



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 2041A -

ANNO: 2016

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

STUDENTE: Cagnazzo Emanuele

MATERIA: Controllo emissioni 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.**

# Introduction to the course

EZIO SPSSA:

DIP ENERGIA (ING. 2 PIANO 1) INTERNO 4482

EZIO SPSSA & POLITO. IT

Per avvenimento concorsuale a lezione (oppure tramite mail (risponde in))  
 CORSO: 80 ORE (65 IN AULA e 15 LABORATORI)

MODALITÀ D'ESAME: 2 DOMANDE ORALI (si fanno 30 minuti per ciascuna e così disse e forse dopo un'ora)  
 (si fanno nelle suppelte che si dovranno assolutamente. E come una  
 presentazione, costerà di solito all'ore  
 il primo che appare, affiora in base al candidato, per cui  
 controllare il docente prima per esigenze postiche così)

Prof. Ing. Ezio Spessa

Il corso di CONTROLLO DELLE EMISSIONI DI INQUINANTI si occupa di definire uno scenario tecnologico e normativo su quello che è il quadro del controllo delle emissioni inquinanti applicato ai motori termici. Negli ultimi anni il motore termico si trova sui veicoli in obsolescenza e delle macchine elettriche, per cui il controllo delle emissioni di inquinanti va anche considerato nel caso in cui si utilizzino delle tecnologie ibride, quindi veicoli elettrici, per il controllo delle emissioni inquinanti stesse.

I veicoli FULL ELECTRIC, pur essendo un mezzo per andare a impattare sulle emissioni di inquinanti, non saranno trattati in questo corso.

Nel corso si cercherà di capire:

- che cosa sono le emissioni inquinanti
- come tali emissioni si formano nei motori od accensione comandata e nei motori od accensione per compressione
- si analizzerà il CONTESTO NORMATIVO, molto importante in questo settore perché l'evoluzione tecnologica è guidata dall'evoluzione normativa (un costruttore produce un veicolo "verde" poiché obbligato da normativa). L'evoluzione tecnologica mira a produrre un risultato al costo minimo e soddisfacendo al contempo le esigenze del cliente (bassi consumi, comfort, ...). Tali esigenze molto spesso vanno a impattare sulle emissioni, per cui esiste un contesto normativo che obbliga il costruttore a produrre un veicolo verde.
- si analizzeranno infine le soluzioni tecnologiche che vengono utilizzate per andare a soddisfare tali requisiti imposti dal contesto normativo sia per motori od accensione comandata che per accensione per compressione. Tali tecnologie possono essere:
  - miglioramento dell'efficienza;
  - riduzione degli inquinanti prodotti dal sistema di combustione;
  - utilizzo di sistemi post-trattamento più efficienti che consentano di abbattere meglio le emissioni inquinanti allo scoppio;
  - sostituire i combustibili attuali con dei combustibili verdi
- ELETTRIFICAZIONE: dove l'elettificazione vuol dire che in un POWERTRAIN <sup>(SISTEMA DI PROPULSIONE)</sup> tradizionale per un motore termico solo ad aggiungere altre macchine elettriche che aiutino il motore termico o a performare meglio, o inquinare meno o consumare meno a seconda di qual è il mio obiettivo. Un altro passo sarebbe il veicolo completamente elettrico, scopo di quest'introduzione



senza capire come mai non è completamente corretto considerare il VEICOLO ELETTRICO come il veicolo del futuro. L'evoluzione verso l'elettrico è indubbiamente interessante, bisogna però mettersi d'accordo su cosa si intende per veicolo elettrico.

Quando si andrà in laboratorio si vedrà che quando si vanno a misurare le emissioni inquinanti da un motore attraverso determinate procedure e normalmente gli analizzatori effettuano delle misure di volume. Ormai dalla chimica è noto che si hanno concentrazioni di volume e concentrazioni in massa e se l'analizzatore misura delle concentrazioni di volume come faccio a passare alle concentrazioni in massa? (1° ASPETTO) E poi come le misuro, su quale emissione, in che modo? Durante le esercitazioni ci verrà spiegato operativamente queste cose come si fanno e si vedranno alcune applicazioni.

In laboratorio non hanno la strumentazione per misurare le emissioni di un veicolo, perché ci vorrebbe un banco aulli (elemento voluminoso), ma hanno delle strumentazioni che consentono di effettuare la valutazione degli inquinanti da motore su veicolo, ma non per fare test omologativi, ma per fare test di ADVANCED ENGINEERING o SVILUPPO ARCHITETTURA E TECNOLOGIA MOTORE.

Per stage e tesi in azienda all'estero muoversi e farlo presente al docente (con la redazione di un curriculum in inglese) entro dicembre (prima dell'8 dicembre).

Quali sono le motivazioni per cui nel 2015 stiamo ancora a parlare di motori termici?

Già 50 anni fa si guardava al motore termico come obsoleto, in quanto il motore elettrico era già stato sviluppato a meno di alcuni aspetti da ottimizzare. Tutta la ricerca sembra finalizzata a sistemi di propulsione alternative, come l'elettrico appunto, quindi la scelta di seguire un corso di motori termici sembrerebbe obsoleto.

Bisogna considerare però che anche andando a considerare lo scenario più ottimistico possibile dal punto di vista della penetrazione di un eventuale POWERTRAIN ELETTRICO ALTERNATIVO, per i prossimi <sup>anni</sup> 50 si avranno ancora motori termici.

Oggi uno dei grossi problemi per l'umanità è quello della richiesta energetica, dalla quale il mondo dei trasporti non può prescindere, in quanto un veicolo, per spostare oggetti dotati di massa richiede energia. Nel dettaglio richiede:

$$\frac{\text{ENERGIA}}{\text{UNITÀ DI TEMPO}} = \text{POTENZA}$$



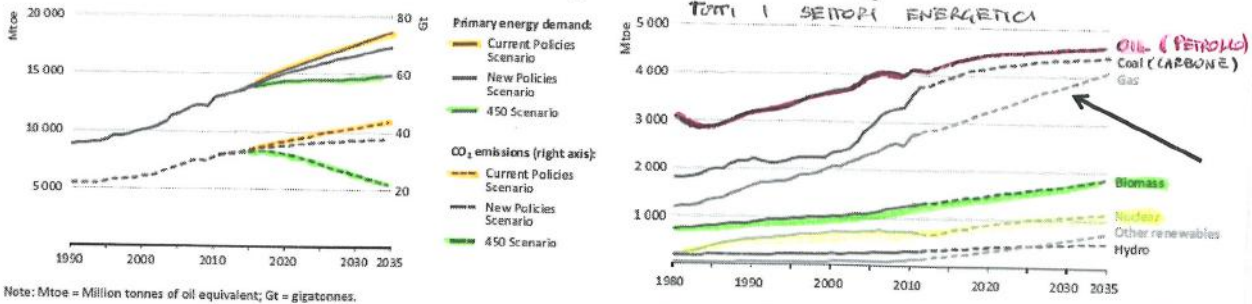
**N.B.** Un conto è l'energia e un conto è la potenza. (ENERGIA ≠ POTENZA)

Per il mondo dei trasporti sono importanti entrambe, in quanto un conto od esempio ha un problema energetico, ma ha anche il problema che bisogna spostare il carico che pesa su ruote tonnellate, per cui serve anche la potenza costellata.

Ci si concentra sull'aspetto energetico.

## World Energy Demand

### World primary energy demand (IEA Outlook 2014)



Nei due grafici si vede la domanda energetica complessiva (a sinistra) e a destra è <sup>(divisa)</sup> spartita per le varie fonti di energia. Essa è espressa in MTOE (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). Si vede dunque che c'è un trend a crescere e si ha fino a un certo punto un tratto unico e poi si separa. Ciò accade perché sino al 2015 i dati sono a noi noti (in realtà sino al 2014), mentre da lì in poi sono delle stime, e quindi tali stime dipendono dalle ipotesi che facciamo. Di conseguenza a seconda degli scenari che andiamo a configurare possiamo avere delle situazioni diverse.

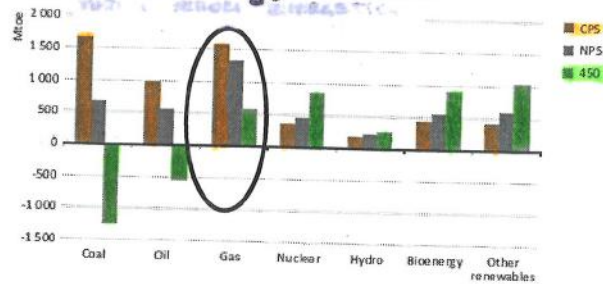
Lo scenario obsolescenza (CURRENT POLICIES SCENARIO) è uno scenario in cui si prevede di usare fosse fossili combustibili rispetto alle situazioni attuali; lo scenario verde (NEW POLICIES SCENARIO) è quello che riguarda l'introduzione di elementi rinnovabili, sostituendo i più convenienti possibili; lo scenario verde (450 SCENARIO) è una linea verde. Il 450 è relativo al problema del riscaldamento globale (GLOBAL WARMING), che deriva dal fatto che nella nostra atmosfera si hanno % crescenti di gas serra, uno di questi è la CO2 che è emessa da tutti i sistemi di combustione, che ha portato ad un aumento della temperatura media planetaria. Tale scenario ipotizza di avere un intervento talmente severo da riuscire a limitare da qui ai prossimi 50 anni questo aumento a soli 2°C. I conti che hanno fatto i meteorologi indicano un 450 ppm il limite di CO2 che si deve avere in atmosfera. Se si riuscisse a rispettare tale target si attesebbe la curva verde.

Diunque tale curva verde è il caso migliore, la curva arancio è il worst case, la curva nera è la situazione più probabile. Quindi volendo guardarsi un trend guardarsi la curva nera, se invece dovessi fare una valutazione limite guardarsi la curva verde, la curva arancio è poco credibile.

Indipendentemente dallo scenario considerato, la richiesta energetica primaria va ad aumentare sempre da qui al 2035.

### Shares of energy sources in world primary energy demand

Fossil fuels are likely to remain the dominant energy sources in 2035 whereas the share of the overall primary fuel mix varies markedly according to the foreseen scenario.



Note: CPS = Current Policies Scenario; NPS = New Policies Scenario; 450 = 450 Scenario.

Nel grafico sopra si vedono le emissioni di CO<sub>2</sub>, che sono correlate al consumo di energia primaria, ma il trend potrebbe non essere lo stesso perché di mezzo c'è l'efficienza del sistema. Se ho un sistema molto efficiente, evidentemente riesco a soddisfare alcuni bisogni energetici dell'utente finendo spendendo meno energia primaria ed emettendo meno CO<sub>2</sub>, perché consumando meno energia fossile riesco a emettere meno CO<sub>2</sub>. Quindi si vede che l'impatto sulla CO<sub>2</sub> è diverso scenario per scenario. In tal caso con lo scenario arancio abbiamo un incremento, con lo scenario nero le emissioni di CO<sub>2</sub> saranno più o meno costanti, nello scenario verde devono diminuire per raggiungere questo target di 450 ppm.

Nel grafico a dx a pag. 3 prendiamo la curva nera che è la più probabile e andiamo a fare lo splitting di come questo aumento di energia primaria è diviso tra le varie forme di combustibile. Viene fuori un aspetto importante: l'aumento costante fino al 2035 è rappresentato da un importante contributo di combustibili fossili come petrolio, carbone e gas naturale (metano).

Il gas naturale, è sempre una fonte fossile (quindi esauribile), ma rispetto a petrolio e carbone è una fonte più verde, non emette particolato, emette meno CO<sub>2</sub> perché ha un rapporto atomi di idrogeno e carbonio più favorevole.

Nel grafico molto si vede che, a parte il nucleare, le restanti sono fonti rinnovabili, come le biomasse, l'idroelettrico, oltre fonti rinnovabili (eolico e solare).

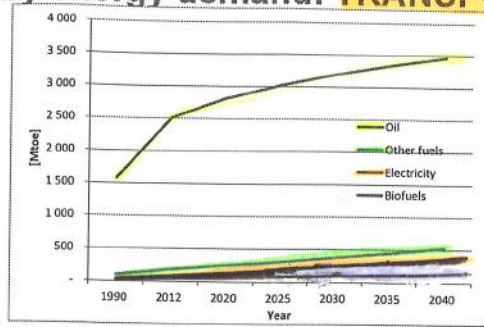
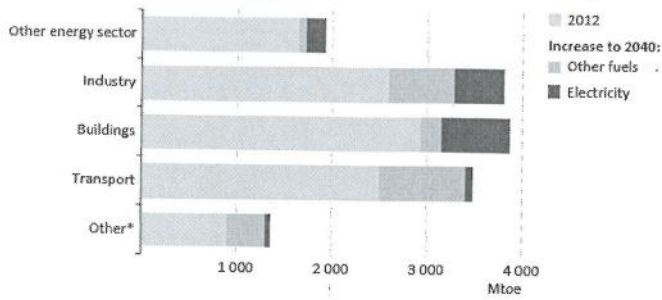
Quindi nonostante l'aumento di queste forme di energia rinnovabili, il grosso della potenza si continuerà a giocare coi combustibili fossili tradizionali.

Questo è un quadro generale, e noi in particolare interesse al settore dei trasporti.

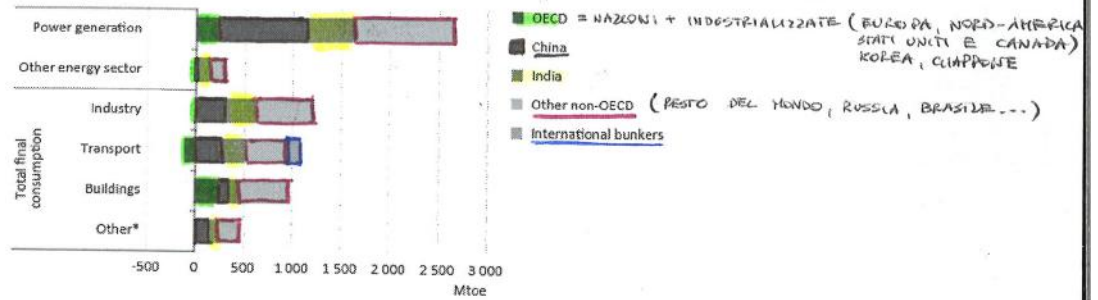


# World Primary Energy Demand - NPS

## Shares of energy sources in world primary energy demand: **TRANSPORT**



← SOLO SETTORE TRASPORTI



\*Other includes agriculture and non-energy use. Note: Total final consumption includes electricity and heat generated by the power sector.

Source: IEA, World Energy Outlook 2014

Come si vede nel grafico in alto a dx relativo al solo settore trasporti (se confrontato col grafico a pag. 3 relativo a tutti i settori energetici) ciò che importa è la richiesta di energia primaria come petrolio, altri combustibili (gas naturale), elettricità e biocombustibili (derivati dalle biomasse). Confrontando le 2 slide si vede che il settore dei trasporti sarà ancora dominato dal petrolio da qui al 2035 in misura piuttosto rilevante. Tale dipendenza è di tipo moltiplicativo, quindi ad es. 3500 non sono Mtoe del petrolio, ma la somma di tutto quello che ci sta sotto, quindi per coprire quanto petrolio viene consumato bisognerebbe fare  $3500 - 500 = 3000$  Mtoe nel 2035 a fronte di 500 Mtoe di altre fonti primarie (principalmente gas naturale). Si vede inoltre un contributo del gas naturale  $\approx 200$  Mtoe, e il contributo dell'elettricità  $\approx 50$  (curva arancio - curva nero) e il contributo dei biocombustibili però anch'esso  $\approx 200$ .

Questi sono dunque risultati che si otterrebbero seguendo la curva (scenario) nera.

L'aspetto caratterizzante del settore dei trasporti è che la sua richiesta di energia è dominata dal petrolio e lo sarà da qui ai prossimi 20 anni.

Dal punto di vista energetico non è una cosa buona per motivi ambientali (dovuti alla combustione) ed anche geopolitici (legati all'approvvigionamento).

Al contrario, ad es. la produzione di energia elettrica utilizza molto più il gas naturale e le rinnovabili rispetto ai combustibili fossili, quindi lo scenario è un po' cambiato.



