

UNIVERSITA' TELEMATICA "e-Campus"

Facoltà di ingegneria

Corso di laurea in ingegneria industriale curriculum energetico

Effetti dell'ossidrogeno nella riduzione degli inquinanti nei MCI

Relatore: Mario Di Veroli

Tesi di Laurea di:

Andrea Benetti

Matricola numero 001018710

Anno Accademico 2017 / 2018

AUTORIZZAZIONE ALLA CONSULTAZIONE DELLA TESI DI LAUREA

Il/la sottoscritto Andrea Benetti

N° di matricola 001018710 nato a Busto Arsizio il 24/01/1988

autore della tesi dal titolo "EFFETTI DELL'OSSIDROGENO NELLA RIDUZIONE
DEGLI INQUINANTI NEI MCI"

AUTORIZZA

NON AUTORIZZA

la consultazione della tesi stessa, fatto divieto di riprodurre, parzialmente o integralmente, il contenuto.

Dichiara inoltre di:

AUTORIZZARE

NON AUTORIZZARE

per quanto necessita l'università telematica e-Campus, ai sensi della legge n. 196/2003, al trattamento, comunicazione, diffusione e pubblicazione in Italia e all'estero dei propri dati personali per le finalità ed entro i limiti illustrati dalla legge.

Data _____ Firma _____

Indice

Introduzione	5
Capitolo 1	7
1 I Motori a combustione interna e la loro storia	7
1.1 Classificazione dei motori a combustione interna	9
1.1.1 Motori ad accensione comandata: il motore otto	10
1.1.2 Motori ad accensione spontanea: il motore diesel	10
1.1.3 Motori a 2 tempi	11
1.1.4 Motori a 4 tempi	11
1.2 Produzione di lavoro: i cicli termodinamici	11
1.2.1 Ciclo ideale a volume costante: Il ciclo Otto ideale	12
1.2.2 Ciclo ideale a pressione costante: Il ciclo Diesel ideale	13
1.2.3 Ciclo ideale a pressione limitata: Il ciclo Sabathè ideale	13
1.3 Rendimenti prestazioni e campi d'impiego	14
Capitolo 2	16
2 I combustibili	16
2.1 I combustibili tradizionali: il petrolio e la raffinazione	16
2.2 I combustibili alternativi	17
2.2.1 Il gas di petrolio liquefatto (GPL)	18
2.2.2 Il gas naturale	18
2.2.3 I biocombustibili il biodiesel e il bioetanolo	19
2.2.4 L'idrogeno	20
Capitolo 3	22
3 Le emissioni inquinanti nei motori a combustione interna	22
3.1 Sostanze inquinanti principali: composizione, formazione ed effetti	23
3.1.1 Monossido di carbonio (CO)	23
3.1.2 Ossidi di azoto (NOx)	24

3.1.3	Ossidi di zolfo (SO _x)	26
3.1.4	Idrocarburi incombusti (HC)	28
3.1.5	Particolato	29
Capitolo 4		29
4	Normativa e tecnologie per la riduzione degli inquinati	32
4.1	La normativa europea	32
4.2	I motori e il settore dei trasporti	33
4.3	La normativa applicata ai motori a combustione interna	38
4.4	Tecnologie e applicazioni per la riduzione degli inquinanti	40
4.4.1	Interventi sui combustibili	41
4.4.2	Interventi sull'alimentazione	42
4.4.3	Interventi sul processo di combustione	44
4.4.4	Interventi sui gas di scarico	45
4.4.4.1	I reattori termici	45
4.4.4.2	I reattori catalitici	46
4.4.4.3	I convertitori DeNO _x	48
4.4.4.4	Tecnologia SCR e filtro antiparticolato	49
Capitolo 5		51
5	L'idrogeno applicato ai mci per la riduzione degli inquinanti	51
5.1	Caratteristiche chimico-fisiche dell'idrogeno	52
5.2	Metodi di produzione dell'idrogeno	55
5.2.1	Produzione di idrogeno dai combustibili fossili	56
5.2.1.1	Steam-Reforming (SMR)	56
5.2.1.2	Partial oxidation (POX)	57
5.2.1.3	Coal gasification	58
5.2.2	Produzione di idrogeno per elettrolisi dell'acqua	60
5.2.3	Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili	62
5.2.4	Tecnologie innovative per la produzione di idrogeno	65
5.3	Trasporto e stoccaggio dell'idrogeno	67

5.3.1	Trasporto e stoccaggio innovativi	69
Capitolo 6		72
6	Produzione di Ossidrogeno on-board per l'alimentazione dei mci	72
6.1	Il gas di Brown	72
6.1.1	L'ossidrogeno nel settore dell'autotrazione	73
6.2	Il dispositivo	74
6.3	Le prove	77
6.3.1	Misure di coppia e potenza al variare dei giri di rotazione	78
6.3.2	Monitoraggio del veicolo in condizioni stazionarie	80
6.3.3	Simulazione del funzionamento del veicolo su strada	84
Capitolo 7		85
7	I risultati delle prove	85
7.1	Renault Clio	85
7.1.1	Confronto delle curve di coppia e potenza per Clio	85
7.1.2	Monitoraggio Clio in condizioni stazionarie	87
7.1.3	Risultati simulazione prova su strada per Clio	91
7.2	Lancia Y	96
7.2.1	Confronto delle curve di coppia e potenza per Y	96
7.2.2	Monitoraggio Lancia Y in condizioni stazionarie	98
7.2.3	Risultati simulazione prova su strada per Lancia Y	101
Capitolo 8		103
8	Conclusioni	103
Bibliografia		108

Introduzione

Il motore a combustione interna è una macchina termica destinata alla produzione di energia, grazie al processo di combustione del carburante, solitamente di origine fossile, che avviene all'interno della camera di combustione del motore. Durante il processo di produzione dell'energia, il fluido di lavoro segue precisi cicli termodinamici che portano ad una trasformazione chimico-fisica dello stesso. Alla fine del ciclo, il combustibile trasformatosi in gas combusti, viene espulso dal motore, mediante le valvole e i condotti di scarico, verso l'ambiente esterno.

Per questo motivo i motori a combustione interna vengono classificati come sorgenti di inquinamento, in quanto i gas di scarico, costituiti per lo più da sostanze nocive come la CO, gli HC, gli NOx ed il particolato, da essi prodotti in grandi quantità, vanno a modificare ed alterare la composizione chimica dell'atmosfera terrestre.

Numerose normative sono state emanate da vari enti durante il corso degli anni, con l'obiettivo di tutelare l'ambiente e la salute dell'uomo eliminando o per lo meno limitando le emissioni inquinanti. Nonostante i miglioramenti ottenuti, ancora oggi l'allarme inquinamento risulta essere un tema di attualità. Normative sempre più stringenti, obbligano quindi i produttori e i ricercatori a guardare verso nuove tecnologie e nuovi combustibili "puliti", cioè capaci di produrre come risultato della combustione sostanze non tossiche e non nocive.

Sotto questo punto di vista, l'idrogeno, se utilizzato come combustibile alternativo nei motori a combustione interna, sembrerebbe risultare una fonte energetica molto interessante. Purtroppo difficoltà legate alla sua produzione, allo stoccaggio a bordo del veicolo e al suo elevato campo d'infiammabilità ne limitano lo sviluppo e l'utilizzo in campo motoristico.

Obiettivo della tesi è quindi quello di esporre i test effettuati su veicoli dotati di dispositivo per la produzione di ossidrogeno, una miscela di idrogeno ed ossigeno

prodotta mediante elettrolisi dell'acqua, da diluire con il carburante direttamente a bordo del veicolo. I risultati ottenuti vengono inoltre analizzati nel testo con lo scopo di verificare la reale efficacia del dispositivo sotto diversi punti di vista, tra i quali quello prestazionale ed ambientale.

CAPITOLO 1

I motori a combustione interna (MCI) e la loro storia:

Per definizione il motore è una macchina destinata a produrre lavoro meccanico utilizzando una determinata forma di energia: meccanica, termica, chimica, elettrica. [1]

L'idea del motore a combustione interna risale addirittura al 17° secolo, quando si pensò di impiegare la polvere da sparo come sostanza capace, deflagrando, di produrre una depressione in una camera chiusa così da ricavare un'aspirazione di acqua nella camera stessa. Essendo però l'esplosione un processo irregolare e discontinuo non permise di applicarla a sistemi pratici.

Bisogna quindi attendere l'anno 1856, quando gli italiani E. Barsanti (1821-1864) e F. Matteucci (1808-1887) costruirono il primo vero motore a combustione interna. Il motore veniva alimentato da una miscela d'idrogeno e aria, con accensione mediante scintilla elettrica e carburazione all'atto della carica. Il ciclo di funzionamento era a tre tempi (aspirazione, scoppio e scarico). In questo tipo di motore l'azione motrice, sull'albero, non era data direttamente dall'impulso dell'espansione, che provocava la salita del pistone nella corsa di andata, ma dall'azione combinata della pressione atmosferica e del peso del pistone, che provocavano la discesa di quest'ultimo nella corsa di ritorno. Questa soluzione ad azione differita consentiva di ottenere un elevato rapporto di espansione, il quale garantiva un rendimento termico superiore rispetto ai motori ad azione diretta, come il motore Lenoir. Il motore Barsanti-Matteucci è quindi la prima concreta risposta all'esigenza di sostituire i motori a vapore con dispositivi più efficienti, economici e snelli, affidabili e adatti a diverse applicazioni. [2]

Di seguito viene riportata un'immagine tratta dal sito del museo nazionale della scienza e tecnologia Leonardo da Vinci di Milano, dove è custodito uno dei modelli del motore di Barsanti e Matteucci.

[1] Treccani – Enciclopedie online (<http://www.treccani.it/enciclopedia/motore-a-scoppio/>)

[2] LOMBARDIABENICULTURALI (<http://www.lombardiabeniculturali.it/scienza-tecnologia/schede/ST170-00357/>)

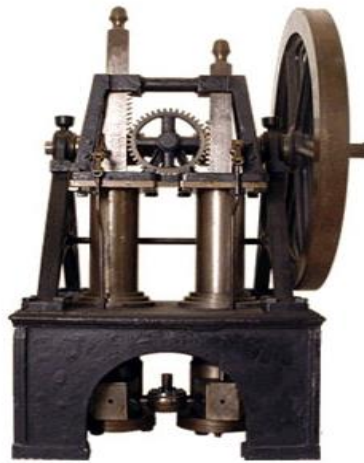


Figura 1.1 – Motore a scoppio Barsanti-Matteucci conservato presso il museo nazionale scienza e tecnologia Leonardo da Vinci (Milano) [3]

Nel 1860 il francese J.-J.-É. Lenoir costruì un motore simile al precedente, in cui la miscela aria-gas illuminante, aspirata per una parte della corsa del pistone, era accesa per mezzo di una scintilla ad alta temperatura e lo scarico dei gas combusti avveniva durante la corsa di ritorno.

Nel 1876 N.A. Otto (1832-1891), tedesco, costruì il primo motore ad accensione comandata a quattro tempi; nel 1875 F. Forest e nel 1879 D. Clerk (1854-1932) studiarono e costruirono modelli di motori funzionanti secondo il ciclo a due tempi.

Nel 1892 il tedesco R. Diesel (1858-1913) brevettò il motore Diesel che porta il suo nome. In questo motore l'accensione della miscela combustibile avveniva spontaneamente grazie all'alta temperatura all'interno del cilindro, dovuta all'elevata compressione. Questo motore presenta alti rendimenti, dovuti principalmente all'elevato rapporto di compressione che ne caratterizza il funzionamento, da cui conseguono bassi consumi specifici e notevoli economie d'esercizio, dato anche il basso costo dei combustibili bruciati.

Negli ultimi anni però le esigenze di ridurre l'emissione di sostanze inquinanti e i consumi hanno portato all'emanazione di normative da parte dell'Unione Europea. Tali normative sempre più severe e restringenti hanno portato i

[3] Sito museo nazionale scienza e tecnologia Leonardo da Vinci, Milano (<http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/motore-scoppio/>)

costruttori a dotare ciascun tipo di motore di un'apposita marmitta, detta catalitica, in grado di ridurre gli inquinanti nei motori ad accensione comandata ed abbattere la fuliggine (particolato) nei motori diesel. Al fine di diminuire i consumi e quindi i costi si sono dotati i motori di dispositivi elettronici per l'accensione e l'iniezione, capaci di apportare benefici alla fase di avviamento e combustione, intervenendo sulla miscela, sulle temperature di combustione, sul sistema di avviamento e sulla modalità d'iniezione della carica all'interno della camera di combustione.



Figura 1.2- Motore "Ingenium" turbodiesel da 2.0 litri Land-Rover 2017

1.1- **La classificazione dei motori a combustione interna**

Come riportato da S. Vagni i criteri di classificazione dei MCI possono essere molteplici:

- Avviamento della combustione: accensione comandata o spontanea
- Durata del ciclo di lavoro: 2/4 tempi
- Tipologia di combustibile: benzina, diesel, gas metano, gpl...
- Sistema di alimentazione dell'aria: aspirato, turbocompresso, sovralimentato

- Sistema di alimentazione del combustibile: iniezione diretta/indiretta, carburatore
- Tipo di moto: alternativo, rotativo, oscillante.

Nei seguenti sotto capitoli vengono approfonditi i concetti di motore ad accensione comandata e spontanea in quanto il processo di combustione costituisce il nucleo centrale del processo di conversione energetica.

1.1.1-Motori ad accensione comandata: Il motore Otto

In questa tipologia di motori, la combustione della miscela aria-combustibile (benzina) avviene grazie ad una scintilla che scocca tra gli elettrodi della candela. La combustione risulta essere molto rapida, grazie all'elevata volatilità e all'elevato potere calorifico dei combustibili utilizzati, ed idealmente a volume costante.

1.1.2-Motori ad accensione spontanea: Il motore Diesel

Motori nei quali il combustibile utilizzato è il gasolio, esso viene iniettato nel cilindro mediante un apposito sistema di alimentazione del carburante costituito principalmente dalla pompa e dagli iniettori. Attraverso l'iniettore il carburante viene polverizzato e spruzzato all'interno del cilindro dove si miscela con l'aria calda e compressa, dando così vita all'autoaccensione della carica che produrrà una combustione lenta e graduale, idealmente a pressione costante.

