\frac{\Delta\lambda_{rear}}{\Delta\lambda_{front}}$  -> rifarsi all'approccio analitico esaminato nelle slide, inerenti al capitolo sul TWC (Three Ways Catalyst), messe a disposizione dal Professore.



**- Catalizzatori ossidanti (DOC)**

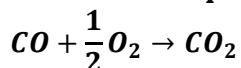
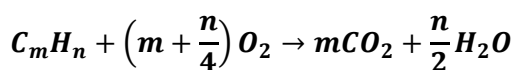
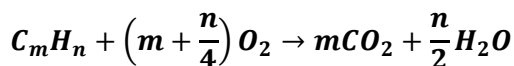
Funzionamento

Formulazione metalli nobili

Carrier

**Funzionamento: reazioni che il DOC deve promuovere e reazioni indesiderate**

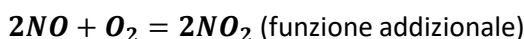
Per un motore ad accensione comandata, un TWC promuoveva le reazioni di ossidazione di HC e CO e inoltre la riduzione degli NOx. Questo poteva farlo in quanto prevedeva un funzionamento intorno allo stechiometrico. In un motore Diesel il funzionamento avviene per lo più con miscele povere tranne in casi in cui il motore funzioni a pieno carico avvicinandosi allo stechiometrico. Se mettessimo un TWC in un motore Diesel funzionerebbe come un catalizzatore a due vie in quanto il letto riducente non funzionerebbe; dunque al posto del TWC viene montato un catalizzatore ossidante, la cui funzione è di ossidare HC e CO.

**Reazioni di ossidazione di HC e CO****Reazione di ossidazione della SOF**

(Ciò che diventerà SOF è un composto organico  $\Rightarrow C_m H_n$ )

**Reazione di ossidazione  $NO \rightarrow NO_2$** 

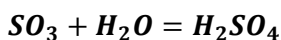
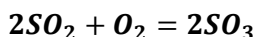
Nei moderni sistemi di controllo delle emissioni diesel, il DOC svolge anche la funzione di catalizzatore ausiliario che **promuove le prestazioni** di altri tipi di catalizzatori, posizionati a valle del DOC, che richiedono un elevato rapporto  $NO_2/NO$  (SCR e DPF).



Un opportuno controllo sul rapporto  $NO_2/NO$  consente di ottimizzare l'efficienza di funzionamento di altri sistemi, in particolare dello SCR e del DPF (solitamente, **fatti 100 gli NOx, contiamo 2-30 di  $NO_2$  e 70-98 di NO**: SCR e DPF possono lavorare bene se aumenta il numero di  $NO_2$ , nel caso degli SCR, se il rapporto è prossimo all'unità: gli  $NO_2$  e gli NO devono essere uguali: dobbiamo trasformare parte degli NO in  $NO_2$ ).

**Reazioni catalitiche indesiderate: ossidazione dello zolfo**

Tuttavia, il DOC promuoverà anche le reazioni di ossidazione di altri composti che possono formare prodotti indesiderati. Tra i più importanti di questi processi non desiderati citiamo l'ossidazione del biossido di zolfo ( $SO_2$ ) in triossido di zolfo ( $SO_3$ ) con la successiva formazione di **acido solforico** ( $H_2SO_4$ ).



In seguito allo scarico e al miscelamento con aria (nell'ambiente o nel tunnel di diluizione), **la temperatura dei gas di scarico diminuisce e lo  $H_2SO_4$  gassoso si combina con molecole d'acqua e nucleati formando particelle (liquide) composte di acido solforico idratato, che contribuiscono alla frazione solfati del PM e dunque contribuiscono alle emissioni totali di PM dal motore.** Specialmente in combinazione con gasolio ad alto contenuto di zolfo, la formazione catalitica dei solfati può aumentare significativamente le emissioni totali di PM e, quindi, diventare critica ai fini dell'accoppiamento del DOC al motore.



### Formulazione metalli nobili

Due soluzioni: formulazione monometallica o formulazione bimetallica.

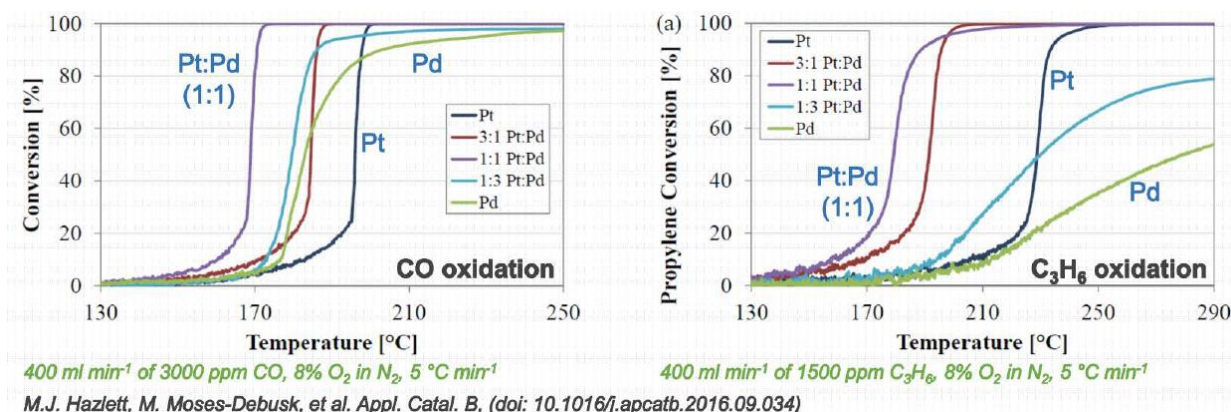
### Ossidazione di CO e HC

#### Catalizzatore monometallico:

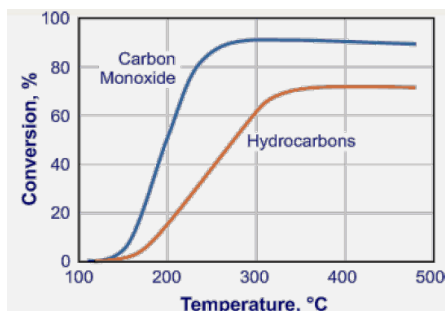
- Pt permette T di light-off inferiori per HC;
- Pd permette T di light-off inferiori per CO.

#### Catalizzatore bimetallico Pt/Pd:

- Riduce la T di light-off rispetto alla soluzione monometallica (soprattutto in proporzione 1:1);
- Migliora la “durability” del DOC;
- Pd è più incline ad avvelenamento da S, specie in presenza di Pt che favorisce la formazione di SO<sub>3</sub>. Sono richiesti gasoli a basso tenore di S.

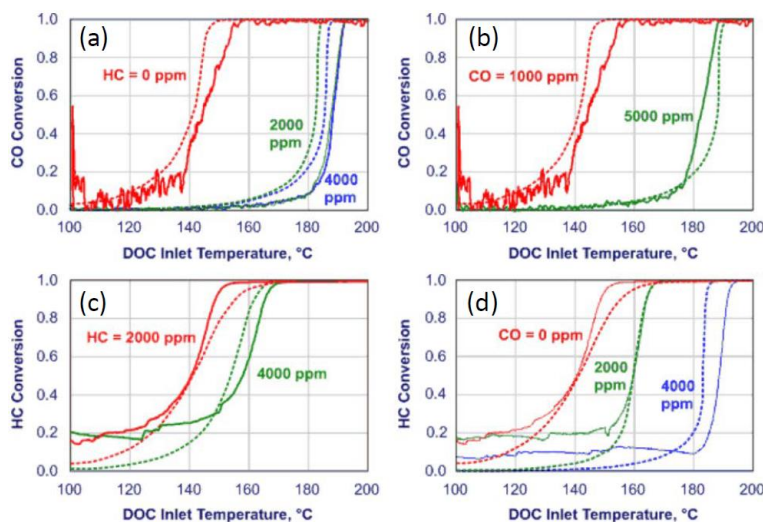


#### Competizione tra ossidazione di CO e HC (a, d):



L'efficienza di conversione del CO è superiore a quella degli HC a tutte le temperature;

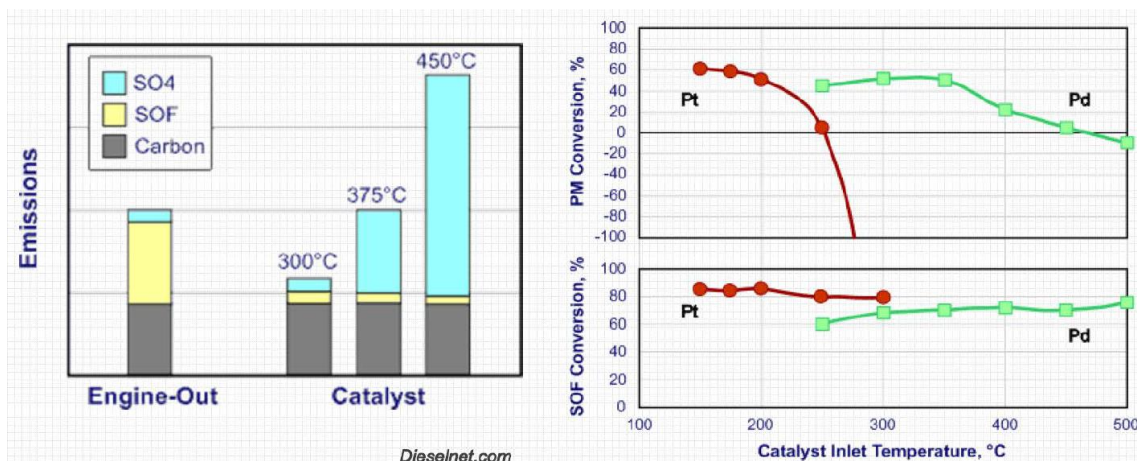
- T di light-off CO aumenta all'aumentare % di HC (a);
- T di light-off HC aumenta all'aumentare % di CO (d);
- Inoltre, T di light-off di CO (b) e HC (c) aumentano al crescere delle concentrazioni della specie considerate.