Considera il grafico sotto a pag. 5:

andando a fare una distinzione tra quello che andrà a capitare nelle varie regioni mondiali, si vede come nei paesi OECD (+ industrializzati) il consumo di petrolio è addirittura in diminuzione, mentre a sorreggere i paesi in via di sviluppo <sup>(Cina, India...)</sup> che da qui al 2035 ne consumeranno di più (in quanto nei paesi in via di sviluppo c'è meno attenzione ai problemi di efficienza) e a ciò si aggiunge il boom demografico dovuto alla crescita economica e quindi alla produzione di molti più veicoli con conseguente aumento della richiesta di combustibili fossili).

Per INTERNATIONAL BUNKERS si intende il consumo di combustibile per viaggi transcontinentali, come consumo energetico dovuto a voli o aerei che fanno viaggi internazionali non esecrabili o uno stato, ma vengono allocati a questi internazionali bunkers. In particolare per il TRASPORTO SU STRADA è quello che dipende maggiormente dal petrolio perché per quello su rotaia ormai è stato elettrificato, le navi vengono mosse anche da turbine nucleari.

Per limitare la dipendenza dal petrolio nel settore dei trasporti si fanno 2 azioni:

- FUEL SWITCHING → CAMBIARE IL TIPO DI COMBUSTIBILE
- IMPROVING SYSTEMS EFFICIENCY → MIGLIORARE L'EFFICIENZA DEL SISTEMA (consumando meno combustibile)

Il FUEL SWITCHING comprende:

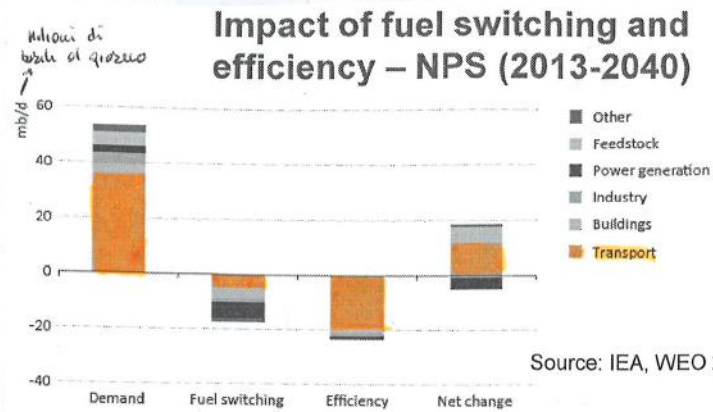
- interventi di trasformazione del petrolio in gas naturale o lo sostituisce con un combustibile derivante da biomassa;
- interventi di trasformazione del veicolo in un veicolo spinto da un motore elettrico

Un veicolo ibrido <sup>(vulgaris)</sup> andrà inserito nella categoria EFFICIENCY, in quanto ha il motore elettrico in cui si è il motore termico, quindi quando la batteria è carica può <sup>oppure si spegne</sup> ~~sostituire~~ quando la batteria si scarica aspetta che il motore termico lo ricarichi, quindi il sistema è chiuso e l'energia cinetica del veicolo viene recuperata e ricaricata la batteria esterna che non sia la benzina o il gasolio, dopodiché il sistema elettrico migliora l'efficienza del powertrain.

Un veicolo IBRIDO PLUG-IN (veicolo ibrido con batterie ricaricabili esternamente) ha un po' più di batterie rispetto all'ibrido normale e tali batterie consentono una ricarica dall'esterno collegandosi alla rete. Ciò permette di avere seppur brevi percorrenze solo grazie alla propulsione elettrica, per cui il veicolo ibrido

è un esempio di FUEL-SWITCHING, perché si vorrebbe un veicolo a tutto solo ed esclusivamente elettrico.

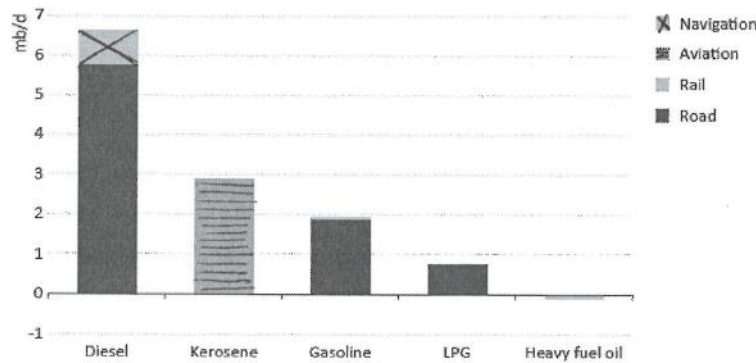
Ovviamente sono compresi in tale categoria anche i veicoli puramente elettrici.



Quindi per quanto riguarda il settore dei trasporti il grosso del contributo lo dà l'EFFICIENCY e una parte del contributo più piccola lo dà il FUEL-SWITCHING, che non comprende solo l'elettrico, ma include anche il combustibile derivante da biomassa, il gas naturale ecc...

## Oil demand & Transport Sector

### Oil demand change by main product and transport sub-sector NPS (2013-2040)



Oggi a livello mondiale la benzina e il Diesel sono quasi equivalenti; predomina la benzina essendo 22 mb/d (milioni di barili al giorno) che vengono utilizzati per produrre la benzina e 18 mb/d vengono utilizzati per produrre gasolio. Nel 2030 probabilmente il diesel sarà la fonte più utilizzata perché, pur sviluppandosi sistemi di propulsione alternative, questi toglieranno terreno alla benzina e non al gasolio, in quanto esso è utilizzato per il trasporto pesante. Si potrà dunque fare un ibrido per il trasporto di persone, mentre un autocarro che si potrà creare tonnellate e ha lunghe percorrenze innanzitutto è difficile farlo elettrico (in quanto a vorrebbero troppe batterie) e sarebbe anche difficile farlo a gas per assenza di infrastrutture di rifornimento (se ne hanno poche). Per cui il fatto che il Diesel è progettato per superare la benzina 7

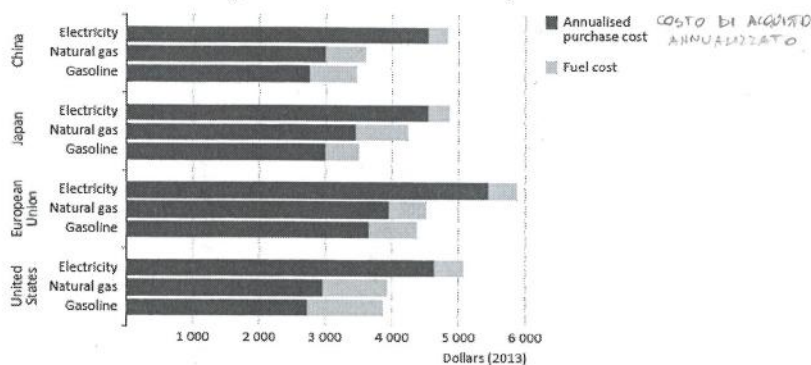


occorre perché si formino tutte una serie di interventi migliorativi sul powertrain che mi consentiranno di fare FUEL-SWITCHING che sarà a sfavore delle benzine, mentre sul diesel (trasporto pesante) sarà e quindi diversa predominante nel 2030.

Considerando il FUEL-SWITCHING verso combustibili alternativi, il problema è che i veicoli con combustibili alternativi presenteranno dei costi maggiori (come si vede nel grafico sotto) e quindi una soluzione di questo tipo sarà

## Oil demand & Transport Sector

Discounted total annual costs of passenger LD vehicles NPS (2020)



praticabile solo in presenza di incentivi da parte di costruttori e stati membri.

Si vede dunque nella slide, per quanto riguarda diverse soluzioni di veicoli e diversi paesi europei (e USA) il costo d'acquisto del veicolo omologato e il costo del combustibile omologato.

Si nota come per i veicoli a gas si ha un costo del veicolo omologato più alto rispetto al veicolo a benzina (anche se il costo del combustibile è più basso di quello della benzina). Quindi per abbassare il prezzo dei veicoli a gas ci vorrebbero delle politiche di incentivi che comunque variano molto a seconda dei diversi scenari politici e geografici.

### EMISSIONI DI CO<sub>2</sub>

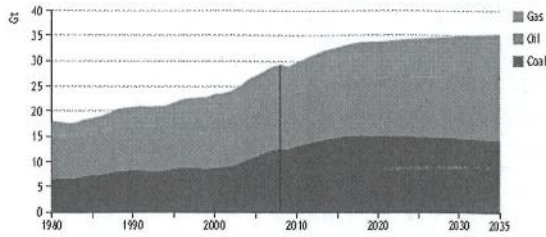
Il mondo dei trasporti è dominato dal petrolio, che è un combustibile fossile e i combustibili fossili emettono CO<sub>2</sub>

Come si vede leggendo la tabella a pagina 8 il settore dei trasporti, appunto perché dominato dai combustibili fossili, dopo la power generation è quello che viene prima nella produzione di CO<sub>2</sub>.



# What is the impact on CO2 emissions?

## World energy related CO2 emissions by fuels (NPS)



Region	1980	1990	2000	2006
OECD	2 254	2 713	3 295	3 513
North America	1 423	1 622	1 951	2 108
United States	1 229	1 412	1 701	1 809
Europe	605	770	915	983
Pacific	226	321	429	422
Japan	156	208	255	244
Non-OECD	855	1 239	1 527	1 952
E. Europe/Eurasia	301	445	285	353
Russia	n.a.	296	188	227
Asia	210	339	578	773
China	81	121	229	371
India	56	82	92	101
Middle East	79	150	217	303
Africa	83	105	149	185
Latin America	181	201	298	338
Brazil	72	81	126	141
World*	3 652	4 565	5 630	6 446
European Union	n.a.	749	879	948

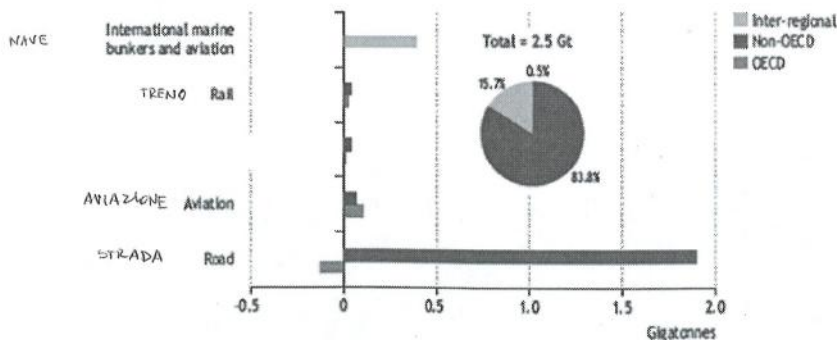
\*Includes emissions from international marine bunkers and international aviation.

	2006	2030
World energy-related CO <sub>2</sub> emissions (Gigatonnes)	27,89	+12,66
Power generation	41%	+54%
Transport	23%	+20% <sup>1/5</sup>
Industry	16%	+14%
Residential, Services, Agriculture (direct)	10%	+5%
Other	8%	+7%

02IHDNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

# What is the impact on CO2 emissions?

## Change in transport sector CO2 emissions by mode and region (Ref. Scenario 2008; timeframe 2006-2030)



According to this study, **transport contributes one-fifth** of the increase in global emissions to 2030, growing from 6.4 Gt in 2006 to 8.9 Gt in 2030.

Si hanno 2 aspetti di cui bisogna tenere conto:

- 1) Distribuzione geografica
- 2) Modo di trasporto (nave, treno, aviazione, strada)

Si vede che il maggior contribuente all'aumento di CO<sub>2</sub> è la strada in quanto sul

02IHDNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

breve gioco sull'elettrofissione, gli aerei sono in bassa intensità rispetto alle auto, mentre per le navi si possono avere differenti sistemi propulsivi.

Per quanto riguarda il fattore geografico si vede come nei paesi OECD si osserva una diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> (grazie all'evoluzione delle forme alternative di propulsione) mentre l'incremento delle emissioni è dovuto in larga parte ai paesi in via di sviluppo.

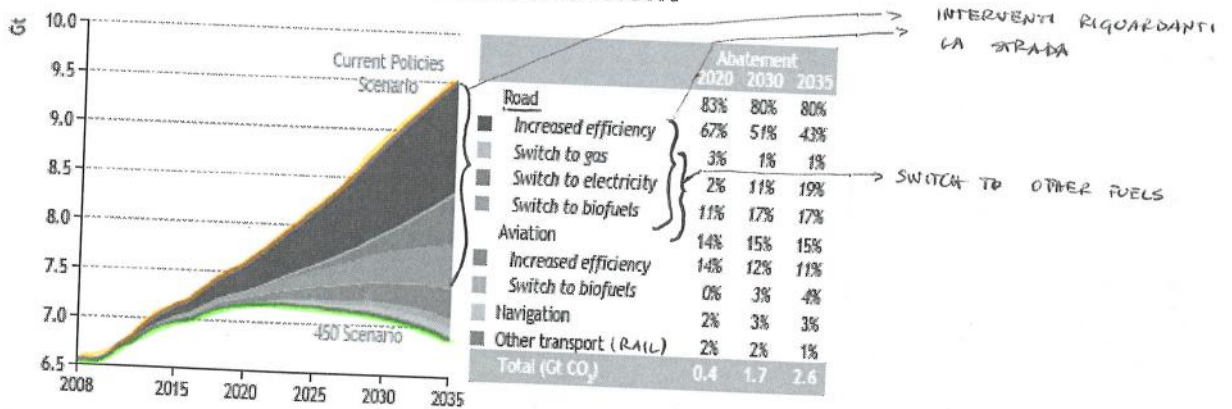
- L'ACCORDO DI COPENAGHEN E LO "SCENARIO 450"

Accordo su base volontaria per ridurre la CO<sub>2</sub> e farlo in modo che non superi 450 ppm nell'atmosfera e che quindi non si superino i 2°C di aumento della temperatura media planetaria.

Volendo dunque andare a cambiare i valori delle emissioni di CO<sub>2</sub> in modo da tentare di rispettare l'accordo di Copenaghen, cosa dovremmo fare con particolare riferimento al mondo dei trasporti?

## Increased efficiency and energy-source switching

World transport-related CO<sub>2</sub> emission abatement



Dovrei innanzitutto osservare ed avere 450 ppm di CO<sub>2</sub> in atmosfera, alla base se la curva verde (in base a quanto stabilito dalla INTERNATIONAL ENERGY AGENCY).

Si nota dal grafico che l'aspetto "ROAD" è quello che ha più impatto.

La maggior parte si ha per il miglioramento dell'efficienza e in misura minore per la sostituzione del petrolio con fonti alternative. Ovviamente non si deve produrre l'elettricità col carbone (ma con fonti rinnovabili) altrimenti lo switch to electricity avrebbe poco impatto.

La prima grossa fetta riguarda il MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA DEL POWERTRAIN o meglio del VEICOLO, che vuol dire forse meglio l'aerodinamica, ridurre la resistenza al rotolamento degli pneumatici, ridurre il peso e in particolare



migliorare l'efficienza del motore, che risulta uno degli elementi più importanti.

- SWITCH TO BIOFUELS: al posto di usare un combustibile fossile, uso un combustibile derivato da biomassa (esempio etanolo che si usa in Brasile ottenuto dalla sofferazione di un alcool ottenuto dalla coltivazione delle canne da zucchero). Ciò non vuol dire che il motore debba funzionare al 100% etanolo o biocombustibile, ma ad esempio il combustibile alla pompa deve contenere una certa percentuale di biocombustibile (fino a un 5%). Un combustibile fossile include già percentuali di combustibile derivato da biomassa.

Un'altra idea è quella di utilizzare i rifiuti organici (che producono, se smaltiti,  $CO_2$  e  $CH_4$  oppure vengono utilizzati per realizzare concimi) tramite processi anaerobici che consentono di convertirli in biogas, ossia un gas che contiene metano +  $CO_2$  + monossido di carbonio + altri. Si fanno poi degli impianti di upgrading che tramite dei bilanci convertono il biogas in metano più o meno puro oxidando e sepolso di fatto le  $CO_2$ . Questo metano potrà dunque essere bruciato sulle vetture (che non ne indagano la provenienza fossile o da biomassa).