Risulta inoltre molto importante ricordare che durante il ciclo di lavoro le reazioni di ossidazione del combustibile in aria modificano la natura del fluido di lavoro, per cui ne deriva la necessità di provvedere ad una sua periodica sostituzione. L'espulsione dal cilindro dei gas combusti del ciclo precedente e la loro sostituzione con la carica fresca costituisce un'operazione che influisce in maniera sostanziale sulle prestazioni del motore. [4]

In base al processo di sostituzione della carica e alla durata del ciclo di lavoro avremo quindi motori a 2 e 4 tempi dei quali viene fornita una breve spiegazione nei seguenti sotto capitoli.

1.1.3-Motori a 2 tempi:

Motori nei quali la durata del ciclo di lavoro è di due corse o tempi del pistone, corrispondenti ad un solo giro dell'albero. Per non ridurre eccessivamente il tempo a disposizione delle fasi di compressione ed espansione dalle quali dipendono il rendimento e le prestazioni del motore, si riduce il tempo dedicato alla fase di lavaggio e sostituzione della carica, ne deriva quindi un ricambio del fluido di lavoro meno soddisfacente rispetto ai motori 4 tempi

1.1.4-Motori a 4 tempi:

Il ciclo di lavoro impiega quattro corse o tempi del pistone, corrispondenti a due giri completi dell'albero. Per questo motivo si ha a disposizione maggiore tempo da dedicare alle fasi di scarico ed aspirazione della carica fresca, realizzando così un migliore ricambio del fluido e diminuendo la presenza di incombusti all'interno del cilindro che comporterebbero, tra l'altro, anche una diminuzione del rendimento del motore.

1.2-Produzione di lavoro: I cicli termodinamici

Seguendo quanto esposto dall' ing. Sandro Vagni nel corso di motori a combustione interna, [4] il fluido di lavoro, come in tutte le macchine termiche e quindi anche nei MCI, è soggetto ad una serie di trasformazioni chimico-fisiche che seguono dei precisi cicli termodinamici durante i quali il motore attraverso le fasi di aspirazione, compressione, combustione, espansione e scarico trasforma l'energia chimica del combustibile in energia termica (combustione) e successivamente in energia meccanica (espansione) grazie al moto alternativo del sistema cilindro-pistone.

Più precisamente, per quanto riguarda i motori a combustione interna sarebbe opportuno parlare di cicli di lavoro piuttosto che termodinamici in quanto:

- il ciclo è aperto, il fluido di lavoro alla fine del ciclo non ritorna alle

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 11, università Ecampus. 2014

- condizioni di partenza, bensì viene scaricato in ambiente sotto forma di gas combusti.
- Nel ciclo reale il fluido subisce variazioni di massa durante le fasi di aspirazione e compressione e variazioni di composizione durante la combustione.
- Nel ciclo ideale a differenza del caso reale si opera con un fluido ideale con calore specifico costante all'interno di un motore perfetto che non presenta perdite di carico, dispersioni di calore e che opera in condizioni ideali con chiusura ed apertura istantanee delle valvole di aspirazione e scarico.

Di seguito vengono riportati i diagrammi p-V e T-s tratti dal corso "Motori a combustione interna – ing. Sandro Vagni".

1.2.1-Ciclo ideale a volume costante: Il ciclo Otto ideale

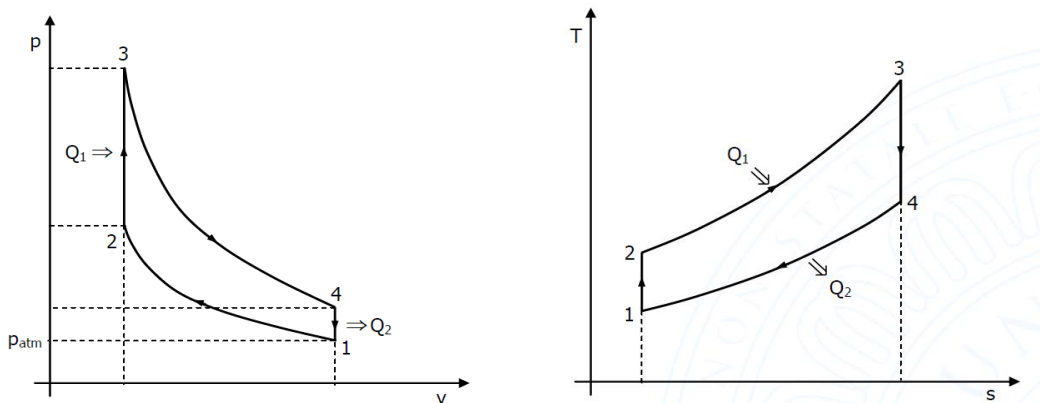


Figura 1.3 – Diagramma p-v del ciclo ideale a volume costante [4]

Figura 1.4 – Diagramma T-s del ciclo ideale a volume costante [4]

$$\eta_{th,O} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Dove r=rapporto volumetrico di compressione

k=rapporto tra calori specifici cp/cv

1.2.2-Ciclo ideale a pressione costante: Il ciclo Diesel ideale

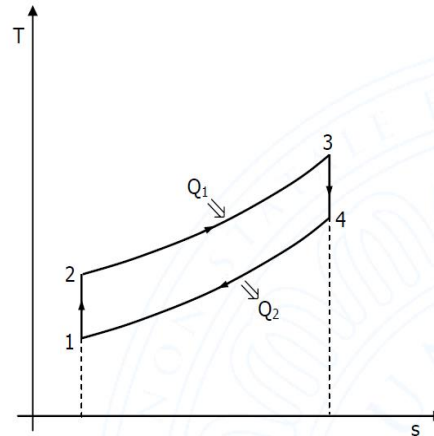
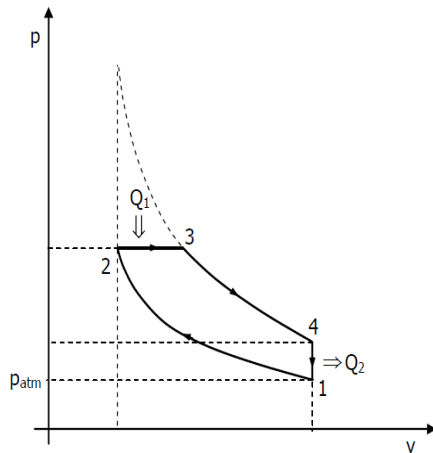


Figura 1.5 – Diagramma p-v del ciclo ideale a pressione costante [4]

Figura 1.6 – Diagramma T-s del ciclo ideale a pressione costante [4]

$$\eta_{th,D} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{b^k - 1}{k(b-1)}$$

Dove b=rapporto volumetrico di combustione a pressione costante

k=rapporto tra i calori specifici cp/cv

r=rapporto volumetrico di compressione

1.2.3-Ciclo ideale a pressione limitata: Il ciclo Sabathè ideale

I cicli Otto e Diesel ideali, come afferma Vagni [4], possono essere considerati casi particolari del ciclo Sabathè ideale. Se infatti il punto 3 coincide con il punto 3', cioè b=rapporto volumetrico di combustione a pressione costante=1, il ciclo Sabathè degenera in un ciclo Otto ideale. Se invece il punto 3' coincide con il punto 2, cioè con a=rapporto volumetrico di combustione a volume costante=1, il ciclo Sabathè ideale degenera in un ciclo Diesel ideale.

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 13, università Ecampus. 2014

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 14, università Ecampus. 2014

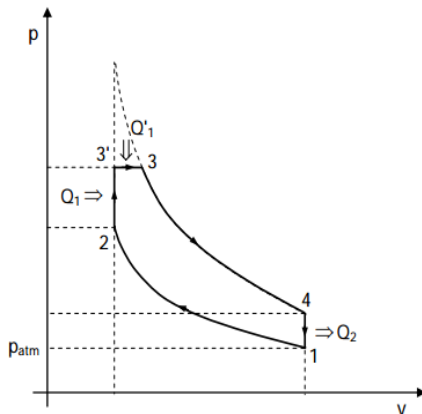


Figura 1.7 – Diagramma p-v del ciclo ideale a pressione limitata [4]

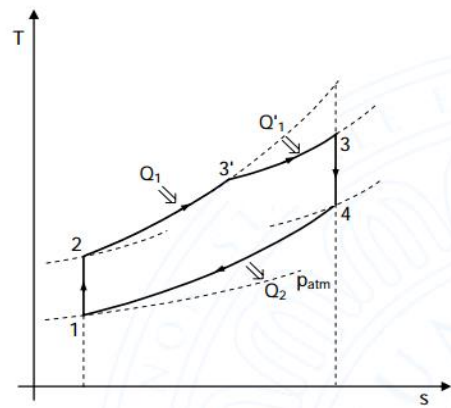


Figura 1.8– Diagramma T-s del ciclo ideale a pressione limitata [4]

1.3- Rendimenti, prestazioni e campi d'impiego:

Dopo aver esposto le varie caratteristiche e i cicli di lavoro delle principali tipologie di motori a combustione interna, risulta interessante esporre un confronto tra i rendimenti dei cicli ideali. L'ingegnere Vagni [4], nel capitolo 15 del corso "Motori a combustione interna" afferma che:

- A parità di rapporto volumetrico di compressione r , il rendimento termodinamico del ciclo Diesel ideale risulta sempre inferiore a quello del ciclo Otto ideale
- A parità di calore introdotto e pressione massima, ammettendo rapporti volumetrici di compressione differenti, grazie alla capacità del motore di diesel e della sua struttura di supportare rapporti volumetrici di compressione maggiori, il ciclo Diesel ideale presenta un rendimento termodinamico superiore al ciclo Otto ideale.

Per i motivi sopra elencati il motore Diesel presenta i seguenti svantaggi.

Rapporto peso/potenza maggiore rispetto al motore Otto, in quanto deve sopportare pressioni e temperature maggiori per dare via al processo di autoaccensione della miscela. Gli organi del motore, a parità di materiale usato, risulteranno quindi necessariamente più pesanti.

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 14, università Ecampus. 2014

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 15, università Ecampus. 2014

Inoltre la maggiore lentezza con cui si svolge il processo di combustione, unita alle elevate masse in movimento impediscono al motore Diesel di raggiungere un elevato numero di giri di rotazione a differenza del motore Otto. Di conseguenza le potenze specifiche per unità di cilindrata saranno minori nel motore Diesel.

Per contro il motore ad accensione spontanea può godere dei seguenti vantaggi: Rendimento globale migliore grazie alla possibilità di raggiungere rapporti di compressione maggiore oltre ad una marcata economicità legata alla possibilità di utilizzare combustibili meno pregiati e a consumi specifici minori rispetto al motore ad accensione comandata.

Si conclude quindi che il motore Diesel trova largo impiego nei settori delle medie ed alte potenze (trasporto industriale stradale, settore agricolo e navale) dove il costo di esercizio del motore ha un'importanza maggiore rispetto ai problemi di peso ed ingombro.

Il motore Otto invece trova applicazione nel campo delle basse potenze (mezzi di trasporto leggeri e impianti mobili di bassa potenza) dove fattori come elevata potenza specifica, leggerezza e dimensioni ridotte risultano prioritari.

CAPITOLO 2

I combustibili

Per produrre lavoro meccanico, i motori a combustione interna devono trasformare l'energia chimica fornita dal combustibile attraverso il processo di combustione. Si definisce quindi, carburante, un qualsiasi combustibile capace di formare una miscela infiammabile con l'aria o un altro gas comburente. [1]

La maggior parte dei carburanti per motori a combustione interna vengono ricavati dai combustibili fossili, appare perciò importante illustrare le principali proprietà chimico-fisiche dei combustibili tradizionali.

2.1 – I combustibili tradizionali: Il petrolio e la raffinazione

Il petrolio, dal quale si ricavano i principali carburanti di origine fossile, allo stato greggio si presenta come un liquido viscoso, più o meno colorato. Esso, come viene riportato da Arteconi nel corso di Energetica, "è composto da una miscela d'idrocarburi che contiene anche piccole percentuali di sostanze diverse come acqua, composti ossigenati, azotati e solforati, oltre ad impurità varie quali, ad esempio, la sabbia" [5]. Per questo motivo il petrolio greggio non può mai essere utilizzato direttamente, ma deve essere sottoposto al processo di raffinazione, cioè un insieme di trattamenti ai quali viene sottoposto il greggio che portano alla produzione dei prodotti finali. Le tecniche di raffinazione più utilizzate, prevedono la distillazione frazionata, un processo attraverso il quale il petrolio greggio viene riscaldato fino ad una temperatura di circa 360°C ed a pressione atmosferica incanalato nella colonna di distillazione. All'ingresso della colonna solo una frazione del totale del greggio non è evaporata. Essa viene estratta dal fondo della colonna come prodotto di scarto e bassa qualità. La restante parte evaporata risale la colonna verso l'alto e, man mano che si raffredda, deposita per condensazione le varie frazioni di idrocarburi. Nella zona più alta e quindi più fredda della colonna avremo la frazione gassosa, alla quale appartengono i gas come il metano, il propano ed il butano. Scendendo nella colonna troveremo la

[1] Treccani – Enciclopedie online (<http://www.treccani.it/enciclopedia/carburanti/>)

[5] Arteconi Alessia, corso "Energetica" capitolo 15, università Ecampus. 2014

frazione leggera, la frazione leggera-media e la frazione media alla quale appartengono, in ordine crescente di temperatura e densità, le benzine il cherosene ed il gasolio. Sul fondo della colonna avremo infine il residuo dal quale si ricavano successivamente prodotti di bassa qualità come gli oli combustibili, i lubrificanti e gli asfalti.

Taglio	Distillato a p_{atm}	Densità [kg/dm^3]	Temp. eboll. a p_{atm}
Frazione gassosa	gassoso		< 60 °C
Benzine	leggero	0,70 ÷ 0,78	40 ÷ 200 °C
Cherosene	leggero-medio	0,78 ÷ 0,84	170 ÷ 280 °C
Gasolio	medio	0,82 ÷ 0,90	210 ÷ 360 °C
Residuo	---	0,92 ÷ 0,99	solo sotto vuoto

Figura 2.1- Frazioni petrolifere ottenute dal processo di distillazione [5]

2.2 – I combustibili alternativi

A causa dell'elevato tenore di zolfo, elemento altamente nocivo per l'ambiente, di altre sostanze pesanti quali il piombo e dei prodotti di combustione come l'anidride carbonica (CO₂), il monossido di carbonio (CO), gli ossidi di azoto (NO_x) ed i prodotti incombusti (HC), caratterizzanti i combustibili fossili, la normativa Europea spinge i costruttori a guardare verso combustibili alternativi i quali come affermato da G. De Simone [6]:

- Sono di origine vegetale, contribuiscono quindi con un bilancio sostanzialmente in pareggio alle emissioni di CO₂
- Grazie all'elevato tenore di ossigeno riducono le emissioni di CO
- Non contengono zolfo e piombo
- Non generano emissioni evaporative
- Sono biodegradabili e difficilmente auto-infiammabili
- Possiedono buone proprietà chimico fisiche in termini di potere calorifico, potere antidetonante e punto di volatilizzazione.