**Figure 2.** Effect of CO & HC concentration on light-off temperature  
 Solid lines: data (laboratory flow gas reactor), dashed lines: model. Propylene as HC.  
 Catalyst: 400 cps, washcoat (containing zeolite) 1.75 g/in<sup>3</sup>, Pt/Pd 105 g/ft<sup>3</sup>, SV 30,000 h<sup>-1</sup>.  
 (Courtesy of Ford Motor Company)

## Effetto sul PM

A valle del catalizzatore, a diverse T, troviamo:



A parità di formulazione del catalizzatore ci possono essere temperature alle quali il catalizzatore esegue le funzioni che ci aspettiamo, ovvero la riduzione della SOF: il Soot non lo tocca, i solfati non li tocca e riduce la SOF. Ci possono essere condizioni in cui il catalizzatore è molto efficace nel ridurre la SOF ma incomincia a produrre solfati (così aumentando il particolato).

Ciò che è SOF a livello di particolato (quando viene raccolto sul filtro di campionamento a valle del tunnel di diluizione quando le T non possono superare i 52 [°C]) non è detto che sia già SOF quando il flusso entra nel catalizzatore ossidante, perché magari al suo interno vi sono 400 [°C]: quindi ciò che a 52 [°C] si è depositato sulla particella carboniosa è ancora un gas che viaggia all'interno del catalizzatore ossidante. Il catalizzatore a tutti gli effetti può agire su tali gas.

Nei motori diesel dotati di filtri antiparticolato (da Euro 5 in poi), il DPF —anziché il DOC— è il principale responsabile del controllo PM. Il DPF cattura fisicamente particelle solide e liquide, rimuovendole dal gas di scarico. Tuttavia, il materiale volatile, che comprende la frazione organica solubile (SOF) e solfati (SO4), può sfuggire al filtraggio all'interno del DPF e fluire allo scarico. Il DOC può essere utilizzato per il controllo di queste frazioni. **Un PM 'umido', tipico dei bassi carichi, può essere efficacemente controllato dal DOC (purché si raggiungano le condizioni di light-off).**

Per comprendere come i composti organici propri della SOF possano venire a contatto con gli elementi catalitici, ricordiamo che le temperature dei gas di scarico grezzi e nel DOC sono molto più elevate, di solito tra 150 e 450 [°C], rispetto a quelle nel filtro di campionamento del PM (non superiori a 52 [°C]). Perciò, una parte significativa delle specie organiche che contribuiscono alla SOF si trova nella fase vapore quando attraverso il DOC e può subire ossidazione catalitica esattamente allo stesso modo della fase gassosa HC. Dopo il DOC, quando i gas di scarico si mescolano con l'aria nel tunnel di diluizione, gli HC pesanti si condensano e / o vengono adsorbiti sulle particelle carboniose formando la SOF.

### Dopo il light-off del DOC:

**Ossidazione catalitica:** il DOC opera in regime controllato dal **trasferimento di massa** (vedi catalisi eterogenea - lezione TWC), in cui le velocità di reazione dipendono principalmente dai coefficienti di diffusione laminare e nei pori. Gli HC a catena corta sono favoriti (vedi figura successiva), in quanto caratterizzati da elevati coefficienti di diffusione

**Cracking catalitico:** l'impiego di washcoat con ossidi metallici di base (ad es. gli ossidi di Ce) o di carrier di tipo zeolitico favorisce il **cracking degli HC a più alto peso molecolare in composti più leggeri, che diventano parte dei composti organici gassosi (HC) e non più della SOF.**

**- Filtri per il particolato (DPF) (/Antiparticolato)**

Si tratta di un dispositivo che deve essere in grado di **catturare fisicamente il particolato** in modo da evitare che venga disperso nell’ambiente; questa cattura avviene attraverso un **filtraggio meccanico**. Prevede anche un sistema di **rigenerazione del filtro**.

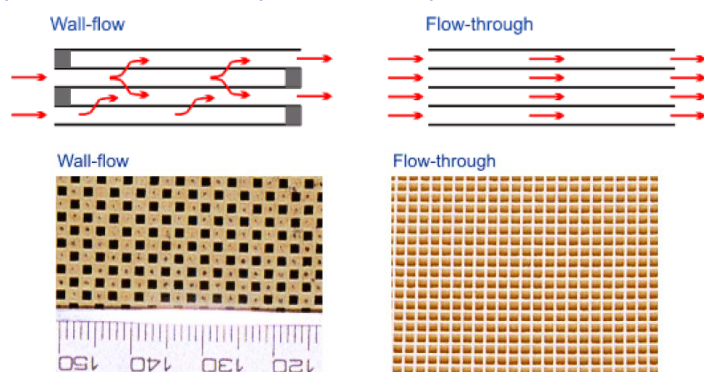
- Struttura DPF con Fuel Borne Catalyst (FBC)
- Filtraggio CSF (Catalyzed Soot Filter)
- Caduta di pressione nel DOP Layout per applicazioni EU4, 5 e 6
- Rigenerazione Sistemi CR-DPF (Continuously Regenerating-DPF)
- Ceneri
- Rigenerazione forzata

**Struttura**

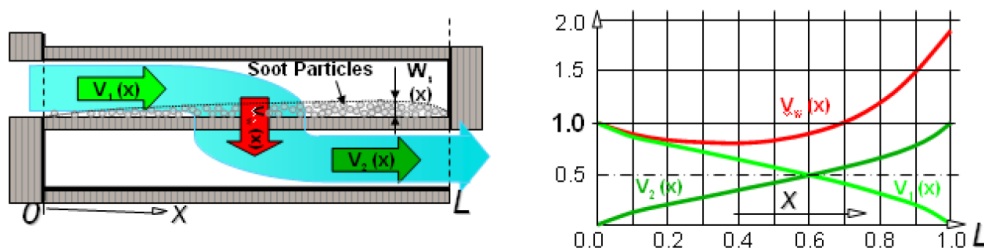


| Material          | Formula                            | Monolith Suppliers                  |
|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Cordierite        | $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ | Corning, NGK, Denso, Hitachi Metals |
| Silicon carbide   | SiC                                | Ibiden, NGK, Saint-Gobain, LiqTech  |
| Aluminum titanate | $Al_2TiO_5$                        | Corning                             |

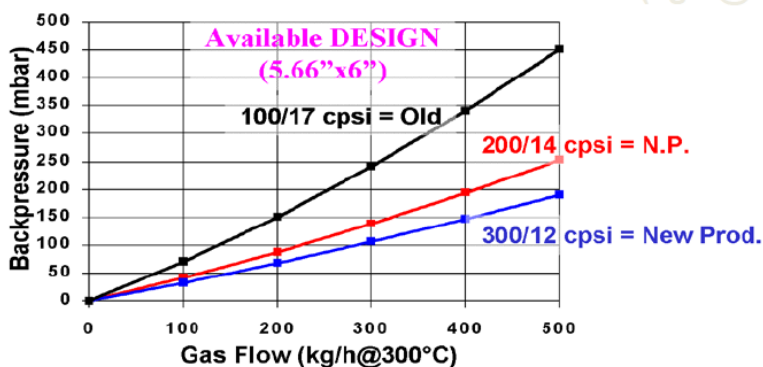
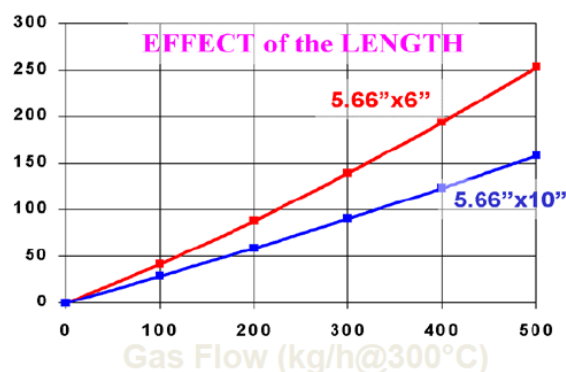
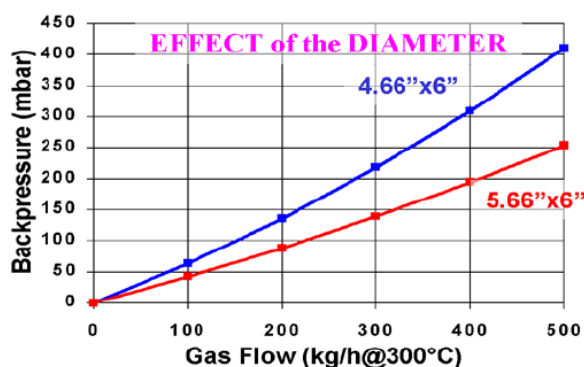
Il DOC o il TWC è un sistema a canali paralleli passanti; nel caso del filtro antiparticolato i canali sono sempre **paralleli ma sono alternativamente ciechi**. Il flusso che entra si trova il condotto “tappato”, quindi dovrà passare attraverso la porosità delle pareti in un canale adiacente da cui esce.