Questo risulta un processo a zero emissioni <sup>di  $CO_2$</sup> , perché il carbonio che è stato esibito dalla biomassa è quello che si ricommette in atmosfera nel momento in cui si rilascia la  $CO_2$  che viene prodotta nel processo di fermentazione e si rilascia la  $CO_2$  prodotta dal processo di combustione.

In definitiva dunque non si ha una soluzione per arrivare a questo target del 2035, ma un mix di soluzioni utilizzabili al contempo.

Il problema non è quale soluzione utilizzare, ma quando.

Quindi se andiamo a vedere un orizzonte temporale è chiaro che verranno introdotte prima certe soluzioni e poi altre.

Gli elementi che ci dicono quale introdurre prima e quale dopo sono 2:

- ASPETTO LEGISLATIVO
  - ASPETTO ECONOMICO
- > collegati tra loro



Se dal punto di vista normativo non fossi nulla noi andremmo lungo la linea oracolare (i costruttori si metterebbero su tale curva se la normativa sulle emissioni fosse assente). In presenza di normative che impedisse uno spostamento sulle curve verdi è importante sempre effettuare una analisi COSTI-BENEFICI, non potendo chiedere ai costruttori di introdurre una tecnologia che costerebbe tantissimo e che il cliente non acquisterebbe. L'evoluzione normativa deve essere fatta con cautela per evitare ciò, infatti non si sta togliaendo la curva verde, ma una curva intermedia. Lo scenario 450 risulta dunque essere uno scenario limite, che si tiene come modello ma che probabilmente non si raggiungerà.

Supponiamo però di ragionare nel worst-case per chi produce motori, ossia supponendo lo scenario 450 (curva verde). Ci si chiede come saranno fatti i veicoli nei 2 casi limite nel 2035, ossia curva rossa e curva verde. Nella slide <sup>13</sup> Y si vede come per 2 categorie di veicoli:

PLDV = PASSENGER LIGHT DUTY VEHICLE

LCV = LIGHT COMMERCIAL VEHICLE

Molto spesso i veicoli commerciali che effettuano le consegne e le autovetture sono chiamati veicoli light duty perché possono fare loro vita e lavorare a carichi pesanti (max potenza e max coppia soggette poche volte).

I cicli normativi prevedono questo e quindi l'omologazione di un veicolo (di un'autovettura o veicolo commerciale per consegna) viene fatta su cicli guida che tengono conto di questo fenomeno.

I veicoli heavy duty (autotreni) sono definiti tali in quanto basandosi dietro strutture trussolate il motore lavora a carichi elevati, deve dare coppie consistenti per tutta la vita del veicolo.

I veicoli heavy duty non saranno interessati da alcun tipo di switch.

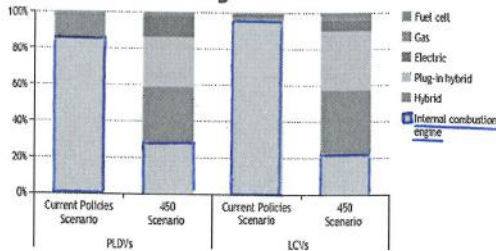
Ci si concentra sui veicoli light-duty.

Considerando lo scenario attuale si vede dal grafico come la maggior parte delle autovetture e anche dei veicoli commerciali leggeri sarebbero veicoli dotati di motori a combustione interna, con altre piccole percentuali di veicoli ibridi e fuori alternative.

Nello scenario 450 il motore termico si ferma al 30% di vendite.

# What is the transformation required by road transport?

VENDITE VEICOLI NEL 2035  
Vehicle sales by 2035

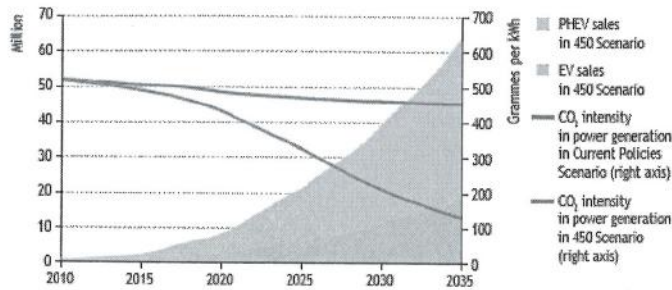


Note: PLDV's = passenger light-duty vehicles; LCV's = light commercial vehicles.

By 2035, about 70% of PLDV sales are advanced vehicles (electric cars, hybrids and plug-in hybrids).

Almost 60% of vehicles sold still primarily use internal combustion engines, but either in hybrid vehicles or in highly-efficient flex-fuel vehicles.

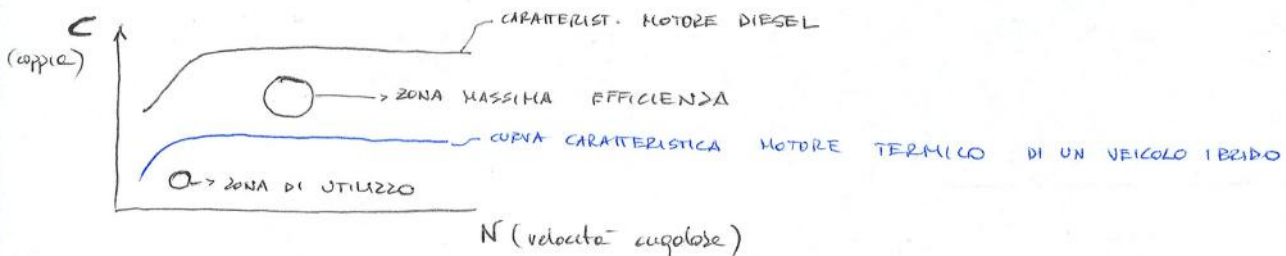
## Sales of electric and plug-in hybrid vehicles (450S) and CO<sub>2</sub> intensity in the power sector



Note: Includes passenger light-duty and light commercial vehicles. PHEV = plug-in hybrid electric vehicles. EV = electric vehicles.

e tutto il resto è elettrico. Il motore termico allora potrà essere pensato in una nuova concezione. Ad esempio se il motore elettrico facesse tutta i transitori e il motore termico facesse la parte di regime (funzionasse cioè a velocità costante e carico costante) il motore termico potrebbe essere ripensato in un'ottica di downsizing.

Oggi, considerando un motore diesel od es., questo deve essere progettato in maniera tale da dare la massima potenza a 4000 giri/min, una coppia costante da 4000 giri/min a 1500 giri/min come si vede nel primo grafico:



La zona di utilizzo del motore risulta essere molto più bassa della curva caratteristica e della zona di massima efficienza perché la vettura deve essere "fun to drive", avere capacità di superare pendenze, accelerazioni... Considerando un veicolo ibrido potrei avere una curva caratteristica più bassa per il motore termico e quelle volte che ho bisogno di potenza supplementare



se uso il motore elettrico (ad esempio nei transistori). Per cui anche nello "scenario" si avrà l'uso del motore termico in applicazioni su veicoli PLUG IN HYBRID.

## - CONTESTO NORMATIVO

Si hanno differenti contesti normativi suddivisi per aree geografiche e per tipologie di veicoli (autovetture, veicoli commerciali leggeri e veicoli heavy-duty).

Un veicolo di nuova concessione omologato oggi deve essere EURO 6, però i concessionari possono continuare a vendere veicoli omologati in precedenza EURO 5 fino a gennaio 2016.

Le norme normative EURO 1, 2, 3, 4... sono quelle che regolano le emissioni inquinanti del motore che non può emettere più di un tot di ossidi di azoto, particolato, monossido di carbonio e idrocarburi incombusti.

Tale normativa si è evoluta e portata dagli anni 80 sino ai giorni nostri. Dal 2012 la comunità europea ha introdotto una seconda parte delle normative che va a monitorare le emissioni di CO<sub>2</sub> per rispondere da un lato al problema dell'effetto serra, dall'altro per andare a rispondere al problema della riduzione dei consumi, (perché CO<sub>2</sub> = consumi).

La comunità europea ha posto dei limiti anche sulle emissioni di CO<sub>2</sub>.

La normativa sugli inquinanti (EURO 6) è una normativa passa-non passa, cioè la vettura è omologabile solo se rispetta la normativa.

La normativa sulla CO<sub>2</sub> invece non obbliga il costruttore a produrre vetture le cui emissioni di CO<sub>2</sub> siano sotto un limite; suggerisce un limite di 130 gCO<sub>2</sub>/Km, ma se la media di emissioni di CO<sub>2</sub>

sulle vetture vendute del costruttore non rispetta quel limite a fine anno il costruttore pagherà una multa di 95 €/gCO<sub>2</sub> oltre il limite per ogni veicolo venduto. Il costruttore dunque piuttosto che pagare la multa investirà la stessa cifra nello sviluppo tecnologico se vuole ottimizzare la sua immagine e il marketing.

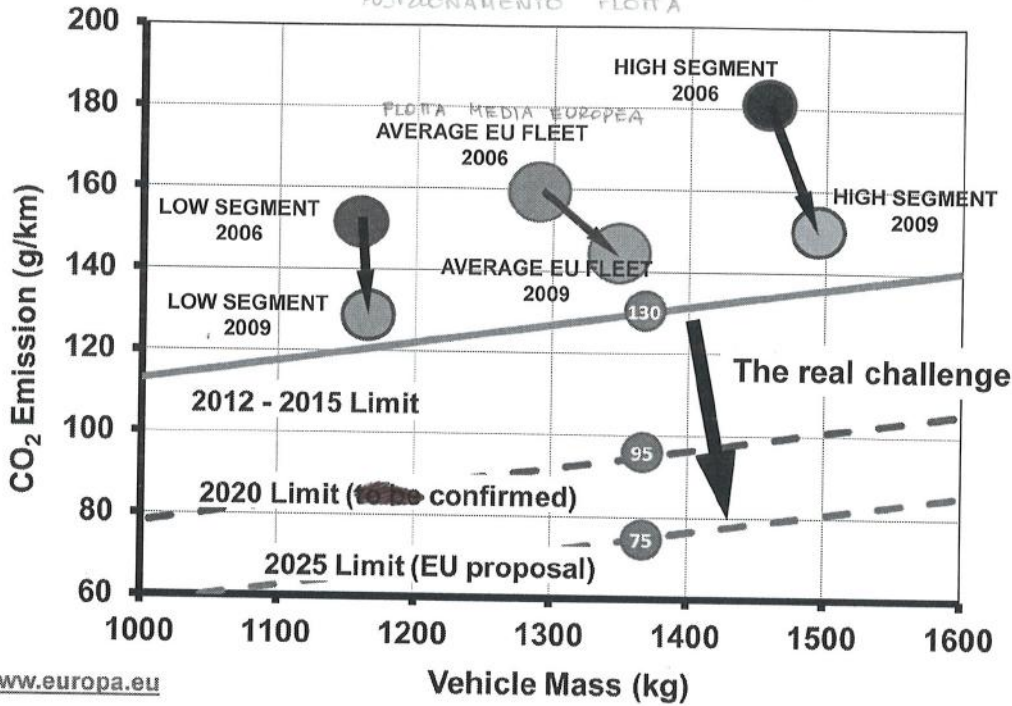
La normativa sulla CO<sub>2</sub> nel 2019 abbasserà il limite a 95 gCO<sub>2</sub>/Km e diventeranno 50 a partire dal 2024.



Inoltre il limite che si pone è funzione della taglia della vettura, perché una vettura che pesa di più consuma di più di quella che pesa meno; la comunità Europea ha dato il valore medio che poi viene modulato in funzione del peso della vettura.

## Fleet Positioning

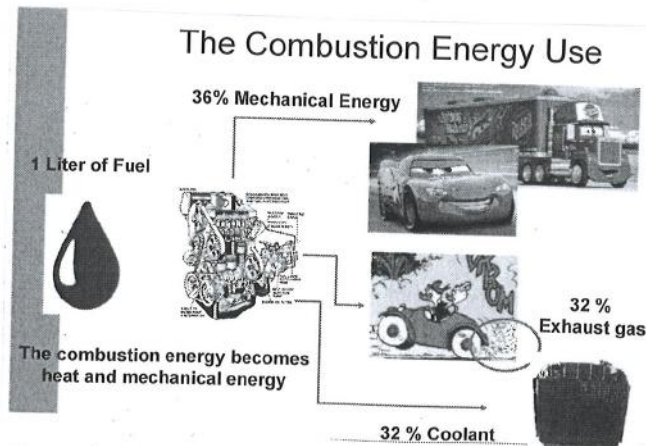
POSIZIONAMENTO FLORITA



[www.europa.eu](http://www.europa.eu)

Si vede che le curve limite sono delle rette. Si vede un progressivo abbassamento del limite nel corso degli anni. Abbiamo dunque spostato l'attenzione sulla produzione di inquinanti e sul consumo di combustibile. Si era visto come il consumo di combustibile si poteva ridurre migliorando l'efficienza del motore o facendo i vari tipi di switch.

Un propulsore attuale presenta dei rendimenti molto bassi.



Inoltre se ho 4 litri di combustibile, noto il suo potere calorifico, esso mi dà una certa energia, che viene convertita in potenza in base a un certo valore di efficienza (che mediamente è pari al 36%).

La restante parte dell'energia va nei gas di scappo, oppure negli scambi termici con l'ambiente. Quindi solo il 36% dell'energia chimica del combustibile viene convertita in energia meccanica.

In prima approssimazione un modo di migliorare il rendimento è di aumentare 15

questo 36 % di Mechanical Efficiency, quindi per migliorare l'efficienza del sistema faccio tutte gli interventi sul motore.

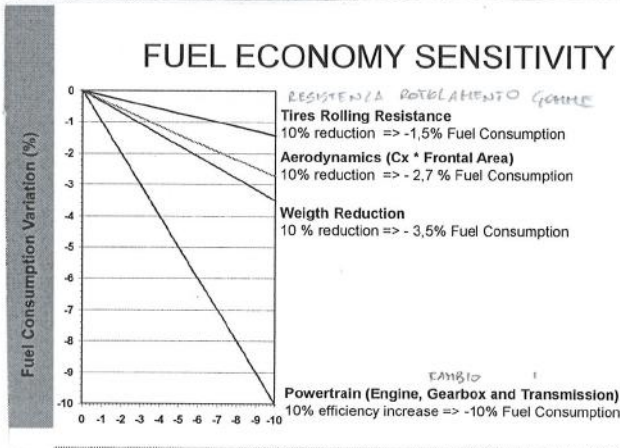
In realtà la potenza al veicolo lo richiede alle ruote e tale potenza poi si perde lungo la trasmissione richiedendo potenza al motore => sarebbe sbagliato migliorare la sola efficienza del motore.

Il quantitativo di energia meccanica prodotta deve essere tale, dopo spostare il veicolo, da vincere:

- INERZIA DEL VEICOLO
- RESISTENZA AERODINAMICA
- GRAVITÀ SE IN PENDENZA
- ATTI INTERNI DEL PROPULSORE
- RESISTENZA AL ROTOLAMENTO
- MOVIMENTAZIONE ACCESSORI AUSILIARI

I propulsori disperdono parte dell'energia meccanica prodotta dalla combustione.

Ogni miglioramento effettuato sul veicolo ha un impatto differente sulla possibile riduzione di combustibile.



Tutti gli interventi che posso effettuare sono elencati nella slide.

Supponendo di migliorare del 40% la efficienza del powertrain (sostituito su motore, cambio...) ottengo una riduzione del combustibile pari al 40%.