[5] Arteconi Alessia, corso "Energetica" capitolo 15, università Ecampus. 2014

[6] G. De Simone – "Progetto di motori alimentati a gas naturale a carica parzialmente stratificata", 2008

2.2.1 Il gas di petrolio liquefatto (GPL)

Il gpl è una miscela di idrocarburi alcani a basso peso molecolare, composta principalmente da propano e butano. Un aspetto molto interessante dell'impiego di questo carburante per l'autotrazione, è costituito dal fatto che le emissioni inquinanti sono generalmente inferiori in quantità ed ancor più ridotte in pericolosità rispetto a quelle degli stessi motori alimentati a benzina, per effetto della migliore carburazione ottenibile con un combustibile gassoso e per l'assenza di additivi. L'utilizzo del GPL rende inoltre più efficienti le marmitte catalitiche e ne aumenta la durata per l'assenza assoluta di inquinanti in grado di danneggiare ed avvelenare il catalizzatore, come i prodotti incombusti e lo zolfo. [6]

2.2.2 Il gas naturale

Il gas naturale, comunemente chiamato gas Metano in quanto composto principalmente dall'idrocarburo CH₄ (98,6%) e in misura minore da Etano, Propano, Azoto, Anidride Carbonica, Idrogeno solforato ed altri idrocarburi tra cui il Butano [5], è un gas inodore, incolore e non tossico, che generalmente, come affermato da Arteconi, presenta caratteristiche di purezza tali da farlo considerare il meno inquinante tra i combustibili fossili. Questa caratteristica lo rende un buon carburante, che può essere convenientemente utilizzato nei MCI comportando vantaggi sia dal punto di vista prestazionale sia emissivo.

Tra i vantaggi ricordiamo:

- La fase gassosa permette un ottimo miscelamento con l'aria comburente apportando benefici in fase di combustione.
- Presenta un elevato potere antidetonante che permette di raggiungere rapporti di compressione più elevati.
- Elevata disponibilità in natura
- Minore impatto ambientale se paragonato ai combustibili tradizionali, come dimostrato da uno studio realizzato nel 2007 dall'EMPA (Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca) [6]
- Elevato punto di autoaccensione, che ne riduce il pericolo d'incendio

[6] G. De Simone – "Progetto di motori alimentati a gas naturale a carica parzialmente stratificata", 2008

[5] Arteconi Alessia, corso "Energetica" capitolo 16, università Ecampus. 2014

Nonostante i numerosi vantaggi risulta utile ricordare:

- La difficoltà di trasporto allo stato liquido, dati i valori molto bassi del punto di ebollizione a pressione atmosferica (-161.5°C) e della temperatura critica (-82.6°C).
- Minore potenza erogata a parità di cilindrata rispetto a un motore benzina vista la difficoltà di riempimento del cilindro a causa della fase gassosa.
- La mancanza di una rete di distribuzione efficiente sul territorio.

2.2.3 I biocombustibili: Il biodiesel e il bioetanolo

Il biodiesel è un combustibile naturale che può essere utilizzato come carburante nel settore dell'autotrazione. E' inoltre un prodotto rinnovabile, in quanto ottenuto dalla coltivazione di piante oleaginose. E' biodegradabile, quindi anche se disperso in ambiente non risulta inquinante poiché si dissolve nell'arco di pochi giorni. Infine, garantisce un rendimento energetico pari a quello dei carburanti e combustibili minerali.

Il bioetanolo è invece un alcool ottenuto mediante un processo di fermentazione di diversi prodotti agricoli ricchi di carboidrati e zuccheri (ad esempio cereali, bietola, canna da zucchero, frutta, vinacce.) La funzione più interessante del bioetanolo è quella di aumentare il numero di ottani della benzina senza dover ricorrere agli additivi tradizionali a base di piombo. Inoltre, se miscelato alla benzina ne aumenta l'efficienza di combustione.

Questi combustibili di origine naturale presentano quindi come punti di forza:

- Contributo nullo alle emissioni di CO₂ e gas serra
- Biodegradabilità e rinnovabilità
- Non contengono piombo e zolfo

Per contro presentano:

- Elevati costi di produzione, parzialmente attenuati dalle agevolazioni fiscali che i produttori ricevono in quanto questi prodotti vengono considerati fonti di energia rinnovabile
- Sottrazione di terreno agricolo ed elevati costi d'investimento.

Proprietà	Biodiesel da olio di girasole	Biodiesel da olio di colza	Gasolio
Densità a 15 °C [kg/m ³]	880	880	840
Numero di cetano	45-51	52-56	51
Punto d'infiammabilità (°C)	118	118	64
Viscosità a 20 °C [m ² /s]	8,3·10 ⁻⁶	7,5·10 ⁻⁶	5,1·10 ⁻⁶
Viscosità a 50 °C [m ² /s]	4,2·10 ⁻⁶	3,8·10 ⁻⁶	2,6·10 ⁻⁶
Potere calorifico superiore [MJ/kg]	37	38	43
Residuo di Carbonio [%]	0,05	0,02	0,15
Zolfo [%]	0,01	0,002	0,29

Figura 2.2 – Proprietà caratteristiche del biodiesel e del gasolio tradizionale [5]

2.2.4 L'idrogeno

L'idrogeno può essere considerato un valido sostituto dei carburanti tradizionali in quanto, se utilizzato all'interno dei mci presenta allo scarico, successivamente al processo di combustione, vapore acqueo piuttosto che CO₂ ed altri inquinanti.

Questo notevole vantaggio, ci porta a definire l'idrogeno come una fonte di energia pulita, ma questo risulta veritiero solamente nel caso in cui l'idrogeno venga ricavato attraverso l'elettrolisi dell'acqua. Infatti più che come combustibile risulta corretto definire l'idrogeno come un vettore energetico, in quanto esso non è direttamente presente in natura.

Di contro a questo notevole vantaggio bisogna però tenere conto di diversi svantaggi.

Tra i principali svantaggi come affermato nell'articolo "Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines" di Sebastian Verhelst e Thomas Wallner, troviamo:

- Bassa densità di energia per unità di volume
- Elevato campo di infiammabilità, che allarga il suo campo all'aumentare della pressione e della temperatura dell'idrogeno.
- Una veloce propagazione del fronte di fiamma.

- Instabilità del fronte di fiamma, con conseguente combustione incompleta.
[7]

Questa serie di caratteristiche proprie dell'idrogeno insieme a problemi legati alla sicurezza, alla difficoltà di stoccaggio del gas, al trasporto dello stesso sul veicolo e ad una scarsa rete di distribuzione limitano la sua diffusione nel settore motoristico.

CAPITOLO 3

Le emissioni inquinanti nei motori a combustione interna:

La legislazione italiana, mediante il decreto del presidente della repubblica, DPR 24 MAGGIO 1988-n.203, fornisce la seguente definizione di inquinamento atmosferico: "costituisce inquinamento atmosferico ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e caratteristiche tali da; alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; da alterare le risorse biologiche, gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati"

I motori a combustione interna, come affermato da Ferrari nel testo "Motori a combustione interna", hanno un ruolo da protagonista a livello di inquinamento ambientale. Infatti la maggior parte dell'energia utilizzata dalla società industriale viene attualmente prodotta bruciando combustibili fossili in impianti termici, alla cui famiglia appartengono anche i motori a combustione interna. [8]

Essi aspirano aria dall'atmosfera per dare vita al processo di combustione ed essendo il processo incompleto, il motore restituisce all'ambiente gas di scarico contenenti prodotti incombusti e sostanze inquinanti, che alterano l'equilibrio naturale.

Si ritiene quindi ora opportuno elencare i principali elementi inquinanti prodotti dai mci, descrivendone la composizione, il processo di formazione e gli effetti nocivi che essi hanno sull'ambiente e sul corpo umano.

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

3.1 Sostanze inquinanti principali: composizione, formazione ed effetti

Analizziamo ora i principali inquinanti atmosferici attualmente regolamentati, ovvero monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), idrocarburi incombusti (HC), particolato.

3.1.1 Monossido di carbonio (CO)

Il monossido di carbonio è un gas velenoso, incolore e inodore, quindi difficilmente identificabile.

Esso, come affermato dall'ingegnere Di Veroli nel corso "Interazione macchine ambiente" della facoltà di ingegneria industriale curriculum energetico, è un inquinante prodotto da tutti i processi di combustione alimentati con idrocarburi. La combustione incompleta in difetto d'aria, e quindi d'ossigeno, non permette la completa ossidazione del carbonio, dando così vita ad un prodotto intermedio alla formazione di CO₂.

L'ossidazione della CO a CO₂ è infatti una reazione più lenta rispetto alla reazione iniziale durante la quale il carbonio C si trasforma in monossido di carbonio CO, inoltre affinché avvenga la trasformazione da CO a CO₂ è necessario che all'interno dei gas combusti vi sia una quantità sufficiente di ossigeno ed una temperatura adeguata per dare vita al processo di ossidazione della CO. Talvolta quindi la formazione di CO si riscontra anche in quelle zone della combustione dove la miscela non raggiunge una temperatura adeguatamente elevata in quanto essa non viene raggiunta dal fronte di fiamma[9]

[9] Mario Di Veroli, corso "Interazione macchine ambiente" capitolo 14, università Ecampus.

Il processo di formazione viene così schematizzato:

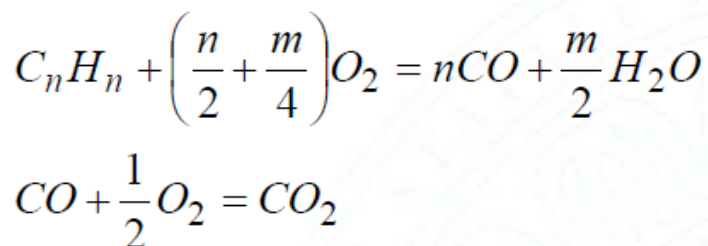


Figura 3.1 – Reazione di ossidazione del carbonio in anidride carbonica [9]

Infine per quanto riguarda gli effetti nocivi del monossido di carbonio si evidenzia come questo gas influisca in maniera negativa sia sull'uomo che sulla vegetazione.

Infatti a causa dell'elevata affinità con l'emoglobina in base alla quantità presente nel sangue si riscontrano i seguenti effetti:

COHb nel sangue [%]	CO nell'aria (ppm)	Effetti riscontrabili sull'uomo
< 1	<3	Nessun effetto apparente
1-2	3-10	Effetti osservabili sul comportamento
2-5	10-30	Alterazione dei riflessi, della capacità visiva e delle funzioni psicomotorie
5-10	30-60	Alterazioni del ritmo cardiaco e polmonare
10-30	60-200	Emicrania, affaticamento e sonnolenza
>30	>200	Difficoltà respiratorie, come, morte

Figura 3.2 – Effetti nocivi della CO per l'uomo [9]

Da notare come elevate quantità di monossido di carbonio nell'aria possano avere anche effetti letali.

3.1.2 Ossidi di azoto (NOx)

Con il termine NOx vengono indicati genericamente l'insieme dei due più importanti ossidi di azoto a livello d'inquinamento atmosferico ossia l'ossido di

azoto, NO, incolore inodore e insapore, e il biossido di azoto, NO₂, gas bruno di odore acre e pungente, ma entrambi tossici.

Gli NO_x come afferma Di Veroli sono prodotti principalmente dai veicoli (50% circa) e da processi di combustione (40% circa) [9].

Gli ossidi di azoto si formano ad elevata temperatura, orientativamente oltre i 1200°C – 1300°C, per ossidazione dell'azoto contenuto nell'aria o nel combustibile. Le reazioni che danno vita agli NO_x sono le seguenti:

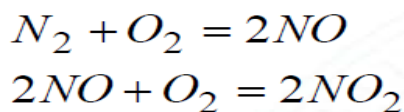


Figura 3.3 – Reazione di formazione degli ossidi di azoto [9]

I meccanismi per i quali si ha una formazione di NO_x durante il processo di combustione sono sostanzialmente tre:

- *Thermal NO_x* derivati direttamente dall'ossidazione dell'azoto presente nell'aria con combustibili liquidi o gassosi.
- *Prompt NO_x* prodotto in maniera veloce a seguito di reazioni tra l'azoto, l'aria ed i radicali liberi che si formano in corrispondenza del fronte di fiamma
- *Fuel NO_x* prodotto per ossidazione dell'azoto presente nei combustibili solidi.

Come nel caso del monossido di carbonio anche gli ossidi di azoto comportano degli effetti nocivi per l'ambiente. Infatti, come riportato dal sito dell'arpa dell'Emilia Romagna i maggiori effetti diretti sull'ambiente degli ossidi di azoto sono dovuti alla loro ricaduta sotto forma di acido nitrico che creano zone di aggressione puntiformi ad elevata concentrazione.

Esperimenti condotti dall'agenzia regionale per la protezione ambientale hanno portato a verificare che 1 ppm di NO₂ per 24 ore di esposizione crea necrosi sulle

[9] Mario Di Veroli, corso "Interazione macchine ambiente" capitolo 14, università Ecampus.

foglie della vegetazione, mentre 10 ppm sempre per 24 ore debilitano la fotosintesi clorofilliana [10].

Sull'uomo è invece stato riscontrato che l'NO₂ è quattro volte più pericoloso dell'NO ma vista la facilità del loro interscambio sono entrambi considerati molto pericolosi, in quanto anche esposizioni a bassi tassi di ossidi di azoto ma per periodi prolungati risultano nocive per l'organismo umano.

Principali effetti sull'uomo			Con. Troposferica Media
presenza avvertibile	0.12	ppm	trascurabile
irritazioni delle mucose e degli occhi	15	ppm	
problemi di respirazione edemi polmonari	100	ppm	

Figura 3.4 – Tabella effetti nocivi degli NO_x tratta dal sito dell'arpa [10].