Nel suo passaggio, lascia dietro di sé le particelle di particolato, dunque separate dalla corrente gassosa.



**Effetto delle dimensioni caratteristiche:**



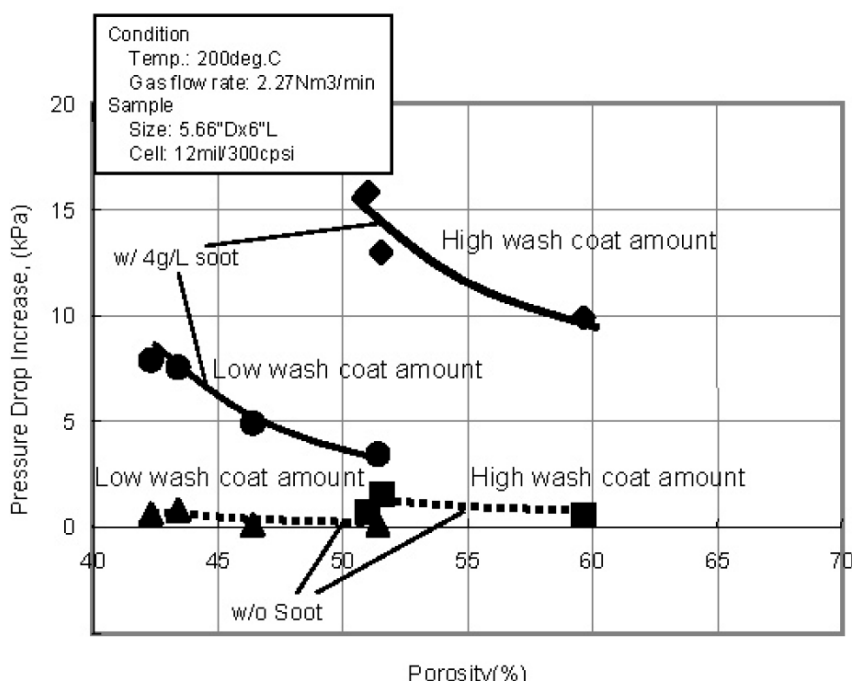
Xx : celle per pollice quadrato

Yy : spessore della parete in millesimi di pollice

**Effetto della porosità:**

Maggiore è la porosità delle pareti, minore è  $\Delta p$ , indipendentemente dal diametro medio dei pori, purché esso sia superiore ai 10  $\mu m$ .

Nei **filtri catalizzati**,  $\Delta p$  dipende anche dalla quantità di washcoat. Maggiori quantità di washcoat richiedono materiali ad alta porosità per contenere le cadute di p (come avverrà anche nelle LNT).



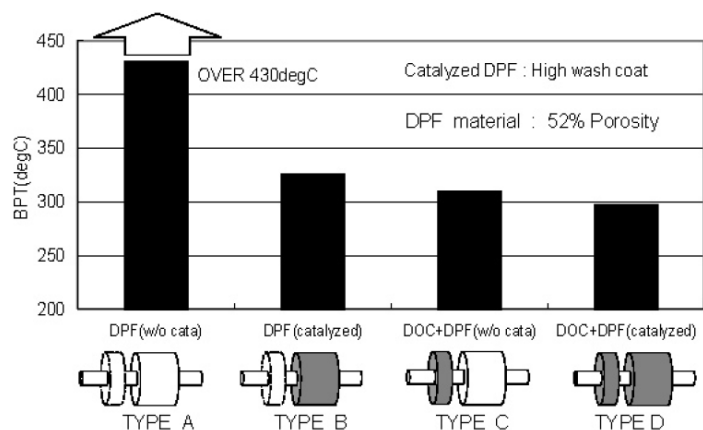


Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

Un parametro discriminante filtro “passivo” e filtro “attivo” è la **BPT (Balance Point Temperature)**: temperatura alla quale la **velocità di ossidazione del PM** diventa uguale a **quella di accumulo** e a cui il  $\Delta p$  **attraverso il filtro rimane costante**.

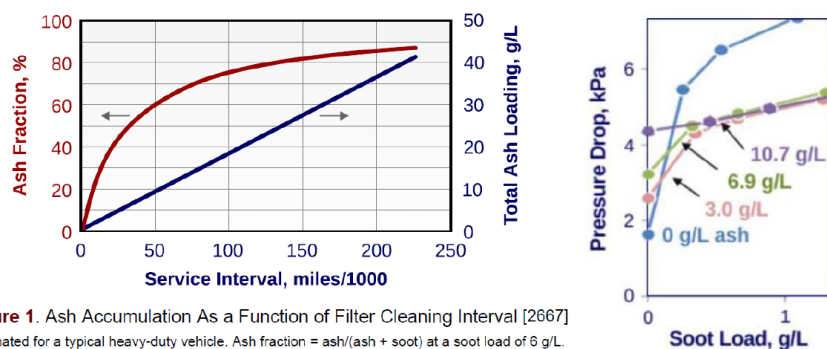
Minore è la BTP migliore è la capacità di rigenerazione del filtro.

La BTP è funzione non solo di come il DPF viene costruito ma anche del layout. In linea di principio, un DPF opportunamente catalizzato potrebbe funzionare da solo, senza bisogno di DOC a monte. **Un sistema con BTP sufficientemente ridotta può essere adattato per realizzare rigenerazioni continue** (vedi Continuously Regenerating DPF: CR-DPF).

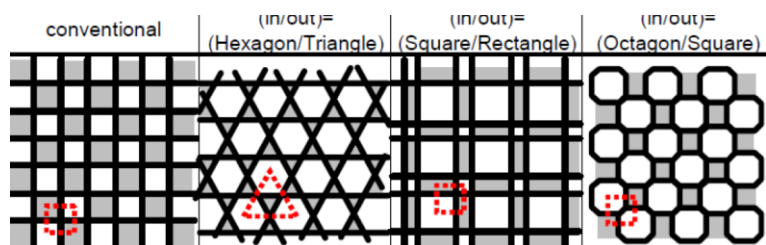


**Ceneri**

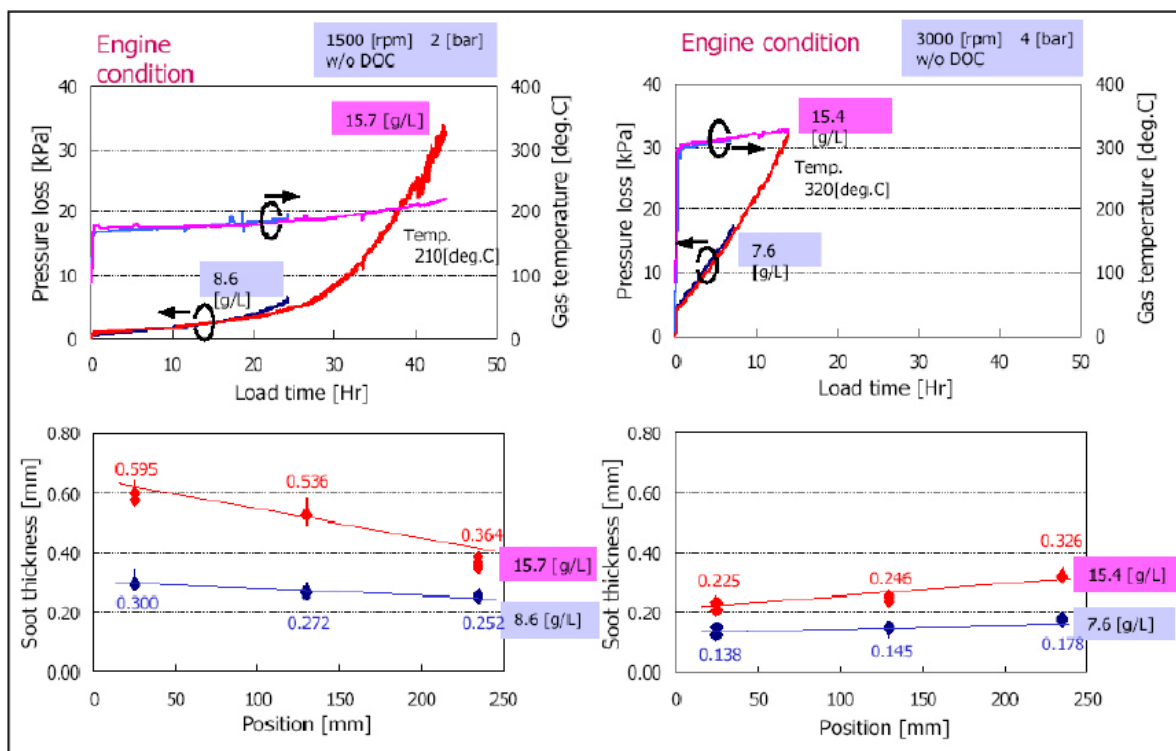
I DPF trattengono anche le **ceneri inorganiche** prodotte dall’olio lubrificante, dal combustibile e, se impiegati, dagli additivi usati per la rigenerazione del filtro stesso. Le cosiddette ceneri sono costituite da particelle incombustibili, che non possono quindi essere rimosse dal filtro attraverso la rigenerazione termica. **Il loro accumulo causa un graduale aumento della caduta di pressione attraverso i DPF**, che possono essere puliti dalle ceneri solo attraverso **dedicate procedure di manutenzione**, (lavaggio con acqua, invertendo la direzione del flusso attraverso il filtro, ...).