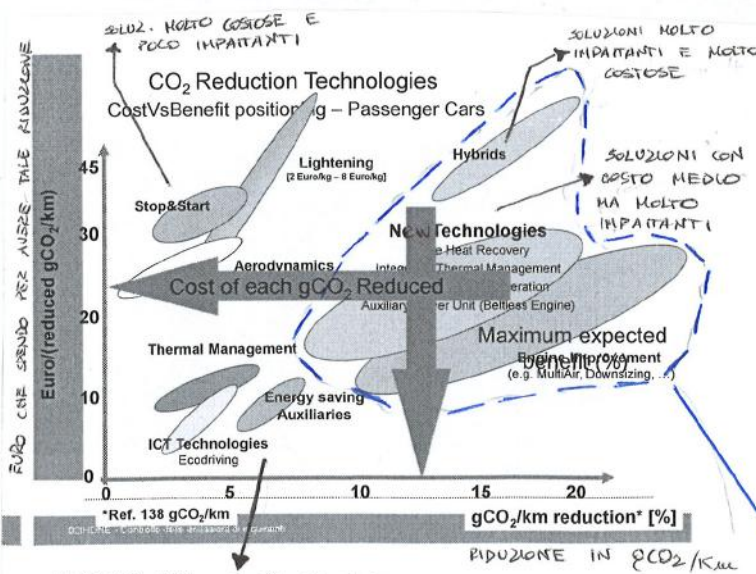
• È importante dunque lavorare sul powertrain in quanto ciò che guadagno me

lo ritrovo tale e quale come guadagno in termini di consumo di combustibile, quindi è il modo di lavorare più efficace rispetto agli altri 3, e  
petto ovviamente di poter ridurre tale <sup>efficienza</sup> aumento di  $\sqrt$  del 40% e non dell'1%.

• Per quanto riguarda la resistenza al rotolamento gli pneumatici sono classificati in varie classi di usura (A, B, C...) e <sup>bisogna</sup> controllare costantemente la pressione gomme, che se inferiore a quella consigliata causa aumenti nei consumi. Si parla di pneumatico intelligente (adattabile in termini di pressione di gonfiaggio) o di sistema di gonfiaggio intelligente a livello di bicicletta. Si consideri che il pneumatico freddo ha pressione dell'aria all'interno è inferiore rispetto a quella che si ha col veicolo a regime tecnico, in quanto il pneumatico si è scaldato, e l'aria si è scaldata ed è aumentata la pressione, quindi si vorrebbe un sistema di gonfiaggio sensibile al regime tecnico.



- Per l'AERODINAMICA si sono già raggiunti ottimi risultati negli ultimi anni riducendo notevolmente il  $C_x$  (foglio delle sessione frontole) che comporta coi fattori di comfort.
- La RIDUZIONE DEL PESO è prima diminuita e poi ha ripreso a risolle per l'introduzione dei crash tests (aspetto legato alla sicurezza) che comporta con la riduzione di peso. L'utilizzo di materiali compositi è un'opzione, in quanto essi sono più leggeri, ma hanno una resistenza strutturale paragonabile agli acciai. Inoltre anziché parlare di "sicurezza passiva" oggi si parla di "sicurezza attiva", cioè di far in modo di evitare un incidente tramite la guida automatica che quindi renderebbe inutile la presenza degli airbag con conseguente riduzione di peso. Il problema del peso è rilevante quanto quello del powertrain, ma è un problema di sistema che include anche problematiche a livello di implementazione di tecnologie ICT e contenuti digitali, quindi abbastanza complesso.
- Le TECNOLOGIE SUL MOTORE sono vantaggiose in quanto tutto quello che guadagno in termini di efficienza me lo ritrovo in termini di risparmio di carburante, però bisogna valutare quanto mi costa una tecnologia. Considero il seguente grafico:



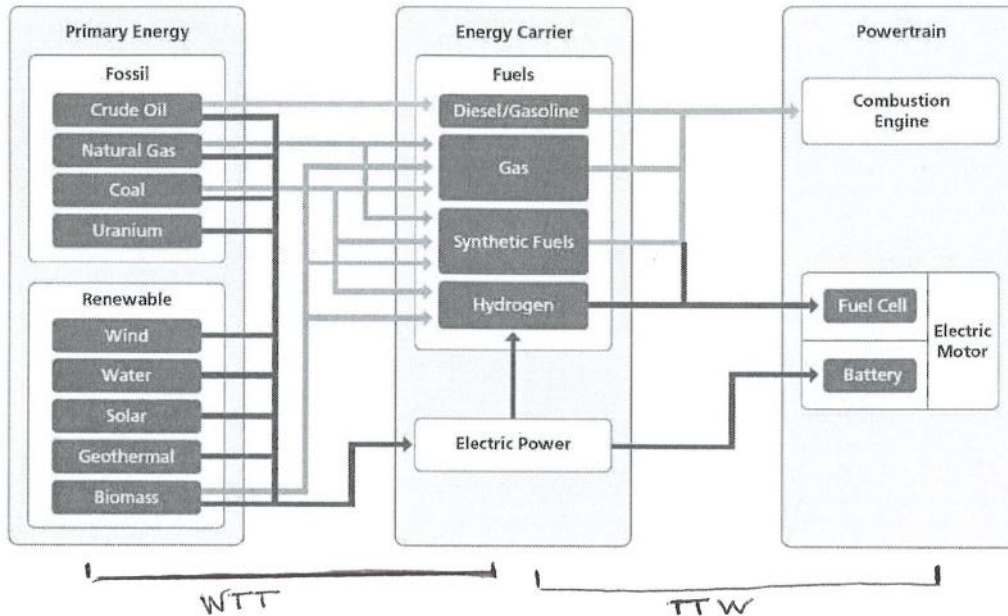
posso vedere tutte le soluzioni che posso avere a livello di powertrain. Le NEW TECHNOLOGIES come recupero della energia allo scatto, miglioramento della gestione tecnica del sistema, gestione efficiente dell'energia a bordo... si fanno molto perché a fronte di un grande potenziale in termini di riduzione di  $CO_2/km$  hanno un costo medio. Nel corso di un percorso di tali tecnologie più efficaci.

SOLUZIONI POCO COSTOSE MA POCO IMPATTANTI  
 ↳ Si lavora anche su queste due pur non avendo un enorme impatto, costano poco. (Ecodriving che consiglia lo stile di guida)

Come si vede nelle slide successive, se una volta si aveva il motore termico che funzionava a benzina e gasolio ricavati dal petrolio ed era l'unica possibilità, oggi si hanno molteplici possibilità. Pur partendo dal powertrain tradizionale, il combustibile oggi può essere gas naturale (derivante da combustibile fossile o da biomasse) o un combustibile sintetico.

## Energy pathways for fuels

PERCORSI



Si può pensare molto di produrre energia dal carbone e creare dei combustibili sintetici (esempio Germania sviluppo tecniche per produrre combustibile sintetico e partire dal carbone, producendo un gas che viene soffocato e trasformato in combustibile liquido)

Oggi dal carbone, con processi di questo tipo, detti FISHER TROPSCH, si può produrre anche idrogeno.

Un'ulteriore possibilità è usare tutte queste fonti energetiche per produrre energia elettrica che viene utilizzata per far muovere una batteria in un veicolo elettrico.

Quindi al giorno d'oggi lo scenario è talmente complicato che sarebbe sbagliato andare a considerare la CO<sub>2</sub> emessa nelle sole powertrain nel calcolo della CO<sub>2</sub> complessiva emessa dal veicolo, ma bisognerebbe tenere conto di tutta la catena di produzione.

Per cui si fa la seguente suddivisione:

- TANK TO WHEEL (TTW) = emissioni e consumi dal serbatoio alle ruote
- WELL TO TANK (WTT) = tutto quello che c'è per produrre da energia primaria



di combustibile e quindi di vettore energetico o dal pozzo al serbatoio.  
 Oggi l'auto utente per determinare i consumi basta guardare la sola posta TTW, mentre l'auto oibrida però bisogna guardare tutto e quindi si fa la somma  $TTW + WIT = WTW$  (WELL TO WHEEL) la quale permette un confronto tra diverse soluzioni, altrimenti sarebbe impossibile confrontare una soluzione basata sul motore elettrico con quella basata sul motore a benzina, non posso cioè guardare i consumi energetici e le emissioni di CO<sub>2</sub> che ci sono nella prima parte di trasformazione e nella parte di trasporto e sono diversi per soluzioni differenti.

Quindi oggi non possiamo fare un confronto posto da un'analisi convenzionale TTW, ma non può prescindere dal resto dovendo diventare poi una analisi WTW.

Oggi si può anche di LCA (LIFE CYCLE ASSESSMENT), si fa cioè una verifica dell'intero ciclo di vita che tiene anche conto delle emissioni di CO<sub>2</sub> legate alla costruzione e allo smaltimento del veicolo. Se tali emissioni risultano elevatissime l'analisi LCA tende a smentire la precedente analisi WTW.

Se sto confrontando un veicolo che è lo stesso ma gli cambio il solo combustibile, probabilmente resterà un'analisi WTW, mentre se sto confrontando un veicolo con 800 Kg <sup>di batterie</sup> V con un veicolo senza batterie può darsi che la costruzione e lo smaltimento delle batterie abbia un impatto sull'energia e sulla CO<sub>2</sub>.

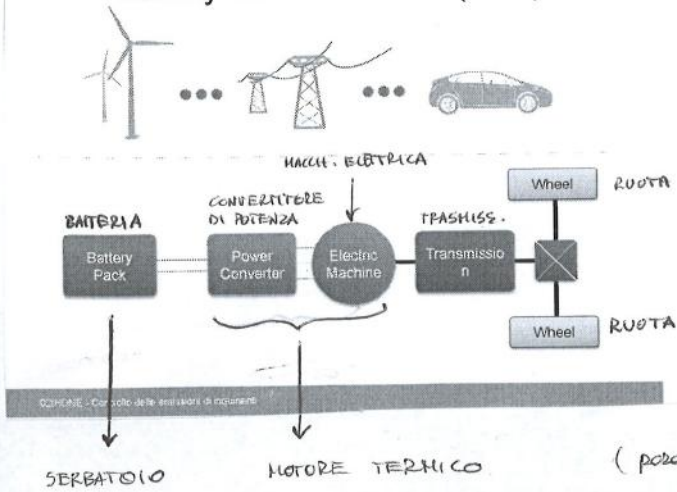
● DOMANDA:

Come mai il veicolo elettrico di cui si parla tanto non si usa?

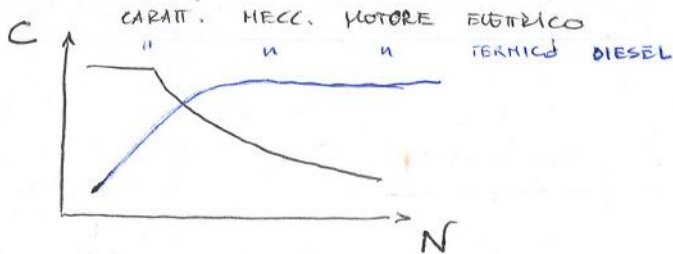
Un approccio semplicistico sembrerebbe proposto come soluzione vincente in quanto il veicolo elettrico se a batterie, l'energia elettrica la si fa da fonti rinnovabili, non emettono CO<sub>2</sub> e quindi sembrerebbe ottimo.

Un veicolo elettrico è fatto nel modo seguente:

# Battery electric vehicle (BEV)



Inoltre nel caso di un motore elettrico si necessita di un cambio o iniezione o a pochi supporti, perché le caratteristiche esterne di un motore elettrico è molto più favorevole alla trazione:



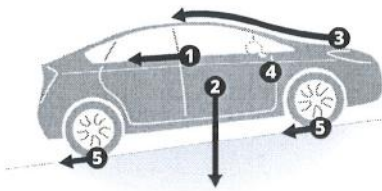
Inoltre il motore elettrico è anche molto più leggero di quello termico.





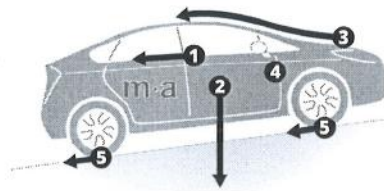
Inoltre si può fare il seguente discorso:  
 abbiamo visto che in un veicolo l'energia richiesta alle ruote dipende da una serie di fattori (1, 2, 3, 4, 5). Si fissa una missione, cioè il percorso di un certo veicolo a una data velocità. Se i 2 veicoli sono fatti dello stesso materiale, pesano uguali... ma col motore elettrico che col termico si chiede  
 dove alle ruote la stessa potenza.

Required traction power



- 1 Inertia
- 2 Gravity
- 3 Aerodynamic drag
- 4 Internal friction
- 5 Rolling resistance

Required traction power



- 1 Inertia
- 2 Gravity
- 3 Aerodynamic drag
- 4 Internal friction
- 5 Rolling resistance

$$P_{kin} = \underbrace{m \cdot a}_{F} \cdot v$$

m: vehicle mass  
 a: vehicle acceleration  
 v: vehicle velocity

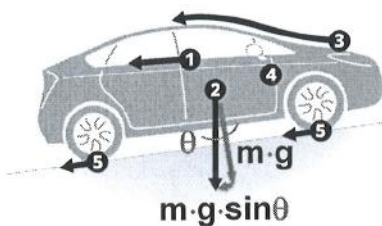
CONCINE - Controllo delle emissioni di inquinanti

CONCINE - Controllo delle emissioni di inquinanti

Una volta che ho un veicolo (quindi una certa massa, un certo coeff. aerodin., una certa resistenza al rotolamento), data una certa missione (quindi velocità, accelerazione, pendenza strada ecc...) l'energia richiesta dal veicolo è la stessa indipendentemente dal powertrain utilizzato.

Considerando un ciclo omologativo (utilizzato per stabilire quanto il veicolo richiede...) un veicolo di classe B consuma circa 540 Wh/Km indipendentemente dal powertrain ma è fatto che siano valide le hp misurate.

Required traction power

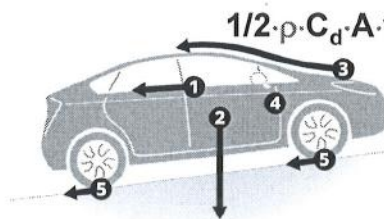


- 1 Inertia
- 2 Gravity
- 3 Aerodynamic drag
- 4 Internal friction
- 5 Rolling resistance

$$P_{grade} = m \cdot g \cdot \sin \theta \cdot v$$

m: vehicle mass  
 g: gravity acceleration  
 v: vehicle velocity  
 θ: grade of the road (?)

Required traction power



- 1 Inertia
- 2 Gravity
- 3 Aerodynamic drag
- 4 Internal friction
- 5 Rolling resistance

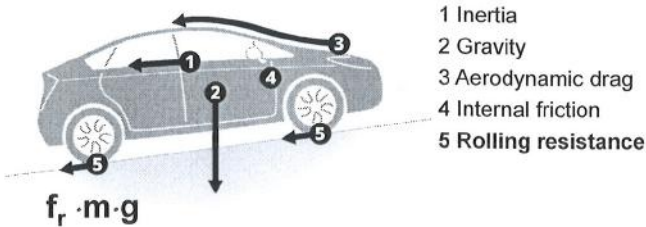
$$P_{air-drag} = 1/2 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^3$$

A: vehicle frontal area (?)  
 C<sub>d</sub>: vehicle drag coeff.  
 ρ: air density  
 v: vehicle velocity

CONCINE - Controllo delle emissioni di inquinanti

CONCINE - Controllo delle emissioni di inquinanti

### Required traction power



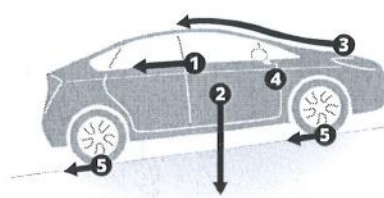
- 1 Inertia
- 2 Gravity
- 3 Aerodynamic drag
- 4 Internal friction
- 5 Rolling resistance

$$f_r \cdot m \cdot g$$

$$P_{roll} = f_r \cdot m \cdot g \cdot v$$

- m: vehicle mass
- g: gravity acceleration
- $f_r$ : tyre rolling coeff.
- v: vehicle velocity

### Required traction power



- 1 Inertia
- 2 Gravity
- 3 Aerodynamic drag
- 4 Internal friction
- 5 Rolling resistance

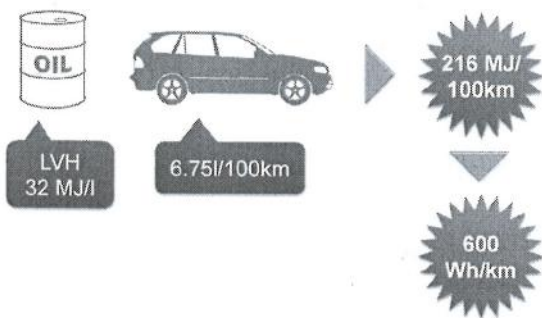
Given the same vehicle ( $m, C_d, f_r$ ) and the same mission ( $v, a, t$ ), we can consider a given traction power time history, i.e. a fixed amount of energy requested ( $\approx 140 \text{ Wh/km}$  on NEDC for an urban vehicle)

CONCNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

CONCNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

Per la caratteristica del motore termico vista a pag. 13 lavorando molto al di sotto della curva caratteristica per il particolare tipo di missione, si ha che il motore termico ha un'efficienza molto bassa (dell'ordine del 16-23%), quindi a fronte di 140 Wh/km richiesti alle ruote, questa bassa efficienza fa sì che l'energia necessaria che bisogna mettere a disposizione per avere quei 140 Wh/km è più alta e pari a 600-900 Wh/km. Nel caso di un veicolo elettrico a batterie l'efficienza del powertrain è molto maggiore, poiché il motore elettrico ha un'efficienza molto + elevata, la trasmissione è assente e allora si raggiungono efficienze del 60-65%;

### Primary Energy for NEDC



### Primary Energy for NEDC

RETE DISTR. EN. ELETTR.