3.1.3 Ossidi di zolfo (SO_x)

Proseguendo con l'analisi delle sostanze inquinanti, l'ingegnere Di Veroli riporta sempre nel corso di "Interazione macchine ambiente" che i composti dello zolfo di interesse al fine dell'inquinamento sono:

- Ossidi di zolfo: anidride solforosa SO₂, e anidride solforica SO₃
- Acido solforoso H₂SO₃ e acido solforico H₂SO₄
- Solfati e solfiti CaSO₃, CaSO₄, COS [9]

Egli inoltre afferma che circa l'85% degli SO_x derivano dagli impianti termoelettrici per la produzione di energia, mentre gli impianti civili e i mezzi di trasporto contribuiscono per un 2-3% alle emissioni.

Il processo che porta alla formazione degli SO_x è regolato dalle seguenti formule chimiche:

[9] Mario Di Veroli, corso "Interazione macchine ambiente" capitolo 14, università Ecampus.

[10] Arpa Emilia Romagna (https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/aria/ossidi_azoto.pdf)

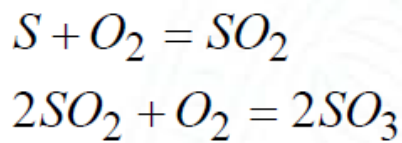


Figura 3.5 – Reazioni di ossidazione dello zolfo [9]

Durante la combustione, infatti, lo zolfo si ossida per formare anidride solforosa e anidride solforica. Nella prima reazione i reagenti, reagiscono tra di loro molto velocemente mentre la seconda reazione è generalmente molto lenta.

Se disperse in ambiente queste sostanze risultano essere pericolose in quanto, in presenza di atmosfera secca, elevata insolazione, presenza di idrocarburi incombusti e ossidi di azoto, che fungono da catalizzatori, l'SO₂ presente in atmosfera diviene SO₃. [9]

A sua volta l'SO₃ è molto reattiva e in condizioni di elevata umidità si combina con l'acqua presente in atmosfera trasformandosi in acido solforico.

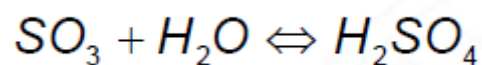


Figura 3.6 – Reazione di formazione dell'acido solforico [9]

In conclusione quindi i composti dello zolfo possono depositarsi in ambiente sotto due principali forme: secca o umida.

La deposizione secca riguarda essenzialmente gli SO_x che si sono trasformati in solfati, mentre la deposizione umida riguarda le piogge acide.

Entrambe le deposizioni possono arrecare danni sia agli oggetti, sia alla vegetazione, sia all'uomo.

Gli oggetti intaccati dagli ossidi di zolfo uniti all'azione dell'umidità si corrodono in maniera molto veloce, le piante rischiano danneggiamenti e necrosi del fogliame a causa delle piogge acide e l'uomo se esposto a concentrazioni

[9] Mario Di Veroli, corso "Interazione macchine ambiente" capitolo 14, università Ecampus.

maggiori a 0.2-0.3 ppm può soffrire di aumento del battito cardiaco e di difficoltà respiratorie, che talvolta, possono degenerare in patologie come asma, bronchite e tracheite.

Principali effetti sull'uomo			Conc. Troposferica Media
livello di soglia di presenza avvertibile	0.3	ppm	0.2 ppb
primi effetti sanitari	1.0	ppm	
fenomeni di broncocostrizione	1.6	ppm	
Principali effetti sulla vegetazione			
livello di soglia inizio danni	0.15	ppm	
livello danni cronici vegetazione sensibile	0.3	ppm	
livello di necrosi	1-2	ppm	

Figura 3.7 – Valori indicativi degli effetti dell'SO₂ sull'uomo e vegetazione [10]

3.1.4 Idrocarburi incombusti (HC)

Gli idrocarburi incombusti sono costituiti da una miscela di composti organici volatili tra i quali molti sono tossici come, ad esempio, il benzene. Essi inoltre contribuiscono anche alla formazione dello smog e dell'ozono, un gas tossico di colore bluastro, che produce un inquinamento di tipo fotochimico aumentando l'effetto serra su scala globale. [11]

Gli HC come riportato da G. Ferrari, hanno origine all'interno dei cilindri dei motori a combustione interna. Durante la fase di compressione, a causa della pressione crescente nel cilindro, parte della carica fresca è forzata ad entrare nei piccoli interstizi che vi sono tra il pistone, il cilindro, le fasce elastiche e le guarnizioni. All'interno di questi interstizi la carica fresca non può essere raggiunta dal fronte di fiamma, di conseguenza essa insieme all'eventuale strato di lubrificante, che ne assorbe gli idrocarburi, si deposita sulle pareti del cilindro.

Durante la combustione il fronte di fiamma si spegne in prossimità delle pareti per effetto del raffreddamento da esse prodotto lasciando quindi uno strato particolarmente ricco di idrocarburi incombusti o parzialmente ossidati.

[10] Arpa Emilia Romagna (https://www.arpae.it/cms3/documenti/cerca_doc/aria/ossidi_zolfo.pdf)

[11] Arpa Lombardia (http://www2.arpalombardia.it/qariafiles/varie/Full_Executive_Summary-final.pdf)

Durante la fase di scarico, il pistone in discesa, raschia lo strato di idrocarburi incombusti depositatosi sulle pareti del cilindro; gli HC sono rigettati dagli interstizi in cui erano stati compressi e insieme ai gas di scarico vengono espulsi in ambiente. [8]

Una volta in ambiente gli idrocarburi incombusti possono recare danno sia alla vegetazione che all'uomo, provocando irritazioni dell'apparato respiratorio e/o avendo effetti cancerogeni.

3.1.5 Particolato

Per particolato atmosferico, come riportato dal ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, si intende l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide con diametro compreso tra 0.1 e 100 micron.

Il particolato risulta composto dagli elementi riportati nel grafico sottostante:

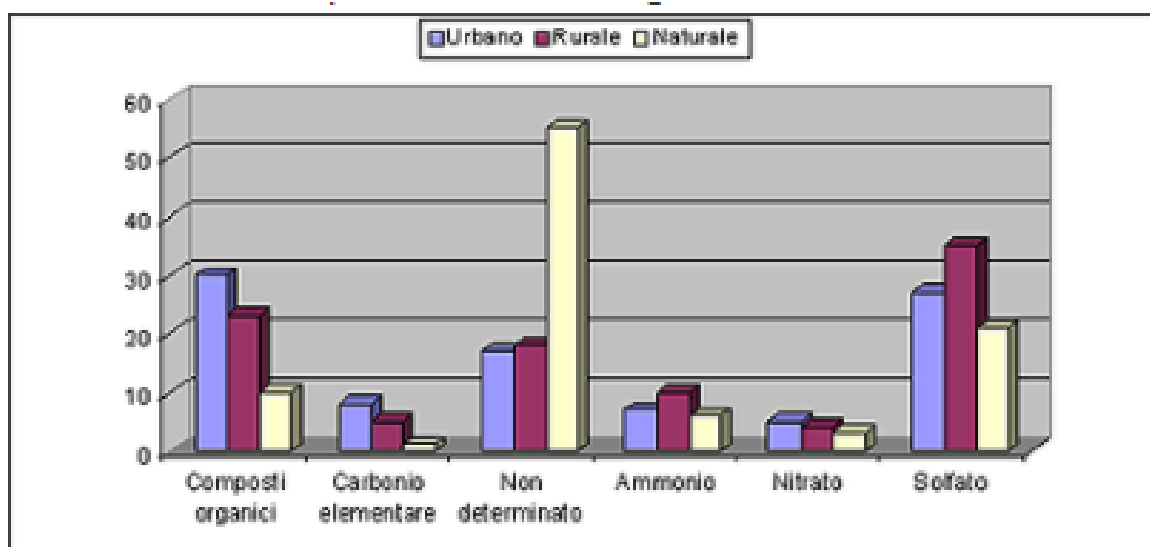


Figura 3.8 – Composizione del materiale particolato [12]

Le particelle in base alle loro dimensioni e peso, oltre che alle condizioni meteorologiche, hanno differenti tempi di permanenza in sospensione nell'aria.

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

[12] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (<http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>)

Mentre le particelle più grosse hanno un breve periodo di permanenza in aria, quelle più piccole possono precipitare solamente dopo urti casuali con altre particelle che ne favoriscono l'agglomerazione e quindi un aumento di dimensioni.

Il particolato si può originare sia da fonti antropiche che da fonti naturali ed entrambi le fonti possono dar luogo a particolato primario oppure secondario, come possiamo notare dalle tabelle estratte dal sito del ministero dell'ambiente.

[12]

Sorgenti naturali	
Primario	Secondario
Spray marino	Ossidazione di SO ₂ e H ₂ S emessi da incendi e vulcani
Erosione di rocce	Ossidazione di NO _x prodotto da suolo e luce
Incendi boschivi	Emissione di NH ₃ da animali selvatici
--	Ossidazione di idrocarburi emessi dalla vegetazione (terpeni)

Sorgenti antropiche	
Primario	Secondario
Uso di combustibili fossili	Ossidazione di SO ₂
Emissioni di autoveicoli	Ossidazione di NO _x
Polveri volatili	N ₂ O ₃
Usura di pneumatici e freni	Ossidazione di idrocarburi emessi dagli autoveicoli

Figura 3.8 – Tipologie di particolato [12]

Esistono inoltre vari modi per classificare il particolato ma generalmente lo si classifica in base a:

- Dimensioni
- Taglio
- Dosimetria

In base alle dimensioni avremo: le particelle più piccole, inferiori a 0.1 micron, derivanti da combustioni e trasformazioni gas-particella. Le particelle medie, di dimensioni comprese tra 0.1 e 1 micron, derivanti dalla coagulazione di particelle più piccole.

[12] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (<http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>)

Le particelle grandi, con diametro aerodinamico compreso tra 2 e 100 micron. Se si attua una classificazione meno rigorosa, sempre in base alle dimensioni, possiamo differenziare il particolato fine, con diametro compreso tra 1 e 3 micron, da quello grossolano con dimensioni superiori.

La classificazione rispetto al taglio si basa sui sistemi di prelievo, intendendo per PM_x la frazione di particelle prelevata mediante un sistema di separazione inerziale la cui efficienza di campionamento, per le particelle con diametro minore di x micron, è uguale al 50 %. In tal modo si considera il PM_{2,5} come frazione fine e l'intervallo PM₁₀ - PM_{2,5} come frazione grossolana.

Infine la classificazione per dosimetria si basa sulla capacità del particolato di penetrare nell'apparato respiratorio e suddivide il particolato in frazione inalabile, capace di entrare nelle vie respiratorie, frazione toracica, capace di raggiungere i polmoni e frazione respirabile, capace di raggiungere gli alveoli polmonari.

Vista quindi la capacità del particolato di intaccare così in profondità l'organismo umano, lo si può considerare come uno degli elementi inquinanti più pericolosi.

Esso oltre a provocare aggravamenti di malattie asmatiche, provoca tosse e convulsioni, ed ha effetti tossici sui bronchi e gli alveoli polmonari. Provoca inoltre, incrostamenti sulle foglie delle piante che interferiscono con il processo di fotosintesi, danneggiamento di circuiti elettrici, corrosione dei metalli, insudiciamento di edifici e opere d'arte. Infine facilita la formazione di nebbie e diffonde la luce solare diminuendo la quantità di luce che raggiunge la superficie terrestre. [12]

[12] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (<http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>)

CAPITOLO 4

Normativa e tecnologie per la riduzione degli inquinati:

Vista l'elevata quantità di sostanze tossiche ed inquinanti emesse in ambiente da impianti di produzione energetica, industrie, mezzi di trasporto, motori a combustione interna ed altre fonti, si è deciso durante il corso degli anni di introdurre delle normative che limitassero queste emissioni inquinanti e di sviluppare delle tecnologie che potessero limitarle laddove ce ne fosse la necessità.

4.1 La normativa europea

Anche a livello europeo sono stati attivati diversi strumenti normativi al fine di migliorare la qualità dell'aria. Alcuni di essi regolano le emissioni da specifiche sorgenti per esempio stabilendo requisiti sulla qualità dei combustibili, come il contenuto di zolfo. Altri invece impongono limiti massimi di emissione come nel caso della direttiva 2004/107/CE e della direttiva 2008/50/CE, la quale stabilisce i limiti per le concentrazioni in aria ambiente dei principali inquinanti atmosferici, quali il biossido di zolfo SO₂, il biossido di azoto NO₂, gli ossidi di azoto NO_x, il materiale particolato PM₁₀ e PM_{2.5}, il piombo Pb, il benzene, il monossido di carbonio CO ed ozono O₃, stabilendo per i paesi membri l'obbligo di predisporre ed implementare piani della qualità dell'aria nelle zone e negli agglomerati dove vengano registrati superamenti di uno o più dei suddetti valori limite. [13]

Analogamente la direttiva 2004/107/CE prevede i valori obiettivo per arsenico, cadmio, nickel e benzo(a)pirene, sostanza utilizzata come marker per il rischio cancerogeno degli idrocarburi policiclici aromatici. [13]

Sempre con lo scopo di tutelare l'individuo umano, la sua salute e l'ambiente a partire dagli anni '70 la commissione europea ha dato origine ai programmi di azione per l'ambiente PAA. L'ultimo dei sei programmi: "*Ambiente 2010: il nostro futuro, la nostra scelta*" ha individuato una serie di obiettivi da perseguire nel decennio 2002-2012, tra i quali quello di "raggiungere livelli di qualità dell'aria

[13] ISPRA "Trasporti: strumenti europei e nazionali per il risanamento della qualità dell'aria" Autori: Mariacarmela Cusano e Antonella De Santis – Dicembre 2013

che non comportino rischi o impatti negativi significativi per la salute umana e per l'ambiente" [13].

Attualmente come riportato nell'articolo di Cusano, De Santis la commissione europea sta valutando l'efficacia delle politiche per la lotta all'inquinamento atmosferico messe in atto fino ad ora, in modo da poter pianificare quelle future e sviluppare una strategia aggiornata che miri oltre all'anno 2020. Il 29 novembre 2012 è stata infatti presentata una proposta di programma d'azione per l'ambiente, attraverso il comunicato stampa di Bruxelles, basata sui risultati ottenuti in quarant'anni di politica ambientale dell'unione europea.