Una possibilità per **contenere l’effetto negativo delle ceneri** è costituita dalla realizzazione di **speciali geometrie delle celle (celle asimmetriche, con diametro idraulico e volume dei canali di ingresso maggiori rispetto al canale di uscita)**, in grado di offrire maggiori sezioni di passaggio e dunque di contenere maggiori quantitativi di ceneri/PM.

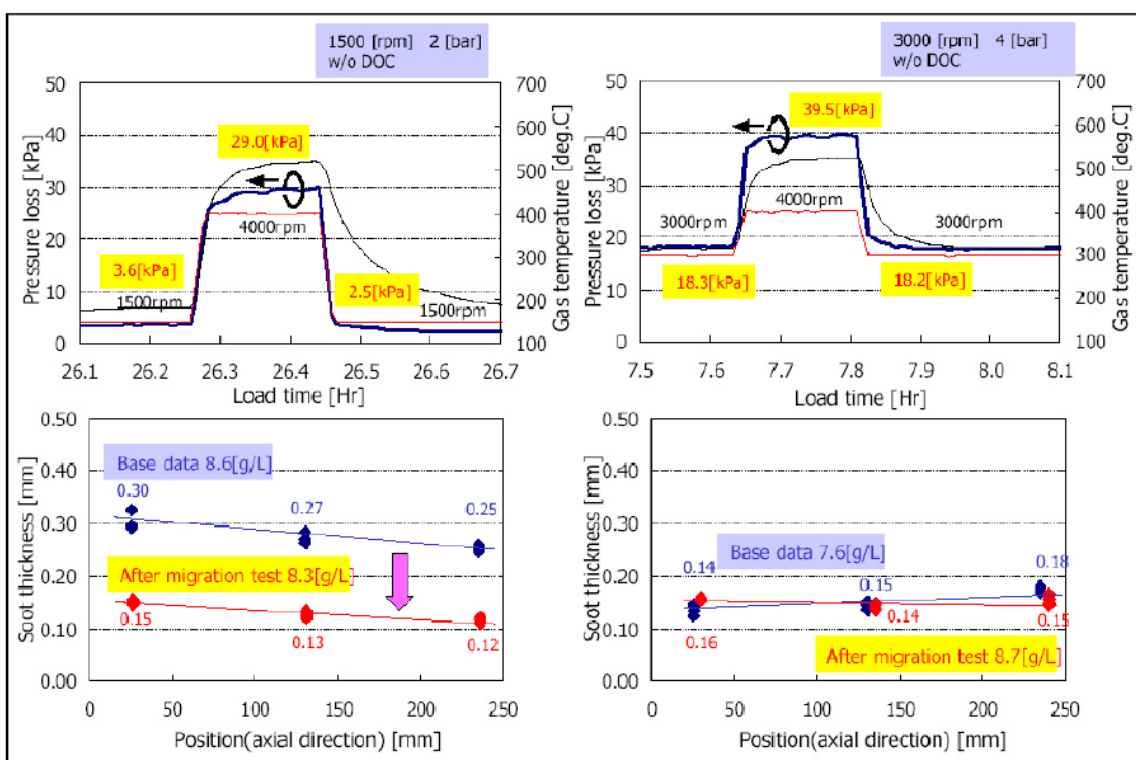


$\Delta p$  in funzione delle condizioni di funzionamento:



Curva viola -> temperatura  
 Curva rossa ->  $\Delta p$

Il  $\Delta p$  non è legato solo al quantitativo di soot ma anche alle **condizioni di funzionamento**. Prendendo in esame i due funzionamenti riportati nei grafici (1500 [rpm], 2 [bar] e 3000 [rpm], 4 [bar]), notiamo come **l'aumento di pressione sopraggiunga prima nel caso di funzionamento a più alta velocità angolare**; inoltre gli spessori di accumulo cambiano. Lo stesso discorso vale per i **transitori**:



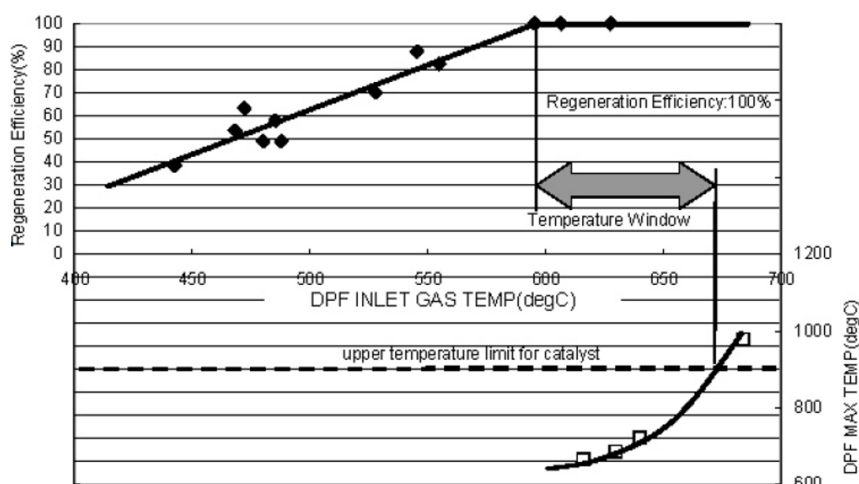


### Condizioni critiche:

**Frequenti e ripetuti brevi percorsi:** se il percorso è più breve della durata della rigenerazione si può accumulare molto soot (è difficile il controllo sul quantitativo di soot rimasto sul filtro e quindi la gestione del sistema): **il sistema deve intervenire**. Un primo modo di intervento consiste **nell'accensione di una spia** che ci dice che sarebbe bene continuare a mantenere in moto la vettura per completare il processo di rigenerazione. Quando il quantitativo di **soot raggiunge un valore doppio** a quello per il quale dovrebbe partire la rigenerazione allora il sistema comunica che vi è urgenza di recarsi all'**assistenza**. Se l'utente è recidivo e non si reca in assistenza il sistema (solitamente quando il quantitativo di soot raggiunge un valore **triplo** a quello per il quale dovrebbe partire la rigenerazione), il sistema interviene drasticamente, comunicando la necessità di **sostituzione del filtro**.

### Finestra di temperatura di rigenerazione

La temperatura all'ingresso del DPF deve essere sufficientemente alta da garantire elevate efficienze di rigenerazione, specie in presenza di elevati quantitativi di PM accumulato. D'altra parte, l'aumento di T all'ingresso del DPF porta a maggiori T all'interno del filtro, con rischio di danneggiamento del rivestimento catalitico per T superiori a 750-900°C (in funzione del tipo di rivestimento catalitico). Ne deriva, per un certo quantitativo di PM accumulato, una **finestra di T all'ingresso DPF in cui si ottiene la massima efficienza di rigenerazione senza danneggiare il rivestimento catalitico**. Uno degli obiettivi delle ricerche sui CSF è trovare soluzioni e materiali adeguati per estendere il più possibile tale finestra.

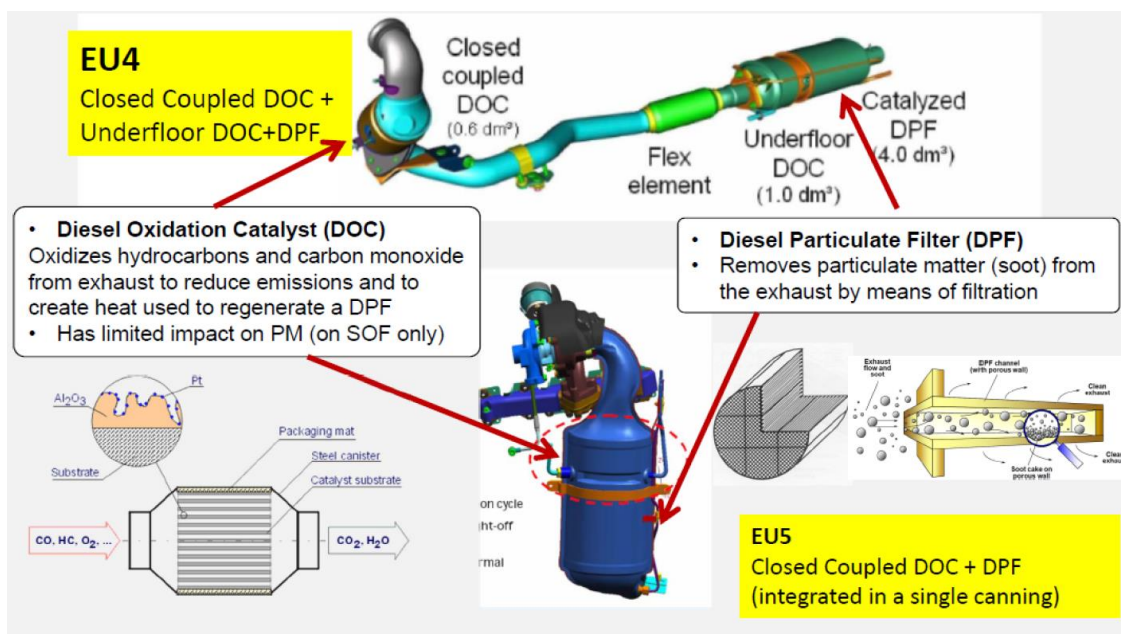


### DPF con Fuel Borne Catalyst (FBC)

Per ridurre le T necessarie, e quindi le fuel penalty, vengono utilizzate delle **sostanze catalizzanti**. Ci sono due alternative per portare queste sostanze nella zona di interesse: **fare un washcoat che le contenga (CSF)**; la trappola nasce nuda e **durante il funzionamento si riempie non solo di particolato ma anche di queste sostanze trasportate dal combustibile (FBC)** (storicamente viene adottata prima questa soluzione).