Type	Power plant efficiency	Grid efficiency	Vehicle efficiency	Total primary energy [Wh/km]
BEV (Range 150 km)	45%	93%	60-65%	510-570
BEV (Range 150 km)	solo rinnovabile RE only	93%	60-65%	230-260
Conventional vehicle	WTW Powertrain efficiency		16-23%	600-900

CONCNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

CONCNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

mentre la rete di distrib. dell'en. elettrica ha un'efficienza  $\approx 93\%$  e mentre l'energia elettrica va prodotta, allora si considera l'efficienza media di un power plant europeo (45%). Mettendo insieme tali valori si ottiene circa 600 Wh/km di energia necessaria, che è uguale o inferiore a quella richiesta dal motore termico.



Nel caso limite di sole rinnovabili, costi 140 kWh/Km che richiederebbero solo 220 Wh/Km.

Per cui tale ragionamento, risulterebbe l'acqua al mulino del motore elettrico.

Considerando poi le emissioni di CO<sub>2</sub> nel caso di vettura con motore convenzionale mosso da combustibile fossile sulle missioni di rifornimento tipica dei cicli olografici, si hanno i seguenti dati finali: 200 g CO<sub>2</sub>/Km.

### CO<sub>2</sub> in g/km NEDC WTW

Conventional mid-size car		
WTT	TTW	Total (WTW) CO <sub>2</sub> emission
25-35	90-170	115-205
Battery electric vehicle		
Electricity mix	Total (WTW) CO <sub>2</sub> emission	
Italian mix 2010: 11% nuclear, 23% renewable, 66% fossils	72	
EU-27 mix 2010: 27% nuclear, 23% renewable, 50% fossils	58	
French mix 2010: 74% nuclear, 21% renewable, 5% fossils	22	

g CO<sub>2</sub>/Km

sono dal mix energetico di provenienza (mix italiano/europeo/francese).

Si notano emissioni di CO<sub>2</sub> per il motore elettrico pari a 1/3 di quelle del motore termico.

Quindi il motore elettrico consuma meno in termini di energia primaria ed emette meno in termini di CO<sub>2</sub>.

Abbiamo però fatto un'ipotesi di stesso peso, verificavamo se è corretta:

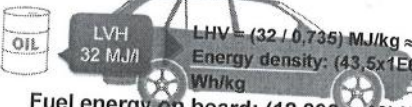
### Mass and range comparison

Reference vehicle: 5 seats; chassis and body: 1000 kg  
Powertrain: n.p. vehicle with ICE (gasoline or diesel): 140-170 kg  
Fuel (gasoline or diesel):

Fuel density = 0.735 kg/l (gasoline)  
55 l gasoline:  $55 \times 0.735$  kg = 40 kg (≈ 930 km range)

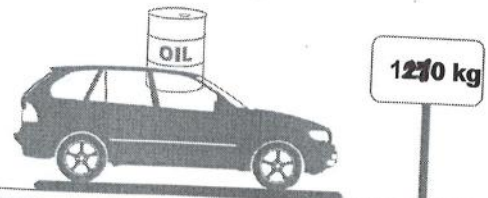
1170 kg  
LHV = 32 MJ/l  
LHV =  $(32 / 0.735)$  MJ/kg ≈ 43,5 MJ/kg  
Energy density:  $(43,5 \times 1E6 / 3600)$  Wh/kg ≈ 12,090

Fuel energy on board:  $(12,090 \times 40)$  Wh = 483,600 Wh



### Mass and range comparison

Reference vehicle: 5 seats; chassis and body: 1000 kg  
Powertrain: n.p. vehicle with ICE (gasoline or diesel): 140-170 kg  
Fuel (gasoline or diesel): ≈ 40 kg



N.B.: I 55 l di combustibile danno a bordo un'energia pari a 483.600 Wh.

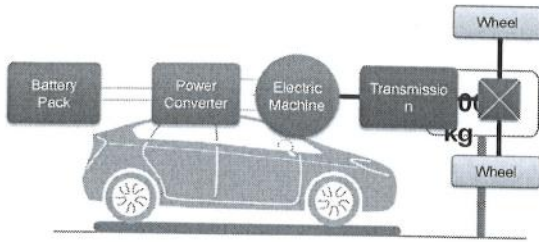
\* conversione da MJ/kg a Wh/Kg

Considero lo stesso veicolo elettrico :

### Mass and range comparison

Reference vehicle: 5 seats; chassis and body: 1000 kg

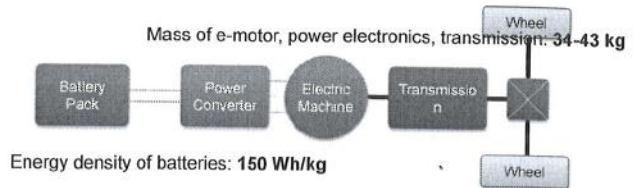
Powertrain: BEV



### Mass and range comparison

Reference vehicle: 5 seats; chassis and body: 1000 kg

Powertrain: BEV



Mass of batteries required to have the same on-board energy of a standad fuel (483,600 Wh)  $\approx$  3,200 kg!!!

CEPRIDE - Controllo delle emissioni di inquinanti

CEPRIDE - Controllo delle emissioni di inquinanti

Inizialmente tolgo le batterie che è l'equivalente del combustibile, quindi la massa di power converter ed electric machine si è ridotta a 35 Kg contro i 140 Kg che c'erano prima.

Ora però devo mettere le batterie che è l'equivalente del mio combustibile.

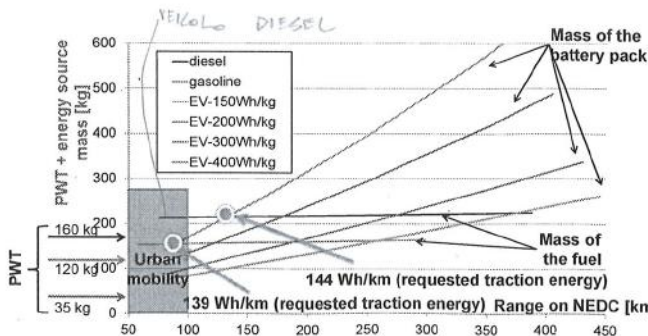
La densità energetica delle batterie è 150 Wh/Kg, comprese batterie e sistema di management batteria (che ne stabilizza la temperatura).

Facendo  $\frac{483,600}{150} = 3200$  Kg, cioè per avere la stessa autonomia

mi servirebbero oltre 3000 Kg di batterie e quindi non sono a portata di peso.

L'autonomia non è pari, quindi dobbiamo chiederci i dati visti in precedenza per che autonomia hanno senso?

### Mass and range comparison



CEPRIDE - Controllo delle emissioni di inquinanti

Si possono fare delle curve di questo tipo (massa del powertrain inclusa la massa di combustibile in funzione del chilometraggio). Si vede che per le curve diesel e benzina aumentando il chilometraggio il peso del veicolo cambia poco perché il combustibile pesa poco rispetto al veicolo.

Nel caso delle batterie per ogni

Km che aggiungo devo aggiungere Kg e Kg di batterie.

Le autonomie che dobbiamo pensare per un veicolo elettrico affinché valga 2h



tutto ciò che abbiamo detto, sono delle autonomie di 150 Km se le confronto con un diesel e meno di 100 Km se le confronto con un benzina. Inoltre tali valori non sono reali, in quanto supponendo di accendere il condizionatore su una vettura con motore termico d'inverno, per scaldare l'abitacolo il motore termico deve far girare una ventola perché poi i gas di scappo automaticamente scaldano l'aria dell'abitacolo; prendendo una vettura elettrica per scaldare l'abitacolo bisogna prendere l'energia della batteria e quindi a 80 Km di autonomia si riducono a 40 Km. Inoltre le prestazioni di una batteria sono fortemente dipendenti dalla temperatura (decadono col freddo) molto di più di un motore termico.

Quindi per tutte tali ragioni il veicolo elettrico è utilizzabile solo per la mobilità urbana. L'altro problema è che non esistono stazioni di ricarica.

Esse sarebbero difficilmente costruibili, inoltre una stazione standard dura 3 ore, quindi troppo tempo. Anche i sistemi di ricarica veloce tendono a usurare le batterie e inoltre bisogna tener conto che la potenza è diversa dall'energia, quindi se voglio mettere una determinata energia, ma anziché costruirne in 2 ore si voglio mettere 10 min la potenza che mi serve è 12 volte maggiore e quindi caricando milioni di veicoli al contempo ho un impatto devastante in termini di sbilanciamento della rete.

Le criticità di una vettura elettrica risultano essere:

### Other critical issues

- Impact of battery cost on TCO of the vehicle
- Thermal comfort (and related impact on driving range)
- Mechanical protection of the battery (safety)
- Risk of battery explosion (safety)
- Charging time (customer acceptance)

## Conclusions

- Large part of the growth in global oil demand is in the transportation sector
- Assuming no major breakthrough technological advance is made, liquid fuels will continue to provide much of the total energy consumed
- PLDVs are the leading component of transport oil demand and this is projected to remain the case in 2035, even though road freight and aviation grow at faster rates
- No "Silver Bullet" exists today to replace oil as a primary energy source in road transport.
- A number of co-existing solutions (gaseous fuels, biofuels, electricity,...) will be necessary, creating a "portfolio" of energy sources for transportation.
- Energy economy and emissions are and will continue to be primary concerns in the future of transportation systems;
- Sustainable mobility and renewable energy sources are the only long-term solution;
- Hybrid vehicles represent a medium- and long-term solution.



## INQUINANTI

DEFINIZIONE DI INQUINANTE: sostanza, che viene prodotta dai motori a combustione interna, che può essere solida, liquida o gassosa e ha un impatto negativo sulla salute umana.

Ad esempio: il monossido di carbonio (CO) è un veleno che si fissa con l'emoglobina del sangue e impedisce lo scambio di ossigeno.

Altre sostanze come gli idrocarburi incombusti (HC) emessi allo scacco del motore sono delle sostanze caratterizzate da doppi legami più o meno saturati e che possono avere potere cancerogeno.

Il particolato PM prodotto in particolare dai motori Diesel provoca problemi polmonari.

Gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e gli idrocarburi incombusti, se reagiscono insieme danno luogo a dei composti velenosi che formano lo "SMOG FOTOCIMICO" causando allergie, irritazioni o problemi cancerogeni.

Si suole distinguere gli inquinanti in:

- INQUINANTI PRIMARI: vengono emessi direttamente dal motore allo scacco. Essi possono essere generati da:
  - processi di combustione incompleta o non-ideale: CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM
  - derivati da additivi o altre specie chimiche presenti nel combustibile: SO<sub>x</sub> (ossidi di zolfo), composti metallici (come Pb)
  - aerosol che deriva dall'olio lubrificante (che contiene idrocarburi che possono formare tale aerosol) e non derivano propriamente dal processo di combustione

INQUINANTI PRIMARI DI TIPO GASSOSO: CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, aerosol from lubricant oil

" " " " SOLIDO: PARTICOLATO PM (che comprende anche composti di tipo metallico). È chimicamente e morfologicamente molto complesso e viene emesso in particolare dai motori Diesel e a benzina e miscelazione diesel. Esso contiene delle particelle solide che però sono disperse in un aerosol piuttosto complesso in parte costituito da specie organiche che sono allo stato gassoso e possono depositarsi sulle particelle solide.

La maggior parte degli inquinanti primari sono generati da fenomeni di combustione incompleta o non ideale. Esempio tipo è il monossido di carbonio CO è soggetto al processo di dissociazione: nella combustione ideale tutto il carbonio dovrebbe ossidarsi a CO<sub>2</sub>, ma in realtà pensando a una combustione reale ad alte T la CO<sub>2</sub>

dissocia dando  $CO + O$  e  $CO$  lo ritroviamo allo scorcio, perché magari quello che si è dissociato durante il processo di combustione, nel momento in cui la temperatura scende velocemente, non riesce più ad ossidarsi perché la velocità di reazione è molto lenta e lo si ritrova allo scorcio.

In un motore ad accensione comandata in genere si lavora sullo stechiometrico per una serie di motivi legati al sistema di after-treatment (catalizzatore). Se lavorassi con una miscela leggermente ricca si formerebbe molto  $CO$  allo scorcio rispetto alla  $CO_2$  perché la combustione (in cui idealmente tutto il combustibile ossida a  $CO_2$  e tutto l'idrogeno ossida ad acqua) è costituita da sezioni intermedie che a un certo stadio portano alla formazione di  $CO$  che con una certa velocità diventa  $CO_2$ , ma nel buco siamo in presenza di  $O_2$  per cui tutto il  $CO$  non riesce a legarsi con  $O$  e ne resta una parte allo scorcio.

La formazione di particolato PM è dovuta al fatto che si ha del combustibile che non trova ossigeno con cui legarsi, ma alle alte temperature cretizza e dà luogo a delle particelle carboniose.

Anche l'ossido di azoto  $NO_x$  è legato a incompletezza della combustione, cioè l'ossigeno alle alte  $T$  anziché reagire col combustibile va a reagire con l'azoto.

Quindi tutti gli inquinanti primari sono generati da incompletezza o non idealità del processo di combustione.

Poi si hanno altre sostanze come l'ossido di Zolfo  $SO_x$ , infatti lo zolfo è una impurità presente all'interno del combustibile (specie nei gasoli) in poche ppm, che comunque possono dare ossidi di zolfo.

In passato potevano anche esserci dei composti metallici tipo sali di piombo quando nella benzina si utilizzava come antidetonante il piombo tetra etile.

Si possono inoltre avere composti metallici allo scorcio derivanti dall'usura del motore. Tutti tali inquinanti vengono immessi in ambiente ed oltre ad avere effetti nocivi per le solite minime, deteriorano la qualità dell'aria.

La reazione tra loro degli inquinanti primari porta alla formazione di:

- **INQUINANTI SECONDARI**: generati dalla degradazione in atmosfera degli inquinanti primari.

Esempio tipico di inquinante secondario è lo "SMOG FOTOCHIMICO": gli ossidi di azoto  $NO_x$  e gli idrocarburi incombusti  $HC$ , sotto l'azione dei raggi UV possono reagire tra loro dando luogo a dei composti organici volatili molto tossici, che sono anche essi degli inquinanti con potere cancerogenico.

Un altro esempio di inquinante secondario è l'ozono che si può formare a livello del suolo, lo stato di ozono presente nello strato alto della stratosfera protegge 20



dai raggi UV, ma a livello del suolo non va bene in quanto l'ozono è un irritante delle mucose ed è molto selettivo. L'ossido di azoto  $NO_x$  deturpa la produzione di ozono a livello del suolo, fungendo un po' da catalizzatore e reagendo con l'ossigeno presente nell'aria da luogo alla formazione di ozono.