4.2 I motori e il settore dei trasporti

Cusano e De Santis nel loro articolo del 2013 affermano che una delle principali sorgenti dell'inquinamento atmosferico in Europa è il settore dei trasporti al quale sono strettamente legati i motori a combustione interna. A livello europeo i valori limite alle emissioni tossiche prodotte dai veicoli stradali furono decretati per la prima volta con le direttive 70/220/CEE, inerente i veicoli leggeri come autovetture e veicoli commerciali leggeri, e 88/77/CEE, inerente i veicoli pesanti come autocarri e bus. Successivamente la necessità di rientrare in parametri di valutazione più stringenti, portò a nuovi decreti e normative, fino a raggiungere le ultime disposizioni dettate dal regolamento CE n. 715/2007 a sua volta convertito nel regolamento UE n. 459/2012, con cui sono stati introdotti i limiti di emissione per i veicoli leggeri, denominati EURO 5 e 6, in vigore rispettivamente dal gennaio 2010 e dal gennaio 2016, e nel regolamento CE n.595/2009 inerente a limiti di emissione per i veicoli pesanti denominati EURO VI. [13]

Grazie quindi a regolamenti sempre più selettivi e all'attuazione di politiche mirate, negli ultimi dieci anni in Europa si sono osservate rilevanti riduzioni delle emissioni inquinanti primarie, ossia emesse tali quali dalla sorgente. Un po' più complessa risulta la diminuzione degli inquinanti secondari, ovvero quelle sostanze che si formano in seguito a reazioni chimiche che avvengono in atmosfera

[13] ISPRA "Trasporti: strumenti europei e nazionali per il risanamento della qualità dell'aria" Autori: Mariacarmela Cusano e Antonella De Santis – Dicembre 2013

coinvolgendo altri inquinanti emessi da sorgenti diverse rispetto a quelle normate o in alcuni casi da sorgenti di origine naturale.

In supporto all'affermazione sopra riportata in merito alla diminuzione degli inquinanti emessi in atmosfera si riportano le tabelle ISPRA di alcuni elementi che analizzano l'evoluzione dello scenario dagli anni '90 fino al 2012.

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	24.238	20.542	9.961	4.119	2.173	1.978	1.680	1.360	1.234
Veicoli Lri P < 3.5 t	816	484	400	292	186	171	176	143	126
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	24	21	17	11	8	8	7	7	6
Ciclomotori e motocicli	8.556	6.533	2.917	1.919	1.161	880	808	787	753
Motori a benzina emissioni evaporative	2.252	1.332	497	288	237	217	186	196	221
Ferrovie	13	13	11	9	6	6	6	4	1
Vie di navigazione interne	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Attività marittime	3.601	2.418	1.351	927	829	723	639	555	433
Aeroporti (LTO)	10	11	17	52	36	34	35	35	34
TOTALE	39.512	31.356	14.989	7.620	4.639	4.019	3.538	3.090	2.810
Fonte: ISPRA									
Nota:									
La serie storica è stata ricalcolata a partire dal 2005, dal 2000 per le emissioni evaporative									

Figura 4.1 – Emissioni di benzene dal settore di trasporti, per modalità di trasporto [14]

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	25.300	20.800	18.513	10.691	10.099	9.282	9.080	8.267	6.655
Veicoli Lri P < 3.5 t	10.781	13.777	15.983	8.996	7.166	6.433	6.703	5.594	4.463
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	17.638	16.475	13.057	7.850	5.943	5.588	5.105	5.132	4.192
Ciclomotori e motocicli	3.643	4.862	4.841	2.926	2.289	1.823	1.752	1.691	1.370
Ferrovie	646	624	558	444	321	275	289	206	64
Vie di navigazione interne	89	102	90	111	98	99	-	-	-
Attività marittime	9.318	9.423	9.746	7.028	6.142	5.967	6.592	6.177	6.405
Aeroporti (LTO)	72	77	123	18	17	16	16	17	16
Pneumatici, freni e manto stradale				9.742	9.729	9.503	9.480	9.510	8.589
TOTALE	67.487	66.140	62.912	47.805	41.801	38.985	39.017	36.593	31.753
Fonte: ISPRA									
Nota:									
A partire dal 2005 la serie storica è stata ricalcolata, e le emissioni da usura di pneumatici, freni e manto stradale sono state considerate separatamente									

Figura 4.2 – Emissioni di PM10 dal settore di trasporti, per modalità di trasporto [14]

[14] ISPRA "Annuario dei dati ambientali" capitolo 4: trasporti. Autori: Mario Contaldi, Francesca Rizzitiello, Paola Sestili. Anno 2014-2015

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	23.215	18.343	15.978	10.691	10.099	9.282	9.080	8.267	6.655
Veicoli Lri P < 3.5 t	10.435	13.345	15.349	8.996	7.166	6.433	6.703	5.594	4.463
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	16.753	15.541	12.217	7.850	5.943	5.588	5.105	5.132	4.192
Ciclomotori e motocicli	3.513	4.697	4.651	2.926	2.289	1.823	1.752	1.691	1.370
Ferrovie	646	624	558	444	321	275	289	64	206
Vie di navigazione interne	89	102	90	111	98	99	-	-	-
Attività marittime	9.318	9.423	9.746	6.994	6.110	5.935	6.558	6.145	6.371
Aeroporti (LTO)	72	77	123	18	17	16	16	16	16
Pneumatici, freni e manto stradale				5.335	5.342	5.220	5.208	5.224	4.717
TOTALE	64.041	62.152	58.712	43.364	37.383	34.670	34.712	32.132	27.989
Fonte: ISPRA									
Nota:									
A partire dal 2005 la serie storica è stata ricalcolata, e le emissioni da usura di pneumatici, freni e manto stradale sono state considerate separatamente									

Figura 4.3 – Emissioni di PM2.5 dal settore trasporti, per modalità di trasporto [14]

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	64.242	27.216	5.226	1.375	890	251	247	248	216
Veicoli Lri P < 3.5 t	16.023	12.605	2.594	400	309	77	83	76	70
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	48.623	30.983	3.996	584	426	106	100	105	97
Ciclomotori e motocicli	2.273	836	171	66	31	13	10	11	10
Ferrovie	846	545	69	7,3	3,9	0,9	0,9	0,7	0,2
Vie di navigazione interne	119	91	11	1,9	1,2	0,3	0,3	-	-
Attività marittime	79.018	71.121	87.164	49.746	38.820	37.707	28.378	26.536	27.722
Aeroporti (LTO)	508	543	871	345	376	354	366	371	157
TOTALE	211.651	143.940	100.102	52.525	40.857	38.508	29.186	27.348	28.272
Fonte: ISPRA									
Nota:									
La serie storica è stata ricalcolata a partire dal 2005									

Figura 4.4 – Emissioni di ossidi di zolfo dal settore trasporti, per modalità di trasporto [14]

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	506.314	553.910	353.566	253.983	213.049	196.950	191.046	190.969	168.440
Veicoli Lri P < 3.5 t	64.898	68.408	85.963	81.131	76.562	73.075	77.715	69.056	61.148
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	353.954	333.708	298.649	269.930	233.409	225.510	207.912	211.590	184.580
Ciclomotori e motocicli	2.873	3.352	4.757	7.536	6.972	6.238	6.366	6.780	6.506
Ferrovie	5.584	5.397	4.821	3.841	2.772	2.376	2.495	1.782	554
Vie di navigazione interne	841	966	859	1.052	927	940	-	-	-
Attività marittime	77.835	73.228	87.536	103.518	93.664	91.406	87.007	86.442	90.104
Aeroporti (LTO)	7.145	7.648	12.261	3.790	4.059	3.819	3.958	4.006	3.875
TOTALE	1.019.445	1.046.616	848.412	724.781	631.413	600.314	576.499	570.625	515.208
Fonte: ISPRA									
Nota:									
La serie storica è stata ricalcolata a partire dal 2005									

Figura 4.5 – Emissioni di ossidi di azoto dal settore trasporti, per modalità di trasporto [14]

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	452.034	461.530	260.711	119.422	60.997	52.232	45.684	38.502	33.822
Veicoli Lri P < 3.5 t	16.680	13.261	13.730	10.946	8.020	7.416	7.744	6.436	5.597
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	33.788	30.223	23.710	16.395	12.028	11.316	10.348	10.387	8.237
Ciclomotori e motocicli	244.931	328.367	305.064	188.743	109.678	88.572	85.900	83.473	69.597
Motori a benzina emissioni evaporative	168.965	174.959	136.597	79.220	62.850	61.730	55.757	58.937	58.937
Ferrovie	656	634	566	451	326	279	293	209	65
Vie di navigazione interne	93	107	95	117	103	104	86	86	-
Attività marittime	111.439	122.630	121.879	90.467	79.257	72.898	62.942	53.841	36.004
Aeroporti (LTO)	468	501	803	2.447	1.675	1.575	1.628	1.649	1.603
TOTALE	1.029.054	1.132.212	812.518	508.208	334.934	296.122	270.381	253.519	213.860
Fonte: ISPRA									
Nota:									
La serie storica è stata ricalcolata a partire dal 2005, per le emissioni evaporative è stata ricalcolata dal 2000									

Figura 4.6 – Emissioni di composti organici volatili non metanici dal settore dei trasporti, per modalità di trasporto [14]

[14] ISPRA "Annuario dei dati ambientali" capitolo 4: trasporti. Autori: Mario Contaldi, Francesca Rizzitiello, Paola Sestili. Anno 2014-2015

Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2005	2008	2009	2010	2011	2012
	t								
Automobili	3.437,65	1.446,25	611,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Veicoli Lri P < 3.5 t	160,76	44,92	16,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Veicoli pesanti P > 3.5 t e autobus	64,54	30,55	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ciclomotori e motocicli	216,55	95,51	50,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ferrovie	0,96	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vie di navigazione interne	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Attività marittime	54,45	19,85	9,48	0,16	0,13	0,13	0,15	0,14	0,14
Aeroporti (LTO)	0,82	0,88	1,41	0,85	0,93	0,87	0,90	0,91	0,88
Pneumatici, freni e manto stradale				12,38	12,26	11,96	12,12	12,22	10,89
TOTALE	3.935,74	1.638,43	689,19	13,38	13,32	12,96	13,17	13,27	11,92
Fonte: ISPRA									
Nota:									
A partire dal 2005 la serie storica è stata ricalcolata, e le emissioni da usura di pneumatici, freni e manto stradale sono state considerate separatamente									

Figura 4.7 – Emissioni di piombo dal settore dei trasporti, per modalità di trasporto [14]

In conclusione, analizzando i dati in tabella e in base a quanto riportato nel quarto capitolo dell' "Annuario dei dati ambientali" di Contaldi, Rizzitiello e Sestili possiamo affermare che dal 1990 al 2012

- Le emissioni di benzene sono diminuite del 93%, grazie alla riduzione della percentuale contenuta nelle benzine ed alla diffusione delle marmitte catalitiche. Nonostante ciò le emissioni di questa sostanza restano ancora elevate a causa della circolazione di autovetture non dotate di marmitta catalitica, dei motoveicoli con motore a 2 tempi e al settore nautico.
- Le emissioni di particolato sono diminuite del 53% nel caso di PM10 e del 56% nel caso di PM2.5, grazie alla dotazione dei veicoli di appositi filtri.
- Le emissioni di ossidi di zolfo risultano diminuite del 86.4% durante il periodo considerato, grazie alla diminuzione dello zolfo contenuto nei combustibili e nei carburanti.
- Nel caso degli ossidi di azoto le emissioni dal 1990 al 2012 sono praticamente dimezzate, infatti, i valori riportati in tabella rappresentano una diminuzione del 50.5%

[14] ISPRA "Annuario dei dati ambientali" capitolo 4: trasporti. Autori: Mario Contaldi, Francesca Rizzitiello, Paola Sestili. Anno 2014-2015

- Le emissioni di composti organici volatili non metanici sono diminuite del 79%, di esse sono attualmente responsabili soprattutto i ciclomotori e i motocicli seguiti dalle autovetture e per finire dalle attività marittime.
- Infine la diminuzione più rilevante nelle emissioni di un inquinante si registra per le emissioni di piombo. Queste emissioni nel corso di 10 anni circa si sono praticamente annullate, grazie all'esclusione dal mercato, nel 2001, delle benzine con piombo tetraetile.

4.3 La normativa applicata ai motori a combustione interna

Cosa vuol dire che un veicolo è EURO 1,2,3,4,5 o 6?

Come viene riportato sull'articolo "Collaborative Research Project for Air Pollution Reduction in Lombardy Region" pubblicato sul sito di arpa Lombardia [11], con il termine EURO X si indicano i diversi step normativi introdotti dall'unione europea per limitare le emissioni inquinanti da traffico.

Bisogna tenere presente che esistono diverse norme in base alla categoria del veicolo, ad esempio la categoria EURO 1 dei motoveicoli non è la stessa di quella degli autoveicoli, in quanto i livelli di emissione dei due mezzi sono differenti.

La differenza tra uno step e l'altro non si limita solamente a valori numerici che indicano i livelli di emissioni massimi consentiti, che risultano essere sempre più stringenti all'aumentare del valore numero della sigla EURO, ma spesso riguarda anche la procedura di prova e la tipologia di inquinante da regolamentare. Ad esempio fino alla categoria euro 5 il controllo del particolato era limitato ai soli motori Diesel, mentre ora sono soggetti al controllo delle emissioni di particolato anche i motori con ciclo Otto.

Per quanto riguarda i veicoli pesanti, convenzionalmente per indicare il numero della normativa si utilizzano i numeri romani. Inoltre una differenza sostanziale tra la normativa per i veicoli leggeri e quella per quelli pesanti, risiede nel fatto

[11] Arpa Lombardia (http://www2.arpalombardia.it/qariafiles/varie/Full_Executive_Summary-final.pdf)

che mentre nel primo caso la prova di emissioni si effettua sull'intero veicolo, nel secondo caso la prova è limitata solamente al motore. Questa differenza deriva dal fatto che nel settore dei veicoli pesanti lo stesso motore può equipaggiare un elevato numero di tipologie di veicoli con allestimenti anche molto diversi tra di loro.

La prova di accertamento, con la quale si verifica che il veicolo e quindi il motore rispettino i limiti imposti dalla normativa, viene denominata con la dicitura "New European Driving Cycle" (NEDC). Essa consiste nella ripetizione di 4 cicli "Urban Driving Cycle" (UDC) o ECE-15 e di un ciclo "Extra Urban Driving Cycle" (EUDC).