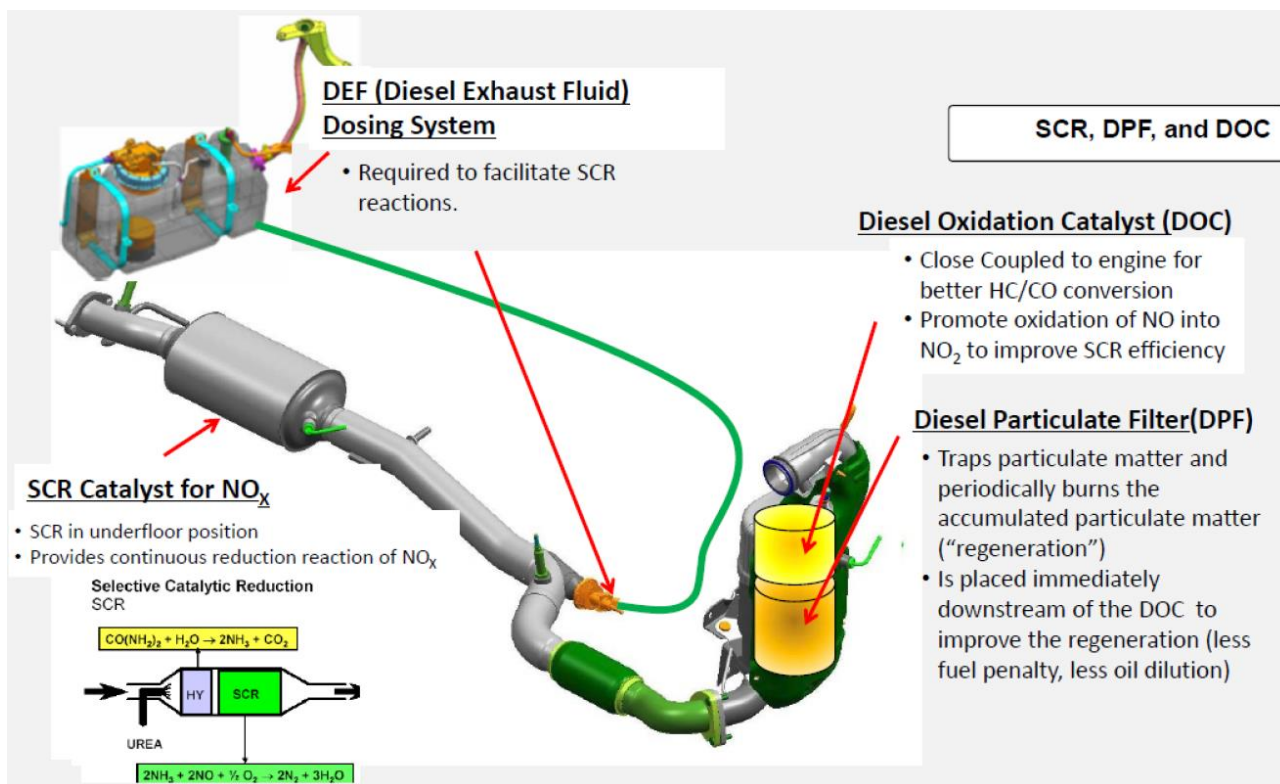
In questa tipologia di DPF la trappola nasce non catalizzata ma durante il funzionamento vengono introdotte **nel gasolio** delle piccole quantità di una sostanza catalizzante a **base di ceria (Eolys)**. La ceria viene automaticamente prelevata dal sistema di controllo del motore da un apposito serbatoio ed introdotto, ad ogni rifornimento, nel serbatoio del combustibile. Durante la combustione si formano nel cilindro delle **particelle di ceria (2-20 [nm]) intimamente mescolate con il PM**.

Layout per applicazioni EU4, 5 e 6



Fino all'Euro 5 vi era solo il sistema composto da DOC e DPF; con l'Euro 6 in poi il sistema di after treatment diventa più complesso, in particolare per post trattare gli NOx.

A livello di Euro 4 il DPF era un solo un optional per vetture di alta gamma e se era previsto si trovava under floor. Con l'Euro 5, con il quale non si riusciva a rispettare il limite di legge senza il DPF, lo si è spostato vicino al motore dopo il DOC (dunque doveva sopportare temperature più alte).



Euro6: DOC + DPF + (a valle) SCR (preview: sistema per il controllo degli NOx)

## Controllo delle Emissioni di Inquinanti 2019-2020 – Prof. E. Spessa – Appunti di Giovanni Sobrero

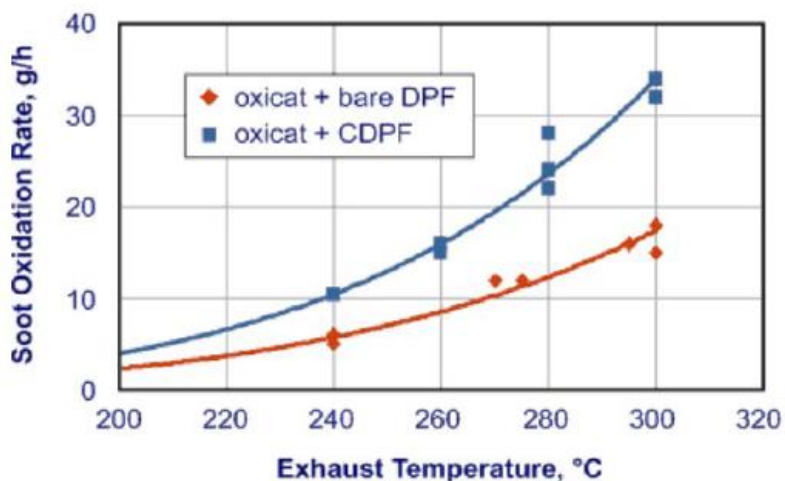
Perciò il cosiddetto **'regeneration margin'** (differenza tra capacità di rigenerazione controllata del PM nel CR-DPF e quantità di PM prodotta dal motore) deve essere mantenuto **positivo**. Inoltre, il **'regeneration margin'** deve essere **sufficientemente grande da poter affrontare le condizioni sfavorevoli** che si incontrano periodicamente durante l'utilizzo del veicolo, quali ridotte temperature ambiente, situazioni di traffico congestionato, guida urbana a basso carico, lunghi periodi con veicolo che staziona la minimo, usura del motore, scarsa manutenzione del motore stesso, ecc.

La diffusa applicazione dei sistemi CR-DPF ad autobus urbani testimonia che si possono garantire margini di rigenerazione positivi anche per veicoli con profilo di missione caratterizzato da basse T allo scarico (oltre che testimoniare la semplicità del CR-DPF, che non richiede collegamenti con il sistema di controllo del motore). **Tuttavia, tutti i veicoli con CR-DPF possono dover operare in condizioni in cui il 'regeneration margin' diventa negativo.**

Pertanto, nei motori diesel più recenti, si è soliti prevedere anche **una rigenerazione di tipo attivo** (elevando le T di scarico intervenendo sui sistemi flessibili di iniezione e di sovralimentazione) **che interviene solo quando il sistema di controllo identifica una condizione in cui la trappola è saturata di PM.**

Ulteriori sviluppi si sono concentrati su:

- Miglioramento delle capacità del catalizzatore di ossidare l'NO in seguito a prolungato invecchiamento con cicli di funzionamento a bassa T;
- Abbinamento del DOC ad un CSF (Catalyzed CRT Filter), in modo da ridurre la BPT (Balance Point Temperature).



**Figure 10.** Soot Oxidation Rate in CRT and CCRT

Engine-out soot = 20 g/h

## - Sistemi SCR (Selective Catalytic Reduction) con ammoniaca/urea

### Introduzione

#### Riduzione catalitica selettiva con ammoniaca (SCR):

Introduciamo un agente chimico specifico che va a reagire in modo selettivo con gli ossidi di azoto. Esistono due categorie di riduzione catalitica selettiva: una utilizza l'ammoniaca come specie riducente, l'altra utilizza gli HC (soluzione meno utilizzata).

L'**ammoniaca** può reagire in modo selettivo con gli NO<sub>x</sub> e trasformarli in N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Questa soluzione non nasce per applicazioni mobili; inizialmente era utilizzata in **processi industriali**. Successivamente venne utilizzata per applicazioni stazionarie, poi per **motori marini** e infine adottata per gli **autoveicoli** (prima heavy duty, oggi anche per i veicoli leggeri).

Nel SCR avvengono diverse reazioni; tra queste alcune sono desiderate altre indesiderate.

#### Reazioni catalitiche

##### Reazioni desiderate:

- 1)  $6NO + 4NH_3 \rightarrow 5N_2 + 6H_2O$
- 2)  $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$  (reazione dominante → per dosare la NH<sub>3</sub>)
- 3)  $6NO_2 + 8NH_3 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O$
- 4)  $2NO_2 + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 3N_2 + 6H_2O$
- 5)  $NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$  (reazione "fast")

È necessario che ci sia sufficiente NO<sub>2</sub> ma non troppo per evitare il più possibile le reazioni (3) e (4).

La reazione (5) è la più veloce, quindi è quella che si attiva prima a basse temperature. Per attivare questa reazione sarebbe bene avere un rapporto NO<sub>2</sub>/NO pari a 1:1. In un motore diesel il rapporto NO<sub>2</sub>/NO vale nelle migliori delle ipotesi  $3/7 \cong 0.5$  (in quanto abbiamo il 30% di NO<sub>2</sub> e il 70% di NO); dunque serve un qualcosa, prima dello SCR, che traduca lo NO in NO<sub>2</sub>: un catalizzatore ossidante (o il solito catalizzatore ossidante o un catalizzatore dedicato).