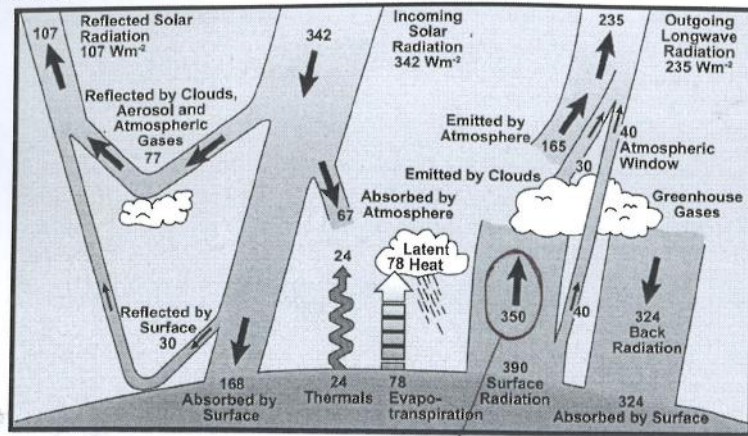
Altro esempio esempio sono le PIOGGIE ACIDE: tra gli inquinanti emessi dal motore si hanno gli ossidi di zolfo e la stessa anidride carbonica <sup>che</sup> si ossida e reagisce con il vapor d'acqua presente nell'atmosfera, formando degli acidi di zolfo e di carbonio rendendo il pH dell'atmosfera acido e in caso di precipitazioni vengono sottratti all'atmosfera danneggiando l'ecosistema producendo deforestazione, defogliazione ecc... Le piogge, poiché in atmosfera è presente  $CO_2$ , tendono ad essere naturalmente acide (hanno un  $pH \approx 5,4$ ), mentre quando si parla di "piogge acide" queste hanno un pH inferiore a 5,4 e sono provocate da emissioni da parte dei sistemi propulsivi di  $CO_2$  in eccesso o  $SO_x$  in eccesso.

Un effetto secondario dell'introduzione di inquinanti in atmosfera è la loro interazione con lo strato di ozono presente in atmosfera (che non va confuso con l'ozono presente a livello del suolo). Infatti le molecole di ossigeno presenti in atmosfera per effetto dei raggi UV si spezzano in atomi di ossigeno e si legano con altre molecole di ossigeno dando la molecola dell'ozono  $O_3$ . La molecola d'ozono muovendosi in atmosfera intercetta a sua volta dei raggi UV ed impedisce che la loro componente dannosa oltrepassi lo strato della stratosfera raggiungendo la terra. Purtroppo gli inquinanti prodotti da i veicoli <sup>ed altri sistemi</sup> possono entrare ed alterare tale equilibrio. Ad esempio i CLOROFLUOROCARBURI (CFC) utilizzati in passato negli impianti refrigeranti (che hanno una vita di migliaia di anni) e anche i  $NO_x$  che raggiungono la stratosfera, vanno a inserirsi nel ciclo di formazione dell'ozono e vanno a sottrarre quegli atomi di ossigeno che normalmente dovrebbero legarsi alle molecole di ossigeno per formare ozono, generando in tal modo l'impoverimento dello strato di ozono in atmosfera.

Dal punto di vista legislativo la normativa che regola le emissioni di inquinanti da veicoli è diversa da quella che regola le emissioni di gas serra (tipo  $CO_2$ ) o GREENHOUSE GAS (GHG), in quanto si tratta di 2 diversi fenomeni. L'inquinante ha un effetto negativo diretto sulla salute umana, mentre il gas serra di per se non è un inquinante. L'esempio tipico di gas serra è la  $CO_2$  che è presente nell'aria e non è di per se un inquinante. Il problema della  $CO_2$  e dei gas serra è riassunto nel seguente grafico:

### GHG Emissions

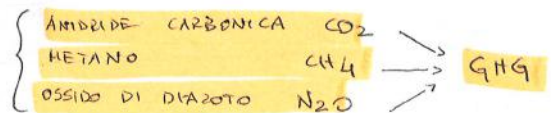
Some compounds present in the atmosphere are contributors to Greenhouse gas (GHG) effect.



02IHDNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

Una certa parte di radiazione solare che arriva sulle terre viene riflessa all'indietro perché si trovano le nuvole, parte viene riflessa dalle superficie terrestri (presenza di neve ghiaccio o superfici bianche riflettenti) e parte viene assorbita (da superfici nere). L'energia che viene assorbita parte la terra ad assumere una certa temperatura (terra si comporta quindi come un corpo nero) e quindi emette e

irradia una certa energia secondo lunghezze d'onda differenti (lunghezze d'onda ed ampio spettro tipo quelle del corpo nero) rispetto alle lunghezze d'onda della radiazione solare. In particolare mentre la radiazione solare ha una lunghezza d'onda nel visibile o ultravioletto, la radiazione emessa dalla terra ha una sostanziale componente sulla parte infrarossa, parte infrarossa che può essere riflessa indietro dai cosiddetti "GAS SERRA":



Quindi nel bilancio energetico complessivo la terra riceve una certa radiazione, ne emette un'altra e parte di questa radiazione emessa viene a sua volta assorbita. Quando tutto il sistema è in equilibrio la Terra si porta a una certa temperatura, e nel corso degli anni si è sviluppata la vita a una certa temperatura secondo tale equilibrio termodinamico (tenendo conto di una sorta di "effetto serra naturale" dovuto ad esempio all'emissione di gas serra come CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> da parte dei vulcani). Dalla rivoluzione industriale in poi si è iniziato a immettere in atmosfera i GHG (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> sono prodotti da tutte le combustioni ed N<sub>2</sub>O da tutte i composti a base di azoto come rifiuti, fertilizzanti ecc...) alterando lo equilibrio termodinamico terrestre aumentando la radiazione riflessa andando a riscaldare il pianeta, che raggiungerà nuovi equilibri termodinamici a temperature <sup>sempre</sup> più elevate generando un problema di RISCALDAMENTO GLOBALE.

Tra le molecole che possono avere un effetto serra o BACK RADIATION c'è anche l'acqua (H<sub>2</sub>O), la quale non si annovera tra i gas che danno effetto serra, in quanto si annoverano tra essi i soli gas prodotti da attività umane. È vero che anche la combustione produce acqua, ma è anche vero che gli oceani evaporando ne producono molta di più => il contributo di acqua rilasciata in atmosfera dalle emissioni è marginale, per cui l'acqua non è considerato un gas serra.



l'imquinamento che per effetto delle emissioni di gas serra (principalmente  $CO_2, CH_4, N_2O$ ) la temperatura del pianeta aumenta. Se  $T \uparrow \Rightarrow$  evaporeranno di più acqua gli oceani, quindi si suderà ed aumenterà anche il quantitativo di acqua. Quindi si ha un EFFETTO DIRETTO legato all'emissione di gas serra (dovuto all'uomo) ed un EFFETTO INDIRETTO legato ad altri fenomeni (evaporazione oceani, scioglimento ghiacciai con conseguente riduzione della quantità di radiazione riflessa e aumento la quantità assorbita  $\Rightarrow$  di nuovo si ha un effetto indiretto di riscaldamento). Inoltre la produzione di PM (di adese scuro) tendendo a scoprire delle superfici bianche ne altera l'albedo (proprietà di riflettere la luce solare) e causando un maggiore assorbimento.

Chi si occupa di GLOBAL WARMING è andato a studiare per le principali tipologie di gas serra, quello che è il cosiddetto "RADIATIVE FORCING" o "CAPACITÀ RADIATIVA" o "FORZANTE DI IRRAGGIAMENTO", che è una strumento che serve a misurare l'effetto che i GHG hanno nell'alterare la temperatura planetaria; è una misura assoluta che fornisce i  $W/m^2$  di irraggiamento determinati dall'aggiunta di un certo quantitativo di  $CO_2, CH_4$  e  $N_2O$  (se io emetto 1g di  $CO_2$  questo mi dà una forzante radiativa di tot  $W/m^2$  sulla terra). Risultando tale FORZANTE RADIATIVA di basso utilizzo pratico è stato poi determinato il GWP o GLOBAL WARMING POTENTIAL definito come rapporto tra 2 integrali:

$$GWP = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_{CO_2}(t) dt}$$

INTEGRALE DELLA FORZANTE RADIATIVA INTEGRATA RISPETTO AL TEMPO DELLA SPECIE CHIMICA CONSIDERATA TRA 0 E TH (tempo di vita della specie chimica in questione)  
 STESSA GRANDEZZA CALCOLATA PER UN GAS SERRA DI RIFERIMENTO (si utilizza la  $CO_2$ )

Quindi questo GWP vale 1 per la  $CO_2$ , mentre per tutti gli altri gas serra si avrà un valore  $\neq$  da 1 in base a quanto nominato dalla IPCC (INTERNATIONAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE) in valori tabellati:

Gas Serra	GWP
$CO_2$	1
$CH_4$	21
$N_2O$	310

Come utilizzo tali valori? Se io ho dei gas di scarico da un motore e so che questi sono 130 g di  $CO_2$  al Km, 1 g  $CH_4$  al Km e 0,5 g  $N_2O$ /Km, come ne valuto l'impatto sul riscaldamento globale? Valuto il:

CDE o CARBON DIOXIDE EQUIVALENT:

$$CDE = \sum (GWP_j M_j)$$

SOMMATORIA DELLE MASSE DELLO SPECIFICO GAS SERRA ALLO SCARICO MOLTIPLICATO PER IL PESO CHE È IL GWP

Quindi posso confrontare ad es. i 130 g di CO<sub>2</sub>/km con 1 g di CH<sub>4</sub>/km.  
 perché i 130 g di CO<sub>2</sub>/km essendo  $QWP_{CO_2} = 1$  valgono cioè 130, il  
 grammo di metano vale:  $1 \cdot \frac{21}{QWP_{CH_4}} = 21 \quad \Rightarrow$   
 $CDE = 130 + 21 = 151$

Quindi ad esempio i miei gas di scarico emettono 151 g/km di CDE.

Quindi se devo andare a valutare le emissioni di gas serra in un sistema di combustione li devo esprimere in termini di CDE o CARBON DIOXIDE EQUIVALENT.

Se voglio andare a definire degli indicatori di impatto ambientale di un motore, devo avere le mie emissioni di inquinanti (CO, HC, NOx e PM) prese separatamente se si vuole limitare l'effetto specifico di ognuno, e poi dall'altra parte posso avere le emissioni di gas serra valutate tramite il CDE.

### PROCESSO DI FORMAZIONE DEGLI INQUINANTI

#### - MOTORI AD ACCENSIONE COMANDATA (S.I. ENGINES)

##### • DESCRIZIONE DELLA COMBUSTIONE NEI MOTORI AD ACCENSIONE COMANDATA

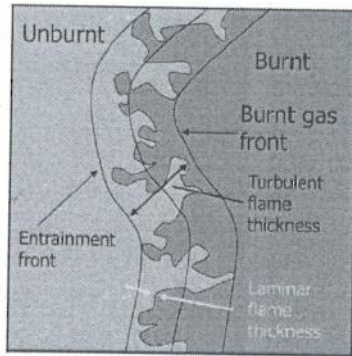
Diciamo MOTORE AD ACCENSIONE COMANDATA un motore in cui il processo di combustione è favorito da un'azione esterna (~~scossa~~ di una scintilla tramite una candela) che comanda l'accensione della miscela. Questo fa sì che il combustibile utilizzato nei motori ad accensione comandata deve avere una certa resistenza all'autoaccensione. Infatti i combustibili utilizzati negli <sup>SCINTILLA</sup> SPARK ENGINES sono caratterizzati da idrocarburi con CATENE RELATIVAMENTE CORTE E COMPATTE come benzina, Gas Motore (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), GPL (Liquefied Petroleum Gas). Tutti questi combustibili hanno una elevata resistenza all'autoaccensione, resistenza che si misura dal numero di ottano (misura il potere anti-detonante del combustibile), quindi sono combustibili caratterizzati da un elevato numero di ottano. A causa di tale elevato numero di ottano non si avrà autoaccensione spontanea del combustibile, ma bisogna fornire una energia esterna per attivare le varie reazioni di ossidazione delle varie specie chimiche attraverso la scossa di una scintilla che avviene tra gli elettrodi di una candela. L'energia messa in gioco attraverso questa scossa è relativamente piccola ( $\approx 1 \text{ mJ}$  anche se nei motori e metallo posso avere energia più alte) mentre l'energia rilasciata dal processo di combustione è di 1.000.000 (6 ordini di grandezza) più elevata ( $\approx 1 \text{ kJ}$ ). Tuttavia l'energia fornita attraverso la candela è fondamentale per avviare il processo di combustione in quanto mi consente di vincere l'energia di attivazione del processo. Il processo di accensione fa sì che si avvia il processo di combustione e che questo si propaghi attraverso tutta la miscela attraverso la creazione di



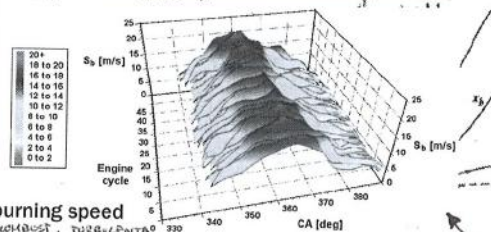
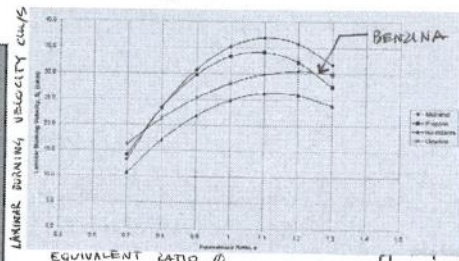
un fronte di fiamma che si propaga oltre verso la camera di combustione. Il fronte di fiamma è quella zona che separa la miscela fresca dai gas che hanno già preso parte al processo di combustione.

La velocità di propagazione del fronte di fiamma dipende da diversi fattori, ma il fattore principale è il campo di moto che c'è in camera di combustione. Se si ha un sistema privo di turbolenza, in cui il moto è laminare, le velo-

**Combustion in SI Engines**



Courtesy of Mahle Powertrain Ltd. and University of Leeds



Turbulent burning speed

02IHDNE - Controllo delle emissioni di inquinanti

cià del fronte di fiamma sarà quella riportata nel grafico

e si nota che sono dell'ordine delle decine dei cm/s.

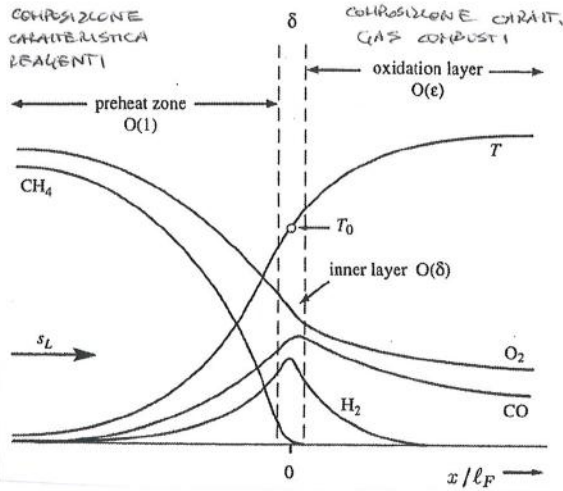
In un motore però il flusso non è quasi mai laminare, anzi molto spesso turbolento, allora in presenza di turbolenza la velocità del fronte di fiamma aumenta considerevolmente. Come si nota dal grafico si passa

nel caso turbolento alle decine di m/s => si sale di 2 ordini di grandezza per effetto della turbolenza. Ciò equivale a dire che affinché si abbia una cassetta evoluzione del processo di combustione è fondamentale che il campo di moto in camera sia turbolento, in quanto con velocità  $\approx$  m/s il processo di combustione dura normalmente una 60ma di gradi di angolo di manovella e se la velocità fosse quella laminare (ad esempio 50 volte inferiore) facendo 6000 v/min (3000° di angolo di manovella) e tali motori o dovrebbero girare pochissimo non fornendo potenza oppure la combustione non sarebbe realizzabile. Inoltre si ha che la turbolenza aumenta in modo proporzionale con la velocità di rotazione del motore in maniera circa lineare, e ciò è un aspetto positivo poiché all'aumentare della velocità angolare diminuiscono i tempi a disposizione per il processo di combustione in maniera anch'essa lineare => questo giustifica che la durata della combustione espressa in angoli di manovella è pressoché indipendente dalla velocità angolare del motore => questo fa sì che tali motori possano girare a velocità anche molto elevate che consentano di realizzare potenze elevate (molti cicli nell'unità di tempo).