Characteristics	Unit	ECE 15	EUDC	NEDC†
Distance	km	0.9941	6.9549	10.9314
Total time	s	195	400	1180
Idle (standing) time	s	57	39	267
Average speed (incl. stops)	km/h	18.35	62.59	33.35
Average driving speed (excl. stops)	km/h	25.93	69.36	43.10
Maximum speed	km/h	50	120	120
Average acceleration ¹	m/s ²	0.599	0.354	0.506
Maximum acceleration ¹	m/s ²	1.042	0.833	1.042
† Four repetitions of ECE 15 followed by one EUDC				
¹ Calculated using central difference method				

Figura 4.8 – Tabella riassuntiva dei parametri dei test ECE-15 EUDC e NEDC

Il test inizia a motore freddo, il veicolo viene tenuto in laboratorio condizionato ad una temperatura ambiente tra i 20 e i 30°C. Posizionato sul banco a rulli il veicolo viene lasciato in regime di minimo per 40 secondi dopo di che si procede con i cicli ECE-15. Come mostrato dalla tabella, ognuno dei 4 cicli ECE-15 ha una durata di 195 secondi, con velocità media di 18.35 km/h ed una velocità massima di 50 km/h. Il ciclo EUDC ha invece una durata di 400 secondi, velocità media pari a 62.59 km/h e velocità massima pari a 120 km/h. La prova totale si svolge per un tempo di 1180 secondi, circa 20 minuti. Durante lo svolgimento della prova, i gas di scarico vengono aspirati, insieme ad aria filtrata, da una pompa volumetrica a portata costante, che realizza così una loro diluizione variabile con le condizioni di funzionamento, per simulare l'effetto prodotto dall'atmosfera sui

gas che vi sono immessi ed evitare problemi di condensazione. Infine un loro campione viene raccolto e raffreddato fino a temperatura ambiente per essere analizzato. Dalle analisi si stabiliscono quindi le percentuali di inquinanti presenti.

[8]

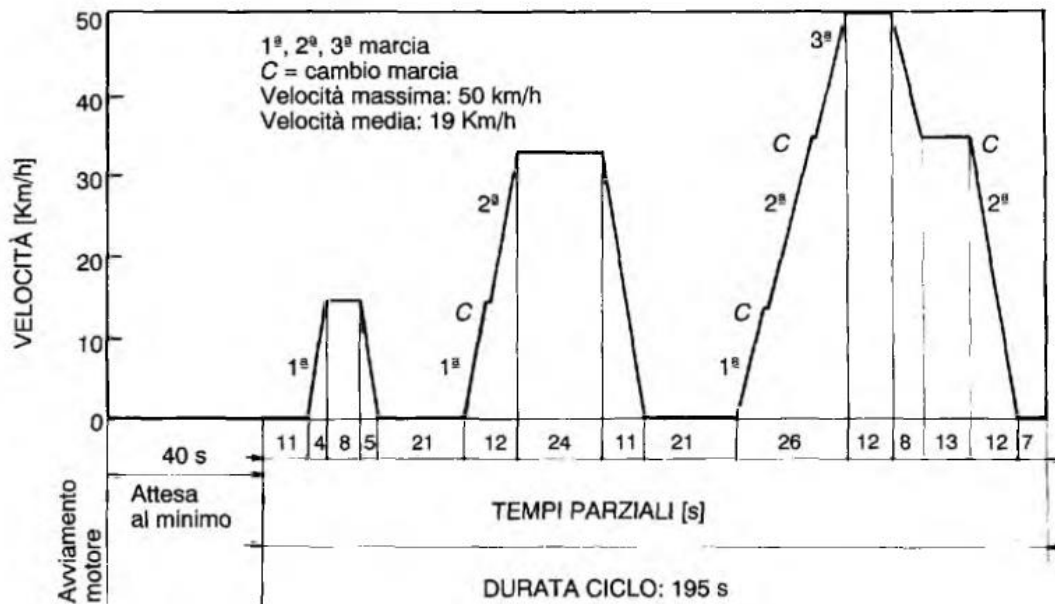


Figura 4.9 – Ciclo di prova ECE-15 previsto dalla procedura europea per simulare in laboratorio il comportamento del motore di un'autovettura in un percorso cittadino a traffico intenso. [8]

4.4 Tecnologie ed applicazione per la riduzione degli inquinanti

In seguito all'esposizione della normativa europea che regola le emissioni di sostanze inquinanti in atmosfera, vediamo ora come, grazie a sempre nuove tecnologie, organi ed equipaggiamenti, si possa nella pratica, far sì che i motori a combustione interna rispettino i limiti di emissioni imposti dalla normativa. Si vedrà quindi come intervenire sui processi di combustione e scarico, come e quali

parametri motoristici modificare e quali soluzioni costruttive adottare al fine di ridurre le principali sostanze inquinanti.

Come evidenziato da Giancarlo Ferrari, le cause che portano alla formazione degli inquinanti sono molto complesse. Il loro controllo è reso ancora più complesso dalla necessità di cercare un soddisfacente compromesso tra diverse esigenze, spesso in contrasto tra di loro, con quella di uno scarico pulito, quali ad esempio: le prestazioni del motore, il consumo di combustibile ed i costi. [8]

Il problema deve essere quindi attaccato su più fronti, in maniera tale da avere diverse soluzioni parziali che permettano di risolvere il problema principale nel modo più consono, rispettando i limiti imposti dalla normativa nella maniera più semplice ed economica possibile.

Gli elementi sui quali si interviene sono quindi:

- I combustibili
- L'alimentazione
- Il processo di combustione
- I gas di scarico

Nei primi tre casi si tenta di intervenire limitando la formazione dell'elemento inquinante, agendo direttamente sui fenomeni che avvengono all'interno del motore. Nell'ultimo caso invece, si cerca di eliminare a valle i costituenti dei gas di scarico non tollerati dalla normativa.

4.4.1 Interventi sui combustibili

Scegliendo l'opportuna tipologia di combustibile oppure adottando processi lavorativi in fase di raffinazione è possibile utilizzare/ottenere combustibili a basso tenore di zolfo, piombo ed altri metalli pesanti diminuendo così la produzione di sostanze inquinanti. Ad esempio l'utilizzo di alcoli come combustibili per l'autotrazione, utilizzati sia puri che diluiti nelle benzine, danno luogo ad emissioni

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

di CO e HC di poco inferiori rispetto ai tradizionali motori a benzina, ma di molto inferiori in termini di NOx. Altri combustibili, considerati alternativi, come il GPL, il metano e l'idrogeno, possono emettere sostanze inquinanti in misura ridotta. Questi benefici sono però ottenibili solamente attraverso modifiche del motore tali da renderlo adatto al funzionamento con una diversa tipologia di combustibile.

4.4.2 Interventi sull'alimentazione

G. Ferrari, afferma che, agendo sull'alimentazione del motore, e più precisamente sul rapporto aria-combustibile, si possono ridurre drasticamente le emissioni di CO ed HC.

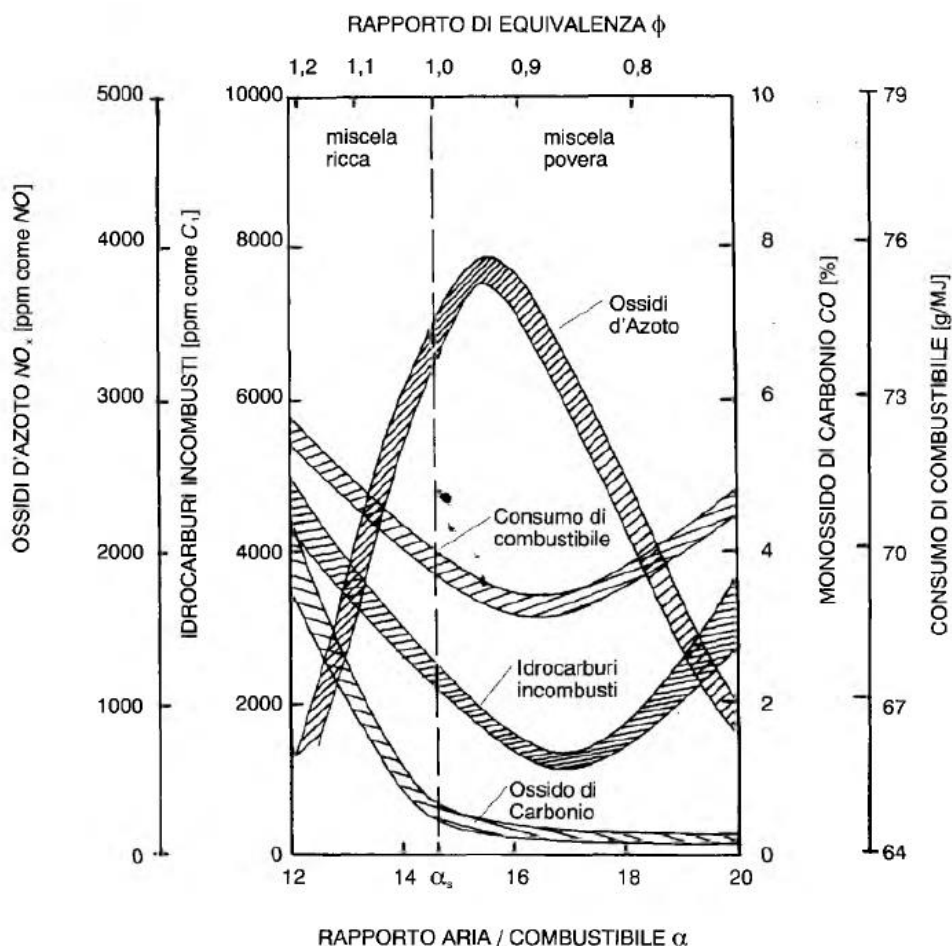


Figura 4.10 - Influenza del rapporto di miscela sulla concentrazione dei 3 principali inquinanti: CO, HC, NOx emessi dallo scarico di un motore ad accensione comandata [8]

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

Prosegue sostenendo che se si riesce a smagrire la miscela di alimentazione, cioè ridurre la percentuale di combustibile all'interno della carica aria-combustibile, fino ai limiti consentiti da un regolare funzionamento, il CO scende a livelli molto bassi, la stessa cosa accade per gli HC, ma il livello dei NOx cresce a causa dell'eccesso di ossigeno nella carica.

Per poter abbassare il livello degli ossidi di azoto è necessario quindi diminuire anche la temperatura all'interno del cilindro durante il processo di combustione, ritardando l'accensione della carica fresca e/o riciclando i gas combusti in fase di aspirazione. I gas combusti infatti sono ricchi di sostanze inerti che non partecipano al processo di combustione. In questa maniera la carica fresca presente all'interno del volume del cilindro sarà minore e minore sarà anche la temperatura massima raggiunta durante la fase di combustione.

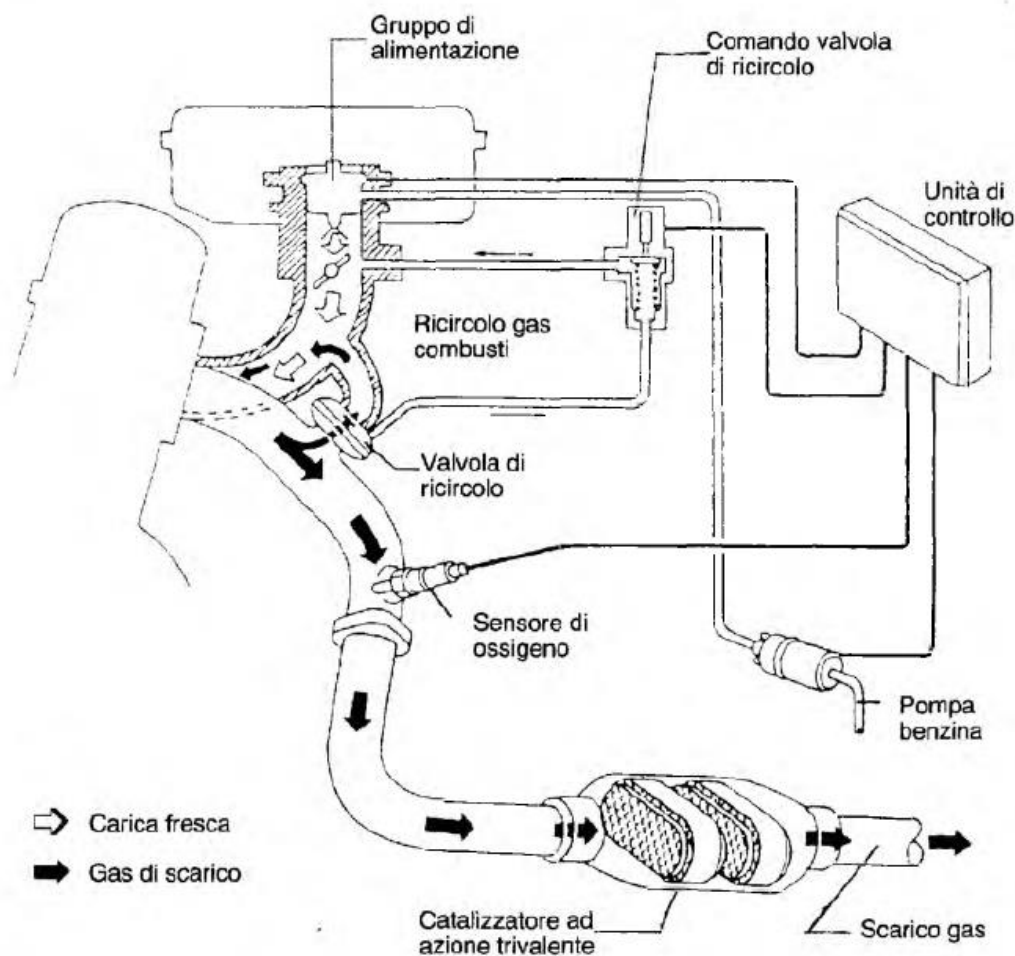


Figura 4.11 – Rappresentazione schematica di due tipici interventi per l'abbattimento degli inquinanti scaricati: ricircolo dei gas combusti e loro depurazione mediante reattore catalitico trivalente. L'unità di controllo del gruppo di alimentazione ottimizza il grado di apertura della valvola di ricircolo per ogni condizione di funzionamento. Nello stesso tempo valendosi del segnale di retroazione fornito dal sensore ossigeno, mantiene il rapporto aria-combustibile prossimo al suo valore stechiometrico. [8]

Tornando però alla tecnica di smagrimiento della miscela bisogna tenere in considerazione, che un motore che funziona con miscela magra, presenta problemi di regolarità, prestazioni, avviamento e regolazione del minimo. Per ovviare a questo problema si fa ricorso a motori a carica stratificata, cioè che utilizzano miscela ricca solamente nella parte centrale della carica in prossimità della candela, oppure a sistemi di carburazione sempre più sofisticati e a gruppi di iniezione controllati elettronicamente, che gestiscono in maniera autonoma e ottimizzata il rapporto aria-combustibile.