##### Reazioni indesiderate:

- 6)  $8NO_2 + 6NH_3 \rightarrow 7N_2O + 9H_2O$
- 7)  $4NO_2 + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 3N_2O + 6H_2O$

In certe situazioni, quando il livello di NO<sub>2</sub> diventa ancora più elevato, otteniamo come prodotti N<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>O. Lo N<sub>2</sub>O è sempre un ossido di azoto e ha un Global Warming Potential di 310 / 320. Dunque è opportuno che non avvengano.

Inoltre vi sono ulteriori reazioni indesiderate (reazioni in competizione):

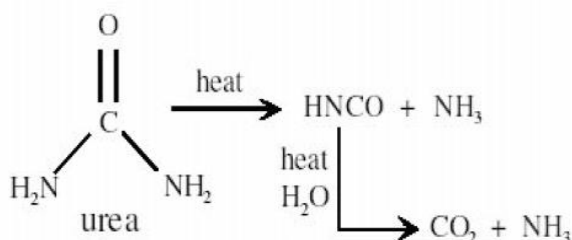
- 8)  $2NH_3 + 2O_2 \rightarrow N_2O + 3H_2O$
- 9)  $4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$
- 10)  $4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$

Vorremmo che l'ammoniaca reagisca solo con gli ossidi di azoto; tuttavia è possibile che reagisca anche con l'ossigeno; (9) viene così consumata ammoniaca che sarà disponibile in un minor quantitativo per le reazioni desiderate. Inoltre le reazioni (8) e (10) portano nuovamente alla formazione di ossidi di azoto.

## Urea

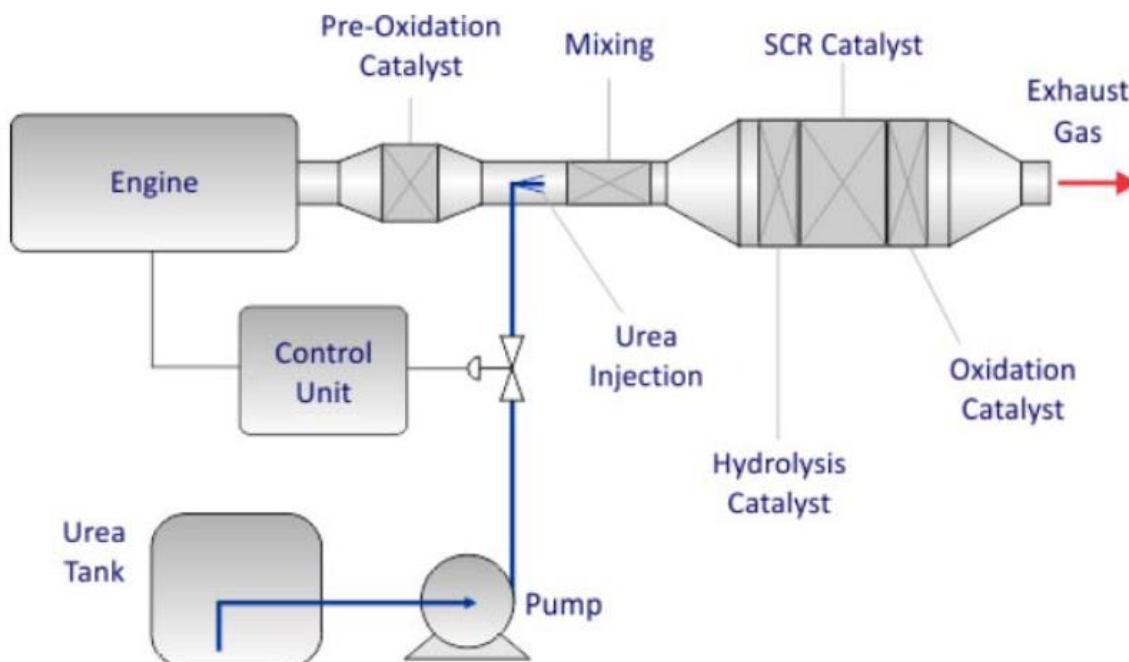
L'urea, in presenza di calore, ha la capacità di idrolizzare e formare ammoniaca. Invece di iniettare direttamente ammoniaca (tossica) viene iniettata **una soluzione acquosa di urea** che successivamente diventerà ammoniaca. Due problemi: l'urea viene introdotta in una soluzione acquosa -> **problemi di ingombro** (la soluzione acquosa di urea, come l'eolys, viene iniettata durante i tagliandi); inoltre **ghiaccia a -11 gradi** (bisogna prevedere delle soluzioni affinché non ghiacci).

*urea decomposition:*



## Configurazione del Sistema

(Segue uno schema con controllo ad anello aperto; volessimo migliorarlo potremmo aggiungere un sensore a monte per la misura degli NOx -> per iniettare non ci baseremmo più su una mappa ma sulla lettura del sensore; un sensore per la misura degli NOx allo scarico che funga da OBD oppure, ancor meglio, che chiuda il circuito di controllo -> ad anello chiuso; ne possiamo aumentare la qualità aggiungendo anche dei sensori per la misura dell'ammoniaca)

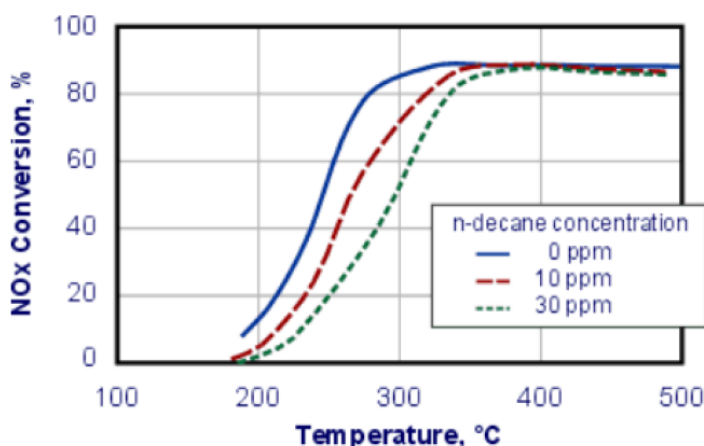


A monte dello SCR troviamo un primo catalizzatore (Hydrolysis Catalyst) che si occupa della idrolisi dell'urea per farla diventare ammoniaca.

L'Oxidation Catalyst = CUC (Clean-Up Catalyst): quello che serve a evitare il fenomeno della "ammonia slip".



### Impatto degli HC:

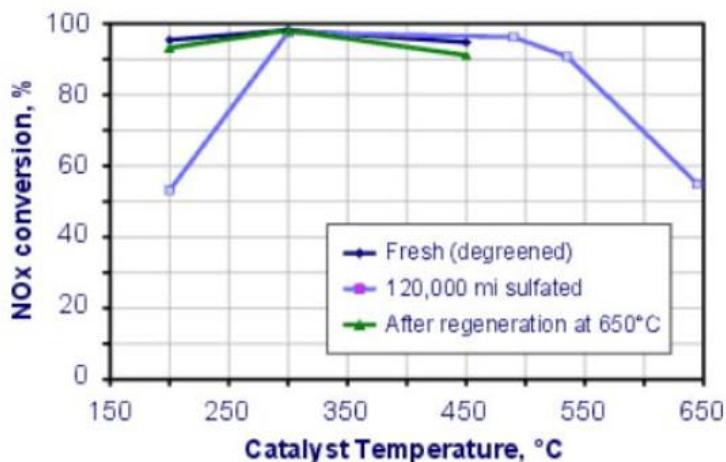


Bastano **pochi [ppm] di HC** per spostare la curva di conversione degli NOx.

### Impatto dello zolfo:

Rispetto ai catalizzatori a base di vanadio, quelli a base di zeoliti sono un po' più sensibili all'avvelenamento da zolfo; in ogni caso si tratta di un **processo reversibile**: basta esporre il catalizzatore a temperature un po' più elevate, lo zolfo si libera e il sistema ricomincia a funzionare correttamente.

Riferendoci all'avvelenamento da zolfo per i catalizzatori zeolitici analizziamo l'impatto dello zolfo sulla conversione degli NOx:



### Dimensioni e costi dello SCR

#### Dimensioni:

Un problema di questi catalizzatori è dovuto al fatto che sono di **taglia abbastanza grande**. Oggi riusciamo a scendere a una dimensione dello SCR pari a **1.5 – 1.2 volte la cilindrata del motore**. Teniamo conto del **pre-catalyst** che per esso contiamo **0.5 la cilindrata**, simile alla taglia del **CUC (Clean-Up Catalyst)**.

#### Costi:

il costo fisso (inerente all'iniettore, alla pompa, ...) è abbastanza alto ed è predominante sul costo aggiuntivo funzione della cilindrata del motore (se devo fare più grandi i componenti il costo cambia poco – no metalli nobili).

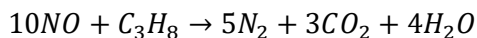


## - Sistemi LNC (Lean NOx Catalyst) o DeNOx

### Principio di funzionamento

Il sistema DeNOx è un SCR che utilizza come **agente riducente** degli **idrocarburi** al posto dell'ammoniaca.

A titolo di esempio, usando come idrocarburo rappresentativo il propano:



Si può anche avere la **formazione (indesiderata) di NO<sub>2</sub>** allo scarico.