Il motivo per cui si ha tale effetto della turbolenza (come si vede nel grafico sopra) è che la TURBOLENZA va a assurgere il fronte di fiamma, che si produce in un aumento della superficie di interfaccia tra gas combusti e carica fresca, garantendo una messa in contatto molto più elevata proprio per effetto del

conseguimento. La velocità instabile non è la misura delle velocità locali del fronte di fiamma, ma è una misura di quanto i gas sono surriscaldati e sottoposti.

**Combustion in SI Engines**



Come si vede nel grafico accanto nelle camere di combustione abbiamo i gas combusti da una parte ( $CO$  e  $O_2$  a dx) e la carica fresca dall'altra ( $CH_4$  e  $O_2$  a sx) separati da un fronte di fiamma più o meno costante. Si vede che il fronte di fiamma è fatto in questo modo:

a sx ho i gas freschi che devono ancora prendere parte al processo di combustione, mentre a dx ho i gas combusti.

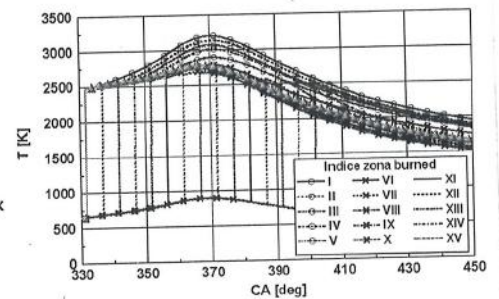
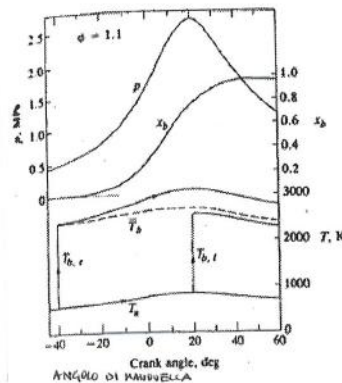
La mia carica fresca sarà dunque composta

dal combustibile  $CH_4$  e  $O_2$ , mentre a dx non avrò più combustibile (infatti si vede che la composizione del combustibile va a zero) e avrò invece dell' $H_2O$  (non riportata sul grafico), del  $CO$  (dovuto a combustione incompleta) ed  $O_2$  (perché magari si aveva eccesso di ossigeno rispetto al combustibile da ossidare).

Si vede molto come varia la  $T$  del fronte di fiamma (passando da bassi valori per i reagenti e valori elevati per i gas combusti). Come si vede nel grafico al lato si hanno valori tra i 600 e i 800 K

per i reagenti che sono stati compressi dallo stantuffo e si sono avuti scambi termici con le pareti, mentre per i gas combusti si hanno valori più elevati, perché ogni posto della buccia (adiabaticamente) aumentano la sua  $T$  e poi continuando la fase di compressione, arrivando sino a 3300 K.

**Combustion in SI Engines**



Si noti molto che nei prodotti della combustione le temperature non sono uniformi. Tutte le masse in camera non bruciano istantaneamente, ma allo scoccare della scintilla comincia a bruciare una prima molecola e successivamente altre masse di reagenti vengono inglobate e mischiate a bruciare. La massa miscelata che brucia ha dimensioni inferiori rispetto all'ambiente (ossia alla camera), quindi quando lei brucia la pressione in camera di fatto non cambia => si può ipotizzare la combustione a  $p=const$ .

Il salto di temperatura sarà allora calcolabile come il  $\sqrt{\gamma}$  della miscelata moltiplicato per la massa della molecola deve essere uguale a  $m_{cp} \Delta T$ :

$$m_b H_i = m_{cp} \Delta T$$



Quindi il  $\Delta T$  sarà funzione del potere calorifico a pressione costante e del rapporto aria/comburibile quindi della densità della miscela.

Quindi le mesecole subiscono dei  $\Delta T$  quasi tutti uguali, però la prima mesecola che brucia, a un certo punto viene compressa perché lo stantuffo sale, e quando poi bruciano le mesecole successive e quindi i prodotti della combustione espandono, vanno a comprimere le mesecole già bruciate in precedenza e quindi la prima mesecola raggiunge le  $T$  più elevate e poi si hanno successivamente  $T$  sempre più basse.

Quindi all'interno dei prodotti della combustione la  $T$  non è uniforme, ma si ha una distribuzione di temperatura per cui le mesecole che sono bruciate per prime raggiungono le  $T$  più elevate, mentre quelle che sono bruciate per ultime raggiungono  $T$  più basse.

Il fatto che la massa in camera bruci progressivamente ci consente di definire un parametro  $X_b$  che è la FRAZIONE DI MASSA BRUCIATA:

$$X_b = \frac{m_b}{m_{TOT}} = \frac{\text{MASSA DI BURNED GAS}}{\text{MASSA TOTALE IN CAMERA}}$$

Come si vede sul grafico a pag. 34 tale frazione di massa bruciata vale inizialmente zero (in quanto inizialmente nulla è bruciata), poi man mano che le varie mesecole concorrono al processo di combustione questa  $X_b$  inizia a crescere. Se la combustione fosse completa, al suo termine si avrebbe  $X_b = 1$  perché tutta la massa in camera ha partecipato al processo di combustione. Poiché la combustione è incompleta si osservano valori  $< 1$ .

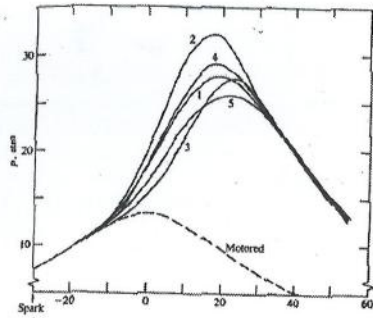
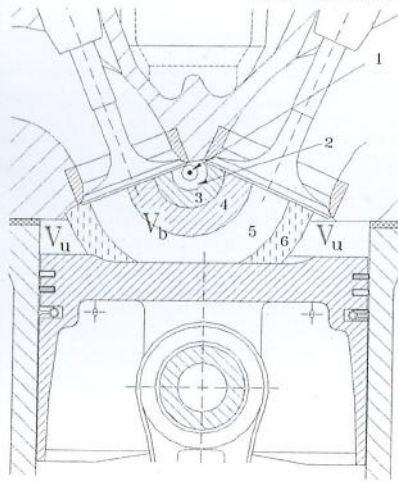
Nello stesso grafico sono visibili gli andamenti di  $T$  per prima e ultima mesecola ed inoltre l'andamento di pressione. Si nota che l'andamento di pressione presenta un massimo e poi scende e se non ci fosse la combustione il max sarebbe in corrispondenza del PMS, mentre essendoci la combustione, oltre all'effetto di compressione dello stantuffo, c'è l'effetto legato alla espansione del burned gas e quindi il max di pressione si raggiunge in corrispondenza del massimo di temperatura dopo una serie di gradi rispetto al PMS.

Questa è la descrizione della combustione nei motori ad accensione comandata. Come si formano gli inquinanti di cui abbiamo parlato? Come si formano ed esempio gli idrocarburi incombusti?

Considerando di avere in camera una miscela aria-comburibile (che si può formare nel condotto di aspirazione o per iniezione diretta) e che è presente prima che scoppi la scintilla, ad esempio si mette al punto morto (al max nella prima parte della fase di compressione) per avere una miscela omogenea, mentre se si

vuole una miscela stratificata si mette dopo, di fatto in fase di compressione si ha in camera una miscela A/F o perfettamente omogenea o stratificata.

**Combustion in SI Engines**



Quindi cosa succede mentre noi stiamo comprimendo e la combustione ne ancora non è partita?

La miscela può inserirsi negli interstizi tra stantuffo e cilindro, tra testa e cilindro o ancora che l'olio lubrificante assorba questi idrocarburi incombusti.

Quindi parte della miscela va a finire in zone dove la

flamma non arriverà mai (in quanto si spegne prima), non partecipando al processo di combustione. Ma quando la combustione è finita e lo stantuffo torna indietro, le pressioni in camera diminuiscono e questi idrocarburi che non hanno partecipato al processo di combustione ritornano in camera, perché vengono spinti fuori dagli interstizi, oppure <sup>quelli precedenti</sup> assorbiti dall'olio ritornano in camera in quanto ora la concentrazione degli HC all'interno dell'olio lubrificante è superiore rispetto a quella che c'è in camera (mentre prima era il contrario) e quindi per gradiente di concentrazione <sup>ovvero</sup> positivo essi ritornano in camera dove però è presente la combustione e quindi ce li ritroviamo allo scarico.

• **Il CO come si forma?**

Come visto in precedenza non tutto il carbonio riesce a ossidarsi a CO<sub>2</sub> (pag. 24).

• **Gli ossidi di azoto NOx come si formano?**

Come si vede dal profilo di T nel grafico in basso a pag 34, si hanno delle elevatissime temperature nei buchi dei gas alle quali l'azoto reagisce con l'ossigeno formando ossidi di azoto, poi le T scendono rapidamente, gli ossidi che si sono formati si sbrancano e ce li si ritrova allo scarico.

• **Come si forma il particolato PM?**

Nei motori od occasione comandata se ne forma molto poco, ma nel caso di motori a iniezione diesel si possono avere zone dove il combustibile è rimasto liquido e ha difficoltà a mescolarsi con l'aria e => lì il carbonio in assenza di ossigeno può essere soggetto a delle reazioni di pirolisi che danno delle particelle carboniose.



N.B. Abbiamo sottolineato che i motori ad accensione comandata sono caratterizzati da un'alta resistenza all'accensione, hanno quindi un elevato angolo di attacco. Questa caratteristica del combustibile non va confusa con la sua capacità di evaporazione, perché tali combustibili a bassa volatilità, proprio perché hanno delle cotene coste sono anche relativamente leggeri dal punto di vista del peso molecolare e quindi sono molto inclini ad evaporare. Quindi tali tipi di motori hanno un combustibile che è adatto ad essere iniettato o bassa pressione nei collettori d'aspirazione o direttamente in camera (iniezione dosetta) in quanto la sua alta capacità di evaporazione fa sì che esso non necessita di alte pressioni di iniezione come invece accade nei Diesel (x 2500 bar) che hanno bassa volatilità.

N.B. Abbiamo sottolineato inoltre che la combustione in tali motori avviene bene perché la velocità con cui la fiamma si propaga è elevata perché si porta da una velocità laminare amplificata dalle turbolenze .... Andando a osservare il grafico della velocità laminare a pag. 33 è funzione di un parametro fondamentale:

• EQUIVALENT RATIO

La DOSATURA si definisce come:

$$\alpha = \frac{m_a}{m_f} \quad m_f = \text{massa combustibile} \neq m_b = \text{massa burned gas}$$

La DOSATURA stechiometrica è:

$$\alpha_{st} = \left( \frac{m_a}{m_f} \right)_{st}$$

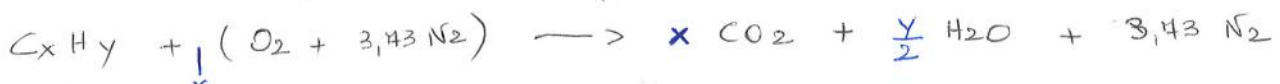
Una CONDIZIONE STECHIOMETRICA per una reazione chimica di combustione prevede che reagenti e prodotti siano bilanciati.

Considerando ad esempio per un generico idrocarburo la reazione di combustione <sup>completa</sup> si può scrivere come:



↳ l'ossigeno si bilancia moltiplicato in quanto esiste perché l'idrocarburo reagisce con l'ossigeno

Bilanciare la reazione per ottenere il cosiddetto rapporto stechiometrico:



Quindi voluto il mio RAPPORTO STECHIOMETRICO come il rapporto tra molarità  
d'aria e massa combustibile derivante dalla precedente relazione:

$$d_{st} = \left( \frac{m_a}{m_f} \right)_{st} = \frac{\left( x + \frac{y}{4} \right) (O_2 + 3,43 N_2)}{C x H y} = \frac{\left( x + \frac{y}{4} \right) (16 \cdot 2 + 3,43 \cdot 28)}{x \cdot 12 + y \cdot 1}$$

Quindi si ottiene un valore caratteristico di  $d_{st}$  per ogni tipologia di  
combustibile.

Per il metano  $CH_4$  ad esempio:

$x=1$      $y=4$     si ottiene     $d_{st_{CH_4}} = 17$

Per la benzina:

$d_{st_{BENZINA}} = 14,6$

Note dosatura e dosatura stechiometrica si possono definire 2 valori  
tipici e dimensionali:

I) DOSATURA RELATIVA  $\lambda$  :     $\lambda = \frac{\alpha}{d_{st}} = \frac{1}{\phi}$

II) INDICE DI EQUIVALENZA  
O EQUIVALENT RATIO  $\phi$  :     $\phi = \frac{d_{st}}{\alpha} = \frac{1}{\lambda}$

- MISCELA STECHIOMETRICA :     $\lambda = \phi = 1$     perché     $\alpha = d_{st}$
- MISCELA RICCA :     $\alpha < d_{st} \Rightarrow \lambda < 1$      $\phi > 1$   
ECESSO DI COMBUSTIBILE
- MISCELA POVERA :     $\alpha > d_{st} \Rightarrow \lambda > 1$      $\phi < 1$   
ECESSO D'ARIA

Tradizionalmente si usa il  $\lambda$  per i motori ed apparecchi comandati e il  
 $\phi$  per i motori Diesel, perché siccome il motore diesel viene regolato  
oggettivo sul combustibile  $\phi$  è direttamente un indice del carico, perché  
quando  $\phi$  sale il carico sale, mentre quando  $\phi$  scende il carico scende.  
Riprendendo ora il grafico della velocità laminaire o pag. 33, si vede che  
per  $\phi = 1$  siamo sullo stechiometrico, mentre per  $\phi = 1,1$  siamo nel ricco e  
per  $\phi = 0,9$  siamo nel povero.

- Dov'è il max della velocità laminaire?  
Considerando la benzina si vede che tale massimo è nel ricco, quindi se



Voglio massimizzare la velocità con cui avviene la velocità di propagazione di fiamma cercando di stare tra il ricco e lo stechiometrico.

Inoltre se mi allontano molto da tale zona, si nota che la velocità comincia a scendere ~~in~~  $\rightarrow$  il processo di <sup>combustione e</sup> propagazione delle fiamme comincia a deteriorarsi. Quindi <sup>troppo</sup> ricco non si va in quanto anzi maggior spesa di combustibile che comunque non avrebbe l'obbligo per reagire; lato povero ci si spinge più a sx, ma se eccedo andando troppo nel povero la velocità luminosa comincia a diminuire moltissimo, per cui la FINESTRA UTILE all'interno della quale posso muovermi non è molto grande.

Quindi in questa tipologia di motori lo non posso pensare di tenere costante l'aria e variare la quantità di combustibile, perché se lo facessi e riducessi ad esempio eccessivamente il combustibile, la velocità luminosa calerebbe e di conseguenza anche la velocità turbolenta e quindi anzi malfunzionamento del motore. Ecco che in questi motori, per la regolazione si utilizza una "VALVOLA A FARFALLA" che permette di regolare l'aria in ingresso al motore e di tal punto il combustibile me lo gioco per cercare di tenere al massimo la velocità luminosa e quindi il tempo nel ricco.

Molto spesso bisognerà mantenersi su  $\phi = \lambda = 1$  perché si ha un problema legato all'after-treatment, ossia ai catalizzatori che danno il massimo dell'efficienza se  $\lambda = 1$  o comunque si trova in quell'intervallo.

Quindi vado a regolare l'aria andando a regolare poi il combustibile di conseguenza e quindi se chiudo l'aria  $\Rightarrow$  dimetto il combustibile  $\Rightarrow$  dimetto la potenza, il rendimento ecc...

Oggi quasi non si utilizza più in alcuni casi la valvola a farfalla in quanto introduce notevoli perdite di pompaggio, ma alternativamente o si regola l'apertura e la chiusura della valvola di aspirazione oppure si passa a un motore a iniezione diretta in cui si regola apertura e chiusura della valvola di aspirazione e inietto direttamente in camera eliminando dunque le perdite di pompaggio proprie della farfalla.