4.4.3 Interventi sul processo di combustione

Come esposto nel capitolo precedente, un buon metodo per la riduzione degli inquinanti è quello di utilizzare miscela magra per alimentare il motore. Parallelamente a questa tecnica, G. Ferrari, nel capitolo 12.4.3 del testo "Motori a combustione interna" afferma che bisogna intervenire sul processo di combustione cercando di accelerarlo il più possibile per controbilanciare la più lenta propagazione del fronte di fiamma, dovuta all'utilizzo di carica magra.

Questo tipo di intervento può essere fatto ottimizzando:

- Il rapporto di compressione del motore
- La forma della camera di combustione
- Il livello di turbolenza della carica

Un elevato rapporto di compressione garantisce una più veloce combustione in quanto facilita l'accensione della miscela grazie a temperatura e pressione maggiori all'interno del cilindro e grazie a una maggiore densità della carica nella

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

zona di combustione. Di contro un elevato rapporto di compressione innalza il pericolo di detonazione della carica all'interno del motore. Per ovviare a tale problema si rende quindi necessario studiare una forma ottimale della camera di combustione. La camera, come affermato da Ferrari, dovrà quindi essere compatta e raccolta attorno alla candela per evitare fenomeni di propagazione del fronte di fiamma.

Infine lo studio di una camera di combustione più compatta, comporta altri due vantaggi oltre che limitare le possibilità di detonazione. Il primo vantaggio sta nel fatto che all'interno di una camera più piccola, minore sarà la probabilità di formazione degli HC in quanto minori saranno gli interstizi nei quali si formeranno residui di carica incombusta. Il secondo vantaggio è dato dal moto turbolento che la carica assume all'interno della camera, infatti maggiore è la turbolenza della carica, maggiore sarà la velocità di combustione.

4.4.4 Interventi sui gas di scarico

Gli interventi fino ad ora descritti, tentano di ridurre l'emissione di sostanze inquinanti, cercando di limitarne la formazione. Purtroppo essi hanno un'efficacia limitata. Per ottenere allora una significativa riduzione degli inquinanti, fino ai livelli dettati dalla normativa, è necessario intervenire sui gas di scarico prodotti dal motore, per ripulirli dai prodotti tossici della combustione che si sono inevitabilmente formati. Si ricorre quindi a reattori termici o catalitici che completino l'ossidazione di CO, HC e riducano i NOx.

4.4.4.1 I reattori termici

Solitamente la combustione all'interno dei mci avviene con una carente quantità di ossigeno. Per realizzare una completa ossidazione dei prodotti di scarico è necessaria una quantità addizionale di aria che mediante una pompa viene prelevata dall'ambiente esterno ed iniettata in prossimità delle valvole di scarico.

Per favorire l'ossidazione delle sostanze presenti all'interno dei gas di scarico con l'ossigeno apportato dall'aria e ottenere risultati ottimali in termini di abbattimento degli inquinanti, si rende necessario applicare alla testa del motore un particolare reattore.

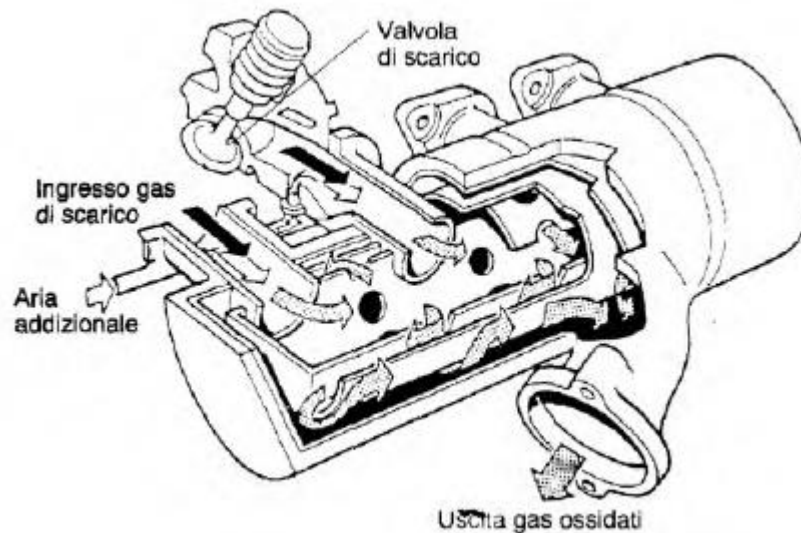


Figura 4.12 – Schema di un reattore termico [8]

Come possiamo vedere dalla figura qui sopra, tratta dal capitolo 12.4.4 del testo "Motori a combustione interna" il reattore è caratterizzato dalla presenza di più camere cilindriche coassiali che mantengono i gas di scarico ad una temperatura sufficientemente alta, tale da permettere la reazione tra l'aria addizionale, il monossido di carbonio e gli idrocarburi incombusti favorendone la completa ossidazione.

4.4.4.2 I reattori catalitici

Con il passare degli anni le normative contro l'inquinamento si fecero sempre più severe, per rispettare i nuovi limiti i reattori termici non erano più sufficienti e vennero quindi sostituiti dai reattori catalitici. Quest'ultimi sfruttano il principio della catalisi chimica e permettono quindi di ossidare CO e HC a temperature molto più basse, circa 300° C, raggiungibili anche con miscela molto magre e in

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

condizioni di carico parziale. Questa capacità di lavorare a “basse” temperature consente al catalizzatore di ridurre anche gli ossidi di azoto, invece, non eliminabili nei reattori termici a causa delle elevate temperature necessarie per l’avvio del processo di ossidazione.

Il catalizzatore, viene descritto da G. Ferrari, sostanzialmente come un involucro metallico che incanala i gas combusti attraverso un letto di catalisi, dove vengono in contatto con sostanze capaci di accelerare notevolmente certe reazioni chimiche, senza prendervi parte. Come tali si usano: ossidi di metalli nobili, come platino e palladio, i quali favoriscono le reazioni di ossidazione di CO e HC; e composti a base di rodio per creare un ambiente riducente atto ad eliminare gli NOx. Per questi motivi i reattori catalitici vengono definiti trivalenti, in quanto riescono ad abbattere tre diversi tipi di sostanze inquinanti. [8]

Per rendere massima l’efficienza del convertitore è necessario che i gas di scarico, durante il passaggio all’interno di essi, vengano in contatto con un’ ampia superficie adsorbente solitamente in ceramica. Per questo motivo la struttura interna del catalizzatore è realizzata a nido d’ape, in modo tale da garantire basse perdite fluidodinamiche e una buona resistenza meccanica e termica.

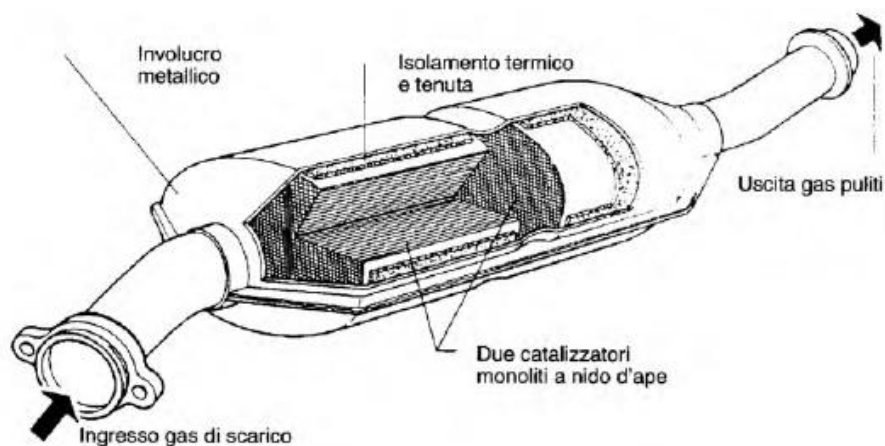


Figura 4.13 - Reattore a doppio letto catalitico: nel primo elemento si realizza la riduzione degli ossidi di azoto, mentre nel secondo si completa l’ossidazione di CO ed HC. In entrambi i casi, il supporto del catalizzatore è fornito da una struttura monolitica a forma di nido d’ape. [8]

[8] Libro di testo “Motori a combustione interna” Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

Scendendo maggiormente nei dettagli per quanto riguarda l'efficienza dei convertitori trivalenti, l'ingegnere Vagni, afferma che essa dipende da tre parametri:

- Tempo di permanenza dei gas nel convertitore
- Temperatura di funzionamento del substrato attivo
- Invecchiamento e/o avvelenamento dei catalizzatori [4]

Il tempo di permanenza è funzione della porta dei gas combusti scaricati e del volume del convertitore, che deve essere prestabilito in fase di progettazione.

Per quanto riguarda la temperatura ottimale in termini di efficienza e tempo di vita del catalizzatore, essa dovrebbe rientrare nell'intervallo compreso tra i 300 e gli 800° C, infatti per valori superiori si verifica un danneggiamento dello strumento mentre per valori inferiori il processo di abbattimento delle emissioni non viene attivato.

Infine per quanto riguarda l'invecchiamento del catalizzatore molto dipende dalla temperatura e dai tempi di funzionamento del substrato attivo, mentre l'avvelenamento è causato da sostanze come il piombo, il mercurio e il cadmio che si depositano nel substrato o che reagiscono selettivamente con i metalli nobili del catalizzatore, formando leghe inattive con un processo irreversibile.

4.4.4.3 I convertitori DeNOx

L'utilizzo di catalizzatori trivalenti permette di rispettare i limiti imposti dalla normativa, ma allo stesso tempo impone ai mci di funzionare con miscela prossima al suo valore stechiometrico. Attualmente si punta all'utilizzo di miscela magra privilegiando l'aspetto economico e dei consumi, per questo motivo si guarda verso una nuova generazione di catalizzatori catalitici, denominati DeNOx, capaci di purificare i gas di scarico dagli inquinanti anche in presenza di miscela magra. Obiettivo principale del convertitore DeNOx è l'abbattimento degli ossidi di azoto, infatti lavorando con miscela magra avremo un eccesso di ossigeno che favorisce, l'ossidazione di CO e HC, ma che allo stesso tempo crea complicazioni nella riduzione degli NOx.

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 47, università Ecampus. 2014

4.4.4.4 Tecnologia SCR, NAC e filtro antiparticolato

Si presentano ora due tecnologie per la rimozione dei principali inquinanti che caratterizzano i gas di scarico del motore Diesel. In esso infatti, se le emissioni di CO e HC possono essere considerate di minore impatto e importanza, un ruolo principale lo rivestono le emissioni di NOx e particolato.

Un'efficace tecnologia per la rimozione degli NOx dai gas di scarico, è la SCR. Questa tecnologia, che significa "Selective Catalytic Reduction", ha come obiettivo la riduzione selettiva catalitica degli NOx per mezzo dell'ammoniaca. [4] A causa della tossicità di quest'ultima, risulta però maggiormente conveniente l'utilizzo dell'urea, dalla quale l'ammoniaca si ricava per idrolisi e termolisi direttamente all'interno del convertitore catalitico.

Inoltre Vagni afferma, che nonostante la difficoltà di dover trasportare l'urea a bordo del veicolo, la tecnologia SCR è la tecnologia più efficace e conveniente per rimuovere gli NOx dai gas di scarico, specialmente nel caso di veicoli industriali pesanti e autobus.

In alternativa vi è comunque un'altra tecnologia denominata NAC che consiste nell'utilizzo di convertitori catalitici, capaci di rimuovere gli ossidi di azoto anche in presenza di elevate quantità di ossigeno, caratteristica che li rende particolarmente adatti in motori funzionanti con miscele magre. NAC si presenta come una tecnologia meno complessa e ingombrante rispetto a SCR, ma necessitando di combustibili privi di zolfo, risulta più efficace se applicata a veicoli e mezzi di trasporto leggeri.

Il filtro antiparticolato, brevemente detto DPF (Diesel Particulate Filter) o FAP (Filtre à Particulates), è essenzialmente un componente che obbliga i gas di scarico, ricchi di particelle carboniose in sospensione, ad attraversare una barriera porosa. Il filtro è costituito da una serie di canali, disposti in configurazione a nido d'ape. Alcuni canali presentano il lato di ingresso aperto e quello di uscita chiuso, i restanti canali sono realizzati in maniera opposta. I gas fluiscono quindi nelle aperture dei canali e vi rimangono intrappolati dal lato chiuso, a questo punto sono costretti a defluire tramite lo strato poroso, realizzato solitamente in ceramica per sopportare le elevate temperature, depositando le particelle di

[4] Sandro Vagni, corso "Motori a combustione interna" capitolo 48, università Ecampus. 2014

dimensioni maggiori. Attraversato lo strato di ceramica i gas ripuliti sono liberi di defluire dai canali con uscita aperta. La struttura a nido d'ape come nel caso dei catalizzatori trivalenti permette di disporre di un'ampia superficie di filtraggio con un piccolo ingombro.

Man mano che il filtro svolge la sua mansione, i depositi carboniosi, sporcano depositandosi su di essa, la superficie filtrante. Risulta quindi necessario effettuare periodicamente l'operazione di rigenerazione del filtro. La rigenerazione consiste nella pulizia del materiale poroso, grazie all'aumento di temperatura all'interno del filtro che attiva il processo di autocombustione dei depositi carboniosi.

Una volta rigenerato il filtro può tornare a svolgere in maniera efficiente il proprio compito di abbattimento del particolato.