I catalizzatori studiati in modo da promuovere selettivamente reazioni come quella indicata rispetto all'ossidazione competitiva e non selettiva degli HC da parte dell'ossigeno sono detti DeNOx o "Lean NOx Catalysts" (LNCs).

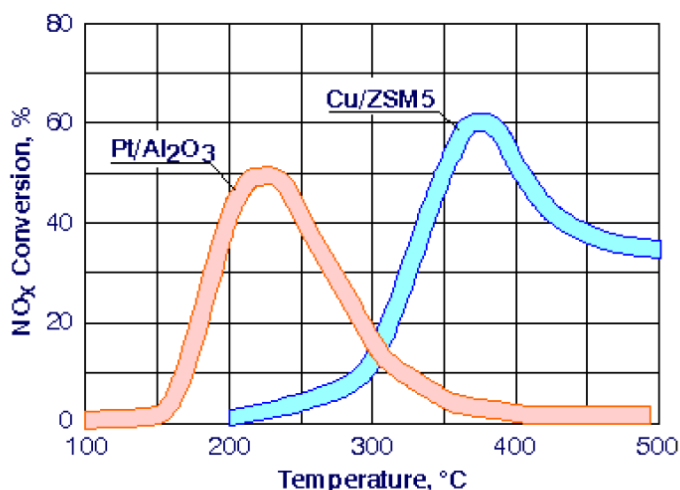
In particolare, si distinguono i "DeNOx passivi", che sfruttano gli HC naturalmente emessi dal motore, dai "DeNOx attivi", che prevedono l'introduzione di HC aggiuntivi (per es., di combustibile) a monte del catalizzatore. Questi ultimi permettono una **maggiore efficienza di conversione** a fronte di una maggiore complessità del sistema e di **maggiori consumi**.

I sistemi **DeNOx passivi** grazie alla loro **maggiore semplicità, affidabilità ed al basso costo** rappresenterebbero l'opzione più interessante per il controllo delle emissioni. Tuttavia, la **quantità limitata di HC (rispetto agli NOx)** fornita dal motore diesel può costituire un limite quando si vogliono ottenere elevate efficienze di conversione, specialmente se la selettività del catalizzatore è bassa.

Sono stati sviluppati due diversi tipi di DeNOx:

- Catalizzatori a base di platino/allumina (Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
- Catalizzatori a base di rame/zeolite (Cu/ZSM5).

Entrambi presentano svantaggi rispetto al sistema SCR ad urea, legati essenzialmente al **ristretto campo di temperatura di funzionamento, all'insufficiente resistenza all'invecchiamento termico** ed alla **scarsa tolleranza allo zolfo**. Tali svantaggi, uniti al fatto che la massima efficienza di conversione è dell'ordine del 40-60% (che si riduceva ad un valore medio del 10-20% sui cicli ECE/EUDC), ne hanno ostacolato l'impiego per applicazioni auto-motoristiche.



**Figure 2.** Selective Catalytic Reduction of NO<sub>x</sub> by Hydrocarbons

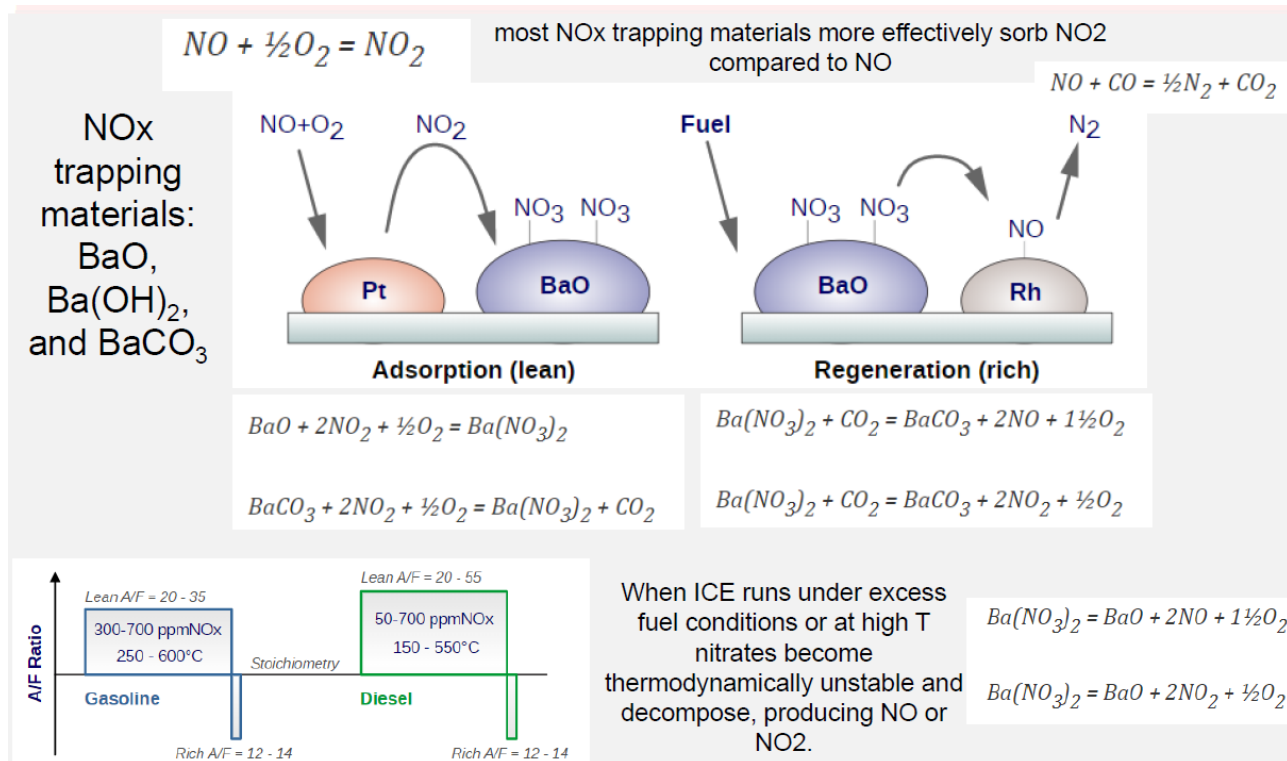
*Typical laboratory performance, HC1/NO<sub>x</sub> ~ 6-12*

### Confronto tra DPF e LNT:

(Pendolamento tra povero e ricco / condizioni di filtraggio chimico e rigenerazione)

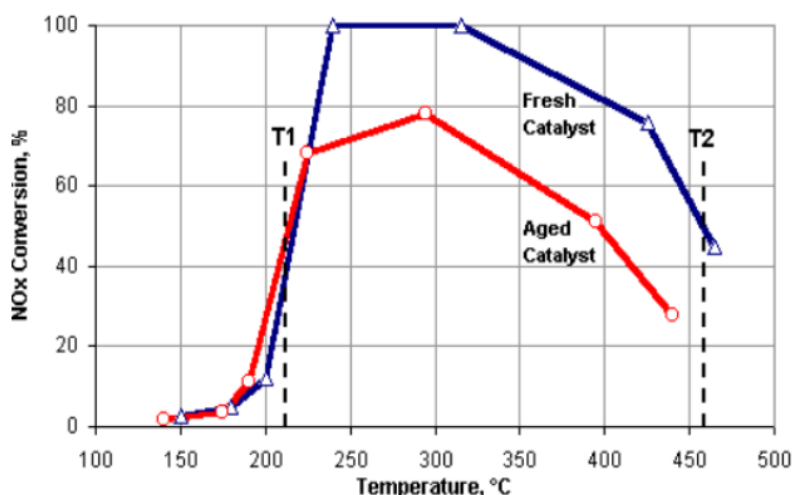
È simile al principio di funzionamento del DPF: anziché avere una trappola meccanica consta di una trappola chimica. Segue la rigenerazione: nel caso del DPF significava ossidazione delle particelle carboniose; in questo caso consiste nella riduzione degli ossidi di azoto. Mentre il filtro antiparticolato funzionava in modo normale per centinaia di [km] prima di rigenerare per una decina di minuti, **in questo caso il normale funzionamento dura qualche minuto prima che la trappola venga rigenerata per alcuni secondi.**

### Principio di funzionamento



Se abbiamo NO, per un corretto funzionamento, esso deve essere prima trasformato in NO<sub>2</sub> (in quanto vengono stoccati meglio): questa trasformazione è ottenuta da un **catalizzatore normalmente a base di Pt**. Lo NO<sub>2</sub> è quello che viene stoccato; l'elemento assorbente, che quindi è in grado di stoccare lo NO<sub>2</sub>, è un ossido o un carbonato metallico; normalmente il metallo che si utilizza è il **bario**.

L'ossido di bario / il carbonato di bario reagisce con NO<sub>2</sub> e ossigeno per dare nitrato di bario (nel secondo caso viene prodotta anche CO<sub>2</sub>, essendo un carbonato). Quando i siti di ossidi / carbonati di bario sono tutti esauriti il sistema deve switchare il suo funzionamento: la miscela deve diventare ricca. In presenza di miscela ricca, i nitrati di bario reagiscono con l'anidride carbonica per dare ossidi / carbonati di bario e NO e NO<sub>2</sub>. NO e NO<sub>2</sub> devono essere ridotti nel letto riducente a base di rodio per dare infine N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

**Efficienza di conversione e temperature caratteristiche:**

2.47 L adsorber on 1.8 L SI engine cycled 59 s lean and 1 s rich

La temperatura T1 è legata alla temperatura alla quale il catalizzatore è in grado di convertire gli NO in  $NO_2$  e riesce a ridurre gli NOx; quindi è determinata dall'attività del Pt e del rodio.