## FORMAZIONE DEGLI OSSIDI DI AZOTO (NO<sub>x</sub>) NEI MOTORI S. I.

### Generalità

Durante il processo di combustione, per effetto delle alte temperature le molecole di ossigeno e di azoto, presenti nella carica e provenienti principalmente dall'aria aspirata dal motore, vengono decomposte in O ed N. Questi ultimi, a loro volta, si ricombinano dando luogo principalmente a NO ed NO<sub>2</sub>.

Per i nomi dei composti si farà riferimento alla terminologia IUPAC.

- NO: monossido di azoto (ossido di azoto) – numero di ossidazione (n.o.) dell'azoto pari a 2
- NO<sub>2</sub>: diossido di azoto (biossido di azoto, anidride nitroso-nitrica) – n.o. dell'azoto = 4

NO<sub>x</sub> = principali ossidi di azoto presenti nei motori

La ricombinazione di ossigeno e azoto può anche portare alla formazione di piccoli quantitativi di:

- N<sub>2</sub>O: ossido di diazoto (protossido di azoto, ossidulo di azoto, gas instabile detto anche gas esilarante) – n.o. dell'azoto = 1
- N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: triossido di azoto (sesquiossido di azoto, anidride nitrosa) – n.o. dell'azoto = 3
- N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: pentossido di azoto (anidride nitrica) – n.o. dell'azoto = 5

→ non si hanno nei motori a combustione interna

Con il termine ossidi di azoto NO<sub>x</sub> si indica l'insieme delle emissioni di NO e di NO<sub>2</sub>, che costituiscono pressochè la totalità degli ossidi di azoto emessi dai motori a combustione interna.

Nei motori ad accensione comandata che operano in condizioni di funzionamento prossime a quelle stechiometriche, le emissioni di NO<sub>x</sub> sono in pratica costituite unicamente da NO. L'NO<sub>2</sub> è presente in quantitativi importanti principalmente nei motori ad accensione per compressione,

dove si presenta in quantitativi del 10 al 30% e ci può essere anche interesse offuschi il rapporto NO<sub>2</sub>/NO allo scarico sia anche superiore, anche pari a 1 per il corretto funzionamento del sistema di after-treatment.

Nel caso dei motori ad accensione comandata invece  
NO<sub>x</sub> = NO.

Durante il processo di combustione, le elevate temperature raggiunte dalla fiamma spezzano il legame molecolare di ossigeno ed azoto contenuti nell'aria di aspirazione ed i prodotti risultanti si ricombinano nei gas combusti alle spalle del fronte di fiamma per dare NO.

La velocità di formazione dell'NO è bassa se confrontata con quella dell'intero processo di combustione, e tale velocità aumenta esponenzialmente con la temperatura dei gas combusti.

I principali parametri che determinano la quantità degli NO prodotti da queste reazioni sono, in ordine di importanza:

- la storia temporale dei gas combusti in camera di combustione e, in particolare, il valore del picco della temperatura dei gas combusti raggiunto durante la combustione;
- a parità di temperatura di combustione, la concentrazione di ossigeno in camera.

Durante la successiva fase di espansione, quando i gas combusti si raffreddano, le reazioni chimiche che coinvolgono gli NO si congelano, pertanto i livelli degli NO rilasciati allo scarico del motore sono molto maggiori rispetto a quelli che si avrebbero nelle condizioni di equilibrio chimico alla temperatura di scarico del motore.



La principale sorgente di NO è costituita dall'ossidazione dell'azoto atmosferico (azoto molecolare).

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; nonostante i gasoli contengano percentuali di azoto maggiori, tali percentuali non sono tali da dare contributi importanti alla produzione di NO.

## Meccanismi di formazione degli NOx – primi studi

I primi studi sulla produzione di NO nei motori ad accensione comandata, avevano individuato delle correlazioni tra i livelli di NO misurati allo scarico ed i principali parametri di funzionamento del motore: dosatura, anticipo di accensione, velocità angolare e pressione nel collettore di scarico (ad esempio: Huls and Nickol, 1967; Hazen and Holiday, 1962; Alperstein and Bradow, 1966; Wimmer and 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 combusti 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.

A scanso di equivoci si afferma prima di tutto che la reazione:

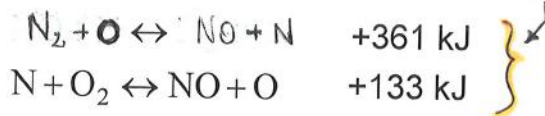


REAZIONE DI NON INTERESSE

in quanto potrà anche avvenire ma avviene con velocità talmente basse che non ha effetti da prendersi in considerazione

## Meccanismi di formazione degli NOx – formazione termica

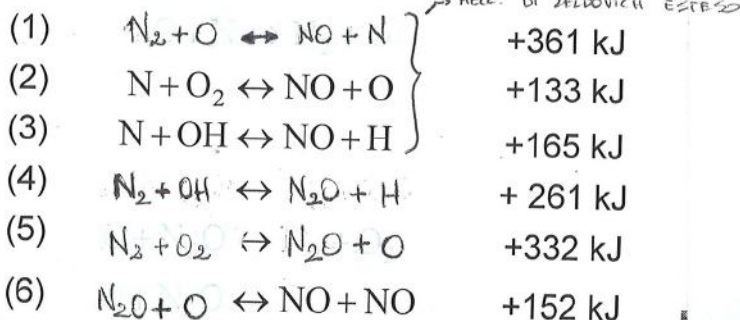
Newhall and Starkman (1967) proposero un primo modello "cinetico" della formazione degli NO, basato sul cosiddetto meccanismo di Zeldovich (1946):



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 combusti, assunti a loro volta omogenei.

Lavoie et al. (1970) proposero un modello cinetico basato su 6 equazioni:



Le principali reazioni che avvengono in un motore a combustione interna sono le 6 reazioni appena scritte, e sono scritte in ordine di importanza. Le più importanti sono le prime 3, mentre le ultime 3 <sup>lo</sup> sono scritte meno.

Le prime 3 reazioni costituiscono il cosiddetto MECCANISMO DI ZELDOVICH ESTESO.

Si noti che le ultime 3 differiscono dalle prime 3 in quanto si ha una specie chimica nuova che compare  $N_2O$ .

Inanzitutto si ricorda dove è scritto NO, e come nelle prime 3 equazioni. Nel dettaglio, le precedenti 6 reazioni sono state scritte in maniera da avere energia liberata positiva, ricordando invece alla formazione di NO la (1) andrebbe letta da destra verso sinistra. (Le equazioni sono state scritte ricordando alla formazione di NO)

Si hanno 2 elementi che determinano la formazione di ossido di azoto:

- ALTE TEMPERATURE  $\uparrow T$
- PRESENZA DI RADICALI, IN PARTICOLARE RADICALI OSSIGENO (O) E RADICALI OH

→ Tutti questi effetti, in un motore a combustione interna, sono determinati dalla combustione.

Tra gli elementi che contribuiscono alla formazione di ossido di azoto si vuole anche:

- TEMPO DI RESIDENZA SUFFICIENTEMENTE LUNGO
- (bisogna dare il tempo cioè che le reazioni avvengano)*

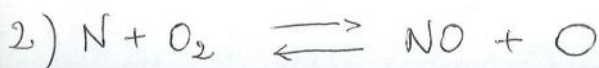
(• BURNED GAS → PAG. 46)

Quando tutte queste 3 condizioni si verificano avvengono le seguenti reazioni:



L'azoto, che è presente nell'aria, e quindi è anche presente nel nostro motore, alle alte temperature vede la presenza di radicali ossigeno <sup>derivati dalla combustione</sup> e quindi reagisce formando NO ed N.

Si vede che a dx si forma un atomo di azoto, che rispetto alla molecola di azoto è decisamente più reattivo, non reagisce più con i radicali, ma con le molecole di ossigeno formando NO e O:





Dalle strutture della 1) e della 2) si vede che si ha sempre una molecola (rispettivamente  $N_2$  e  $O_2$ ) che reagisce con un radicale (rispettivamente  $O$  ed  $N$ ), e si deve formare sempre  $NO$ .

Inoltre l'atomo di ossigeno che si è venuto a formare (quindi l'ossigeno atomico) potrebbe andare a reagire anche con un radicale  $OH$  formando  $NO + H$  che è la terza reazione della serie:



Affinché si abbiano queste 3 reazioni, la 1) deve verificarsi necessariamente per prima, in quanto i radicali  $O$  e  $OH$  sono già presenti della combustione così come le alte  $T$ , mentre per la reazione 2) e 3) mi serve l'atomo di ossigeno  $N$  che è generato dalla 1).

La reazione 1) è caratterizzata dall'energia di attivazione maggiore, quindi la barriera è proprio lei, per cui per poter far avvenire la reazione 1) bisogna superare quell'energia di attivazione e questo viene garantito dalle alte  $T$  e dalla presenza del radicale  $O$ , entrambi effetti dovuti alla combustione.

In un ambiente, fortunatamente, essendo presente la combustione e non avendo nessun gas a  $3000\text{ K}$  tali reazioni non avvengono.

Ovviamente, come tutte le reazioni chimiche, la doppia freccia per tali reazioni indica la possibilità che si verificano reazioni dirette e inverse.

Nei motori si hanno aumenti e diminuzioni di  $T$ ; se supponiamo incrementi e decrementi di  $T$  graduali occorrerebbe che man mano che la  $T \uparrow$  queste reazioni si spostano verso dx e si forma l' $NO$ , quando poi la  $T$  tornasse a scendere avverrebbero le reazioni inverse e si tornerebbe al punto di partenza con la dissociazione dell' $NO$  non avendo ossidi di ossigeno allo scacco.

Tutto questo avverrebbe in un processo governato dall'equilibrio chimico, cioè quando  $T \uparrow$  l'equilibrio si sposta verso la formazione di  $NO$ , mentre quando  $T \downarrow$  tutto si sposta di nuovo verso sinistra.

Il problema è che in un motore le cose non vanno in questo modo, perché si raggiungono molto rapidamente delle altissime T e la velocità di una reazione chimica non dipende in modo lineare dalla T, ma in modo esponenziale, secondo la LEGGE DI ARRHENIUS:

con K = COSTANTE DI VELOCITÀ DI REAZIONE

La costante di velocità di reazione varia in funzione della temperatura secondo la legge:

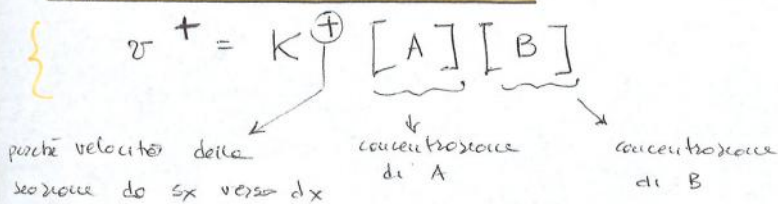
$$k = a T^b e^{-\frac{A}{RT}}$$

- a, b, A: costanti caratteristiche della reazione in esame, indipendenti da ogni altro fattore;
- e: base dei logaritmi naturali;
- R: costante universale dei gas perfetti;
- T: temperatura assoluta a cui si fa riferimento.

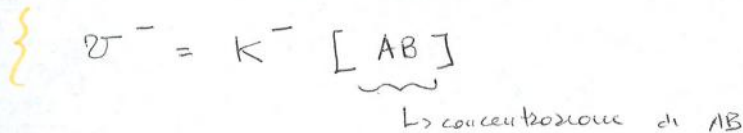
Quindi se si vuole scrivere la velocità di una qualunque reazione chimica:



VELOCITÀ DI REAZ. DA SX VERSO DX:



VELOCITÀ DI REAZIONE (INVERSA) DA DX VERSO SX:



All' EQUILIBRIO CHIMICO queste due velocità sono uguali, cioè:

$$R = v^+ = v^-$$

La velocità di reazione (diretta/inversa) dipende dalla temperatura e d'altra il rapporto tra le velocità di reazione diretta e inversa dipende anch'esso dalla T perché all'aumentare di T l'equilibrio si sposta verso dx, mentre al diminuire di T si sposta verso sx.

Quindi che cosa succede?

Il motore avvia il processo di combustione, quindi i busied gas diventano improvvisamente busied gas a 3000 K e la K cresce



in maniera elevatissima anche perché ho superato l'energia di attivazione, queste sezioni si attivano molto rapidamente, si formano degli ossidi di azoto; poi a questo punto la  $T$  inizia a diminuire e ciò in un motore accade molto velocemente, quindi la combustione sta finendo e lo stantuffo sta scendendo, quindi nel giro di  $30^\circ$  di manovella la  $T$  diminuisce moltissimo.

Si consideri che  $180^\circ$  a 4000 rpm corrisponde a circa 1 ms, quindi  $30^\circ$  saranno  $\frac{1}{6}$  e quindi  $150 \mu s$  e  $\Rightarrow$  nel giro di qualche centinaio di microsecondi la  $T$  scende e le velocità diminuiscono bruscamente.

Quindi diminuisce bruscamente la velocità della sezione di setta e dovrebbe vincere adesso la velocità inversa, che dovrebbe spostare l'equilibrio verso sx, ma siccome tutto questo si realizza in pochissimo tempo non c'è il tempo affinché l'equilibrio si sposti a sx e  $\Rightarrow$  di fatto

le sezioni simultaneamente congelate ed è un fenomeno che è controllato

da quello che si chiama CINETICA CHIMICA: la  $T \uparrow$  e l'equilibrio si sposta verso dx, poi la  $T \downarrow$  e l'equilibrio non riesce a spostarsi altrettanto velocemente verso sx perché la  $T$  stanno scendendo e quindi le velocità stanno diminuendo, a un certo punto le  $T$  arrivano a essere così basse che il fenomeno viene completo. Se gli si lasciasse del tempo, il fenomeno evolverebbe verso lo equilibrio chimico, ma questo tempo non c'è e quindi ci si ritrova allo scoppio degli ossidi di azoto. Ecco perché a pag 42 tra gli elementi che determinano la formazione dell'NO ho aggiunto il 3° FATTORE, ossia il TEMPO DI RESIDENZA SUFFICIENTEMENTE LUNGO.

Ciò equivale a dire che bisogna lasciare ai reagenti un tempo sufficientemente lungo per reagire in cui le  $T$  siano elevate, quando poi le  $T$  cominciano a scendere il fenomeno si congela e rimane lì dove è avvenuto. Un tempo di residenza sufficientemente lungo, dove si ha a disposizione qualche centinaio di  $\mu s$ , non si trova di sicuro nel fronte di fiamma (dove la combustione è istantanea)

me lo si ha nei prodotti della combustione. Osservando infatti il grafico a pag. 34 in basso a dx, si vede che i prodotti della combustione presentano  $\theta$  di elevate  $T$  per almeno  $30^\circ$  di angolo di monovella, quindi in questa ventata di gradi si formano gli ossi di azoto, poi le  $T$  iniziano a scendere, gli NO cominciano a decomporsi, ma per effetto della rapida diminuzione delle temperature si congelano e rimangono allo scorcio. Quindi serve un Tempo di residenza in una zona ad alta  $T$  sufficientemente lungo e questo capita nei prodotti della combustione.

Quindi solo nei "BURNED GAS" si verificano i 3 fenomeni che determinano la formazione degli NO e aggiungo: BURNED GAS a pag. 42.

Tornando alla costante di velocità di reazione definita a pag. 44:

$$K = aT^b e^{-\frac{A}{RT}}$$

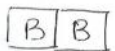
con  $aT^b =$  **FAITORE PRE-ESPONENZIALE** o **STERICO**

A = ENERGIA DI ATTIVAZIONE = energia da superare per poter passare dai reagenti ai prodotti

Relativamente al fattore pre-esponenziale, si immagina di avere 2 tipi di molecole che reagiscono:



+



reagiscono e danno le 2 seguenti molecole



+



Sarebbe una reazione del tipo:  $A_2 + B_2 \rightarrow 2AB$

Queste molecole per poter reagire devono venire a contatto tra loro urtandosi. Se nella reazione diretta le molecole per formare i prodotti possono venire a contatto in differenti modi, nella reazione inversa le combinazioni possibili di urto si riducono.

Il **FAITORE STERICO** è un indice di quanto dal punto di vista statistico l'urto avviene nella maniera corretta; esso dipende dalla geometria