La temperatura T2 è legata ai nitrati di bario che, da un punto di vista termico, sono instabili; se la temperatura è troppo elevata, questi nitrati, anche nel povero, rilasciano ossidi di azoto.

Questa finestra di temperature si può modulare con un'opportuna formulazione del catalizzatore. Oggi si prova ad abbinare le tecnologie che abbiamo a disposizione. Per esempio, se mettiamo un SCR under floor, che funziona molto bene ma che può avere problemi alle basse temperature, possiamo pensare di mettere a monte del DPF non un DOC ma un LNT che ha una formulazione tale sia da controllare gli ossidi di azoto sia da catalizzare ossidante (avendo il Pt).

**SCR vs LNT**

La sperimentazione ha messo in luce alcuni **vantaggi dei sistemi SCR** ad urea rispetto ai sistemi LNT:

- **Campo di temperature di funzionamento più ampio** (non ha il problema di T1 e T2, piuttosto di bassa T);
- **Maggiore resistenza all'avvelenamento da zolfo** (molti sono basati sul vanadio che è meno sensibile all'avvelenamento da zolfo rispetto a Pt e Rh) (inoltre non c'è il problema dell'intasamento dei siti attivi);
- **Maggiore resistenza all'invecchiamento termico**;
- **Minori emissioni di HC e di GHG** (Greenhouse Gas) (legato al minor consumo del sistema);
- **Minore costo del sistema**;
- **Minori costi di funzionamento**;
- **Minore consumo specifico del motore** (la cui calibrazione, grazie alla maggiore efficienza del sistema, può essere ottimizzata per il minimo consumo di combustibile).

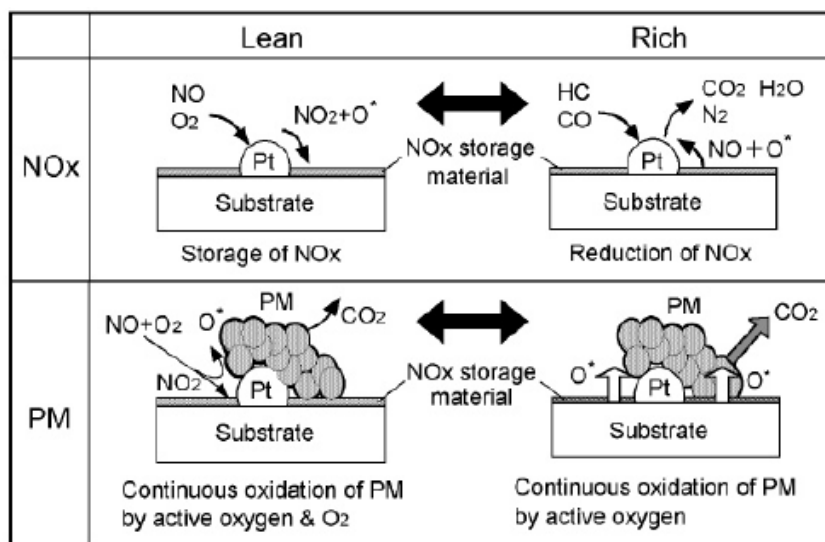
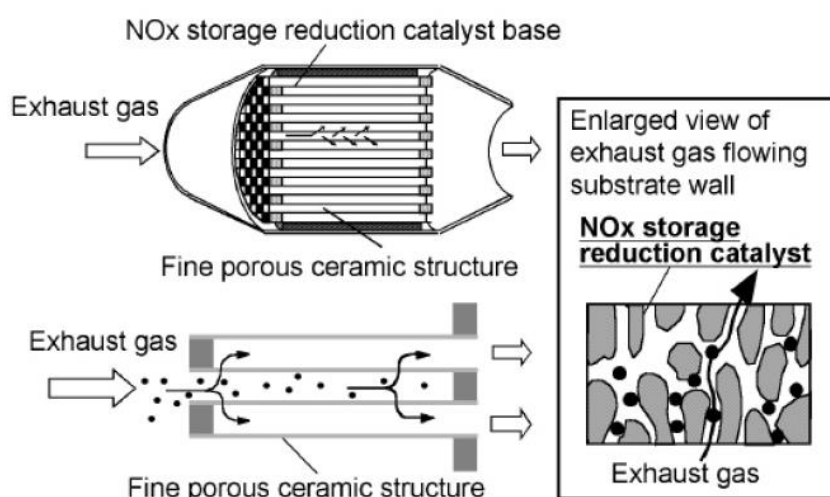
Il DPNR è costituito da un **monolita ceramico** poroso del tipo “wall-through” (**canali ciechi alternativamente**, come un filtro antiparticolato): i pori del materiale permettono l'intrappolamento del PM, mentre un **materiale in grado di assorbire gli NOx** è depositato sulla superficie del monolita ed all'interno dei pori. È presente inoltre una **sostanza catalizzante** (in genere il Pt).

**Per miscele povere, lo NO<sub>2</sub>**, prodotto dall'ossidazione dell'NO in presenza del metallo nobile, reagisce con il materiale assorbente e viene immagazzinato sotto forma di **nitrati (rilasciando ossigeno attivo)**.

Contemporaneamente, grazie all'eccesso di O<sub>2</sub> (nei gas di scarico) ed alla presenza di ossigeno attivo O\* (prodotto durante l'immagazzinamento degli NO<sub>2</sub>) si realizza anche **l'ossidazione continua del PM**.

**Per miscele ricche**, i nitrati in presenza del metallo nobile danno luogo ad O\* ed NO, che a sua volta si riduce a N<sub>2</sub> reagendo con CO ed HC presenti allo scarico.

**L'ossidazione continua del PM avviene ancora grazie O\* generato dalla riduzione degli NOx accumulati.**



La particolarità di questo sistema consiste nel fatto che è in grado di avere una percentuale di rigenerazione continua per quanto riguarda il PM rispetto ai sistemi tradizionali per una serie di motivi: vengono rilasciate delle molecole di ossigeno attivo che sono molto attive nell'ossidare il particolato -> possiamo fare una rigenerazione spesso continua -> il particolato si accumula meno -> risulta più “soffice”, quindi più facile da ossidare.

## 7.4 Trattamento delle emissioni allo scarico nei motori SI: GPF

- Introduzione
- Stato commerciale del GPF
- Materiali e configurazioni del GPF
- Effetti del GPF sul PN
- GPF RGN & Controllo

### - Introduzione

Si è notato che, con le sole tecniche in-cylinder, il motore GDI fa fatica a rispettare i limiti dettati dall'Euro 6 per quanto riguarda il particolato, **non tanto per la massa ma per il numero di particelle**. Quindi sono stati introdotti i GPF: Gasoline Particulate Filter: filtro antiparticolato per motori a benzina.

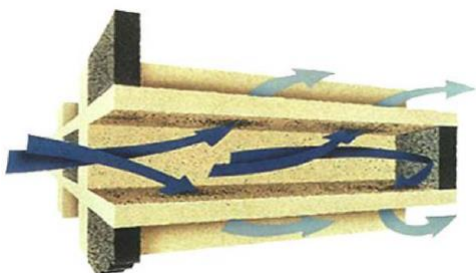
### - Stato commerciale del GPF

Nel 2018 dati di mercato indicano una **penetrazione del GPF sul mercato del 10%** dei veicoli a benzina.

### - Materiale e configurazioni del GPF

#### Materiale:

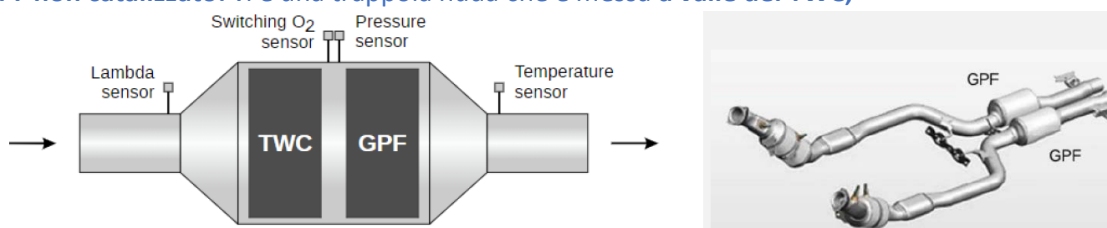
Si tratta di un monolita di tipo wall-flow (ricorda molto il filtro antiparticolato); il substrato che normalmente si utilizza è costituito da **cordierite** (si usano poco i carburi di silicio perché, rispetto ai motori diesel, le **rigenerazioni sono poche** -> il problema delle temperature è meno sentito: è vero che le temperature sono più alte ma essendo minore la frequenza di rigenerazione, il problema della durabilità termica è meno sentito).



#### Configurazioni:

ci sono due tipologie di GPF:

**GPF non catalizzato:** vi è una trappola nuda che è messa a valle del TWC;



**GPF catalizzato (GPF Coated):** il GPF presenta un rivestimento di Pd e Rh. Si può utilizzare o al posto del TWC (un unico pezzo) oppure in serie con il TWC: **in tal caso il Coated GPF viene messo vicino al motore per favorire la rigenerazione del sistema.**

**Rispetto a un motore diesel, il carico di washcoat è inferiore** (e in genere abbastanza ridotto: perché si tratta di un compromesso tra le prestazioni che deve avere il sistema e il fatto che le cadute di pressioni debbano essere basse)