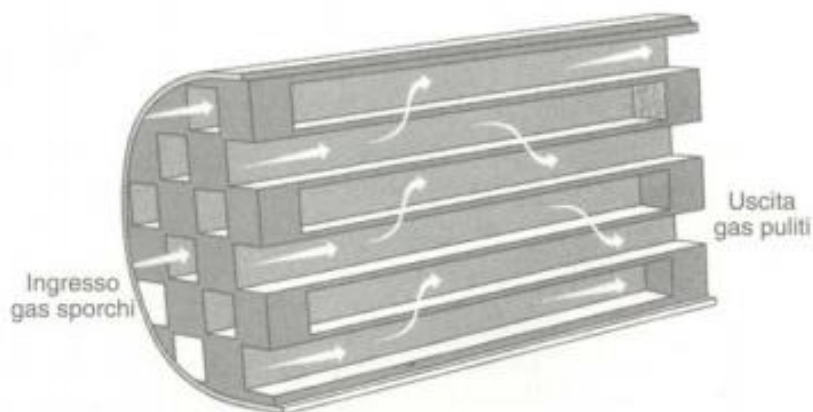


Figura 4.14 – Filtro per particolato con struttura ceramica a nido d'ape. I canali sono alternativamente chiusi da un lato per costringere i gas ad attraversare le pareti porose. [4]

CAPITOLO 5

L'idrogeno applicato ai mci per la riduzione degli inquinanti

Il concetto di motore ad idrogeno prese piede negli anni immediatamente seguenti all'invenzione dei primi motori a combustione interna. Fù infatti Francois Isaac de Rivaz, nel 1807 a inventare il primo motore a combustione interna alimentato da una miscela composta da idrogeno ed ossigeno. Successivamente, nel 1860, Etienne Lenoir sviluppò un veicolo a tre ruote azionato da un motore a 2 tempi monocilindrico. Nel motore di Lenoir l'idrogeno veniva prodotto mediante il processo di elettrolisi dell'acqua. Nel secolo successivo, più precisamente nel 1933, la compagnia norvegese Norsk Hydro brevettò un motore a combustione interna capace di funzionare con idrogeno prodotto a bordo del veicolo tramite un processo di reforming dell'ammoniaca. Sempre nel 1933, Erren Engineering Company, propose invece di iniettare idrogeno pressurizzato in aria o in ossigeno all'interno della camera di combustione, piuttosto che alimentare il motore attraverso i carburatori impiegati fino a quel momento. Questo metodo innovativo, necessitava però di perfezionamento e messa a punto in quanto la combustione risultava essere molto brusca e violenta con elevato rischio di ritorno di fiamma all'interno del cilindro. Vennero di conseguenza progettati negli anni seguenti dei sistemi di controllo e d'iniezione sempre più avanzati, che portarono ad una migliore combustione della miscela con conseguente riduzione dei prodotti incombusti e dei consumi di carburante.

Il 1974 è l'anno in cui venne presentato Musashi 1, il primo veicolo alimentato ad idrogeno prodotto da una compagnia giapponese, la "Musashi Institute of Technology". Musashi 1 era dotato di un motore ad idrogeno a 4 tempi, con sistema di stoccaggio del carburante a pressione. Nell'anno successivo, 1975, nacque Musashi 2, dotato di sistema di iniezione diretta e serbatoio ad idrogeno liquido. Nel 1977 si arrivò alla produzione di Musashi 3 che montava un motore ad idrogeno a 2 tempi con accensione comandata mediante scintilla. Infine anche

BMW in collaborazione con DLR presentò il suo primo motore ad idrogeno nel 1979. [7]

Durante il corso degli anni i motori ad idrogeno, hanno subito diverse e profonde evoluzioni che li hanno portati a migliorarsi e diffondersi sempre più, grazie anche alla loro capacità di funzionare con un combustibile più o meno pulito a seconda del suo processo di produzione.

Arrivando ai giorni nostri, Giammartini, Giacomazzi e Visentin affermano nell'articolo "Tecnologie avanzate per la combustione dell'idrogeno" che l'idrogeno ha le potenzialità per divenire il principale combustibile dei futuri decenni.

Il suo uso generalizzato nel campo energetico e dei trasporti può infatti contribuire a risolvere il problema dell'effetto serra dovuto alla emissione del biossido di carbonio prodotto dalla combustione degli idrocarburi. [15]

5.1 Caratteristiche chimico-fisiche dell'idrogeno

Giammartini, Giacomazzi e Visentin, ci presentano l'idrogeno come l'elemento più abbondante nell'universo, anche se raramente presente sulla Terra allo stato elementare, a causa della sua elevata reattività con altri elementi. [15]

L'idrogeno elementare è un gas incolore e inodore a molecola biatomica (H₂), costituito da una miscela di tre isotopi: L'idrogeno o Prozio che costituisce circa il 99.98% della miscela, il Deuterio e il Trizio, presenti solo in piccole tracce.

Il vantaggio principale dell'utilizzo dell'idrogeno come combustibile è dato dal fatto che esso, se miscelato con aria, brucia per concentrazioni in volume comprese tra il 4% e il 75% (il metano brucia per concentrazioni tra 5% e 15%), e che la sua temperatura di combustione spontanea è di 585° C (metano 540° C). Nonostante questo vantaggio, bisogna tenere in considerazione che una delle principali caratteristiche dell'idrogeno, legata all'ambito dei motori a combustione interna, è quella di presentare un ampio campo d'infiammabilità con elevata velocità di propagazione della fiamma.

[7]" Hydrogen - Fueled Internal Combustion Engines.

Sebastian Verhelst - Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgium

Thomas Wallner - Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Building 362, 9700 South Cass Avenue, Argonne, IL 60439-4815, USA.

[15]" Tecnologie avanzate per la combustione di idrogeno" Stefano Giammartini, Eugenio Giacomazzi, Valentina Visentin. ENEA, UTS- Fonti rinnovabili e cicli energetici innovativi.

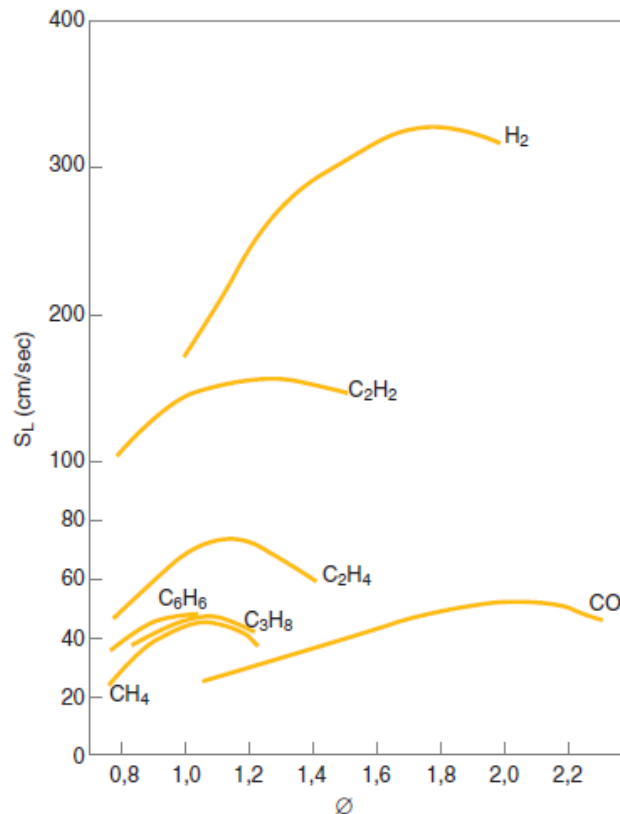


Figura 5.1 – Velocità di fiamma laminare S_L di differenti combustibili in aria (pressione atmosferica e temperatura iniziale 298K) in funzione del rapporto di equivalenza ϕ [15]

Quanto sopra affermato, ci viene testimoniato dalla figura 5.1. In essa vengono mostrati i limiti di infiammabilità espressi in funzione del rapporto di equivalenza, dato dal rapporto tra aria di combustione effettiva/aria stechiometrica, vista la velocità di propagazione della fiamma laminare.

Effettivamente nel caso di combustione dell'idrogeno con aria la velocità di propagazione laminare della fiamma è pari a 270 cm/s contro i 37 cm/s di fiamme prodotte dalla combustione del metano miscelato con aria. Quanto esposto, può comportare seri problemi di controllo della combustione all'interno del motore, oltre al rischio di insorgenza del fenomeno di "flashback". Il "flashback" consiste nella progazione del fronte di fiamma in direzione opposta a quella di provenienza dei reagenti premiscelati, che formano il combustibile, con concreto rischio di

[15] "Tecnologie avanzate per la combustione di idrogeno" Stefano Giammartini, Eugenio Giacomazzi, Valentina Visentin. ENEA, UTS- Fonti rinnovabili e cicli energetici innovativi.

danneggiamento dei componenti del motore, e/o nel peggiore dei casi, esplosione dello stesso.

Inoltre le combustioni ad idrogeno presentano un' elevata temperatura adiabatica di fiamma che comporta problemi a livello di resistenza ed usura dei materiali con i quali viene realizzato il motore.

A queste problematiche si intende dare quindi soluzione con l'applicazione di nuove e più avanzate tecnologie di combustione, caratterizzate dall'assenza di bruschi gradienti di temperatura e dalla elevata controllabilità del processo chimico-cinetico subito dalla carica all'interno del motore.

Le ricerche sperimentali e lo sviluppo di nuove tecnologie per favorire l'impiego dell'idrogeno nei sistemi a combustione trova quindi una duplice motivazione:

1. Di vera e propria sfida tecnologica, nell'ottica di una combustione verso condizioni di zero emissioni
2. Di opportunità e convenienza economica, in relazione all'impiego di combustibili di nicchia. [15]

Sostanzialmente si tratta quindi di sviluppare nuovi dispositivi capaci di lavorare con idrogeno elementare, miscelato a comburenti come l'aria e l'ossigeno, riducendo al minimo tutti i problemi di ordine pratico che questa scelta comporta. Infatti, come visto nel capitolo precedente, la necessità di abbattere/ridurre le emissioni inquinanti prodotte dai motori a combustione interna sta diventando un' esigenza sempre più premente anche in termini di tipo ambientale. L'idrogeno, come esposto nell'articolo di Giammartini, Giacomazzi e Visentin, può portare ai seguenti vantaggi:

- L'idrogeno non dà origine ad emissioni di anidride carbonica, principale imputato dell'effetto serra.
- I prodotti della reazione esotermica con aria sono: acqua, sotto forma di vapore, azoto, frazioni trascurabili di idrogeno (H) e ossigeno (O), e una certa quantità di ossidi di azoto causati dalle elevate temperature raggiunte durante la reazione di combustione.

[15] "Tecnologie avanzate per la combustione di idrogeno" Stefano Giammartini, Eugenio Giacomazzi, Valentina Visentin. ENEA, UTS- Fonti rinnovabili e cicli energetici innovativi.

- I NO_x prodotti, possono comunque essere facilmente controllati adottando innovative tecnologie di combustione.
- Le combustioni ad idrogeno non producono i tipici prodotti intermedi delle combustioni di idrocarburi, come l'ossido di carbonio (CO) ed altre molecole più complesse nocive per l'uomo e l'ambiente.

Nonostante ciò lo sfruttamento dell'idrogeno a fini energetici non è ancora molto diffuso a causa di vincoli tecnologici di non facile soluzione, alla difficoltà di produzione ed a una rete di distribuzione non ben radicata sul territorio.

5.2 Metodi di produzione dell'idrogeno

Come detto in precedenza l'idrogeno esiste in natura solo combinato con altri elementi, ad esempio con l'ossigeno nell'aria oppure con carbonio ed ossigeno all'interno di materiali organici o nei combustibili fossili. Per questo motivo, per ottenere idrogeno puro è necessario sottoporre questi composti a diversi processi.

L'idrogeno può essere ricavato sostanzialmente da due grandi categorie di fonti energetiche: i combustibili fossili e le fonti rinnovabili.

Alla categoria dei combustibili fossili appartengono:

- Il gas naturale
- Sottoprodotti delle raffinerie
- Carbone

Mentre la categoria delle fonti rinnovabili per la produzione di energia è composta da:

- Energia eolica, energia idroelettrica
- Biomasse
- Energia solare
- Energia nucleare

Come possiamo vedere dallo schema seguente per ogni fonte energetica esiste un processo attraverso il quale si ha la produzione dell'idrogeno.

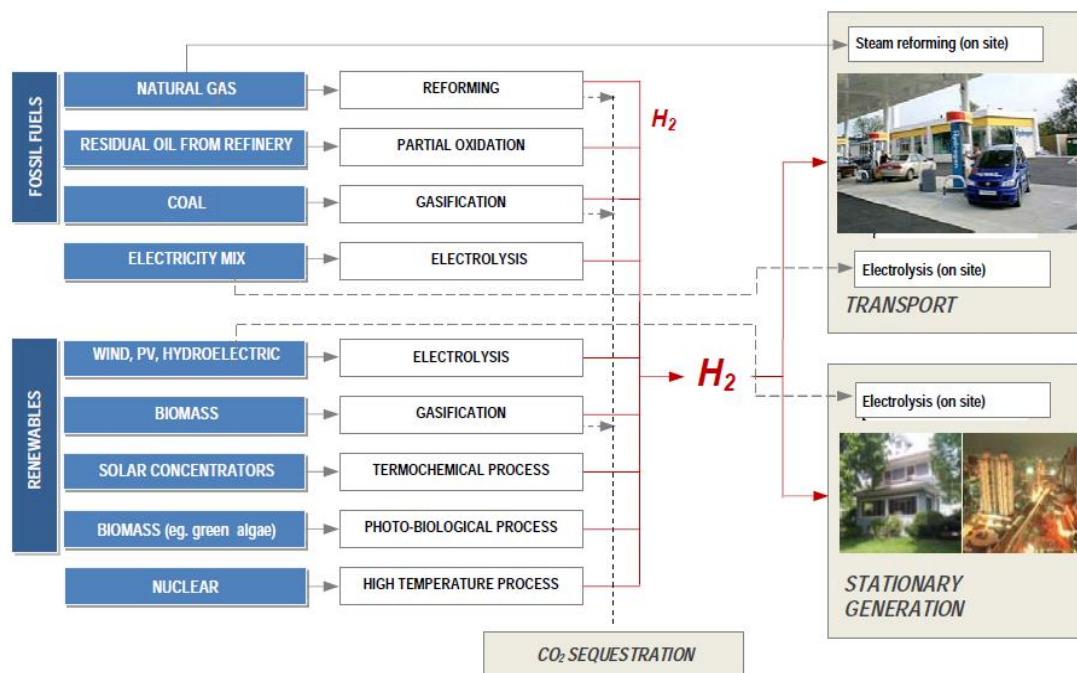


Figura 5.2 – Processi di produzione dell'idrogeno [16]

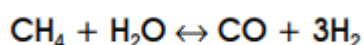
Analizzeremo ora alcuni dei principali processi per la produzione di idrogeno.

5.2.1 Produzione di idrogeno da combustibili fossili

I processi di produzione di idrogeno da combustibili fossili sono i maggiormente diffusi, circa il 95% della produzione di idrogeno dipende da essi. [16]

5.2.1.1 Steam-Reforming (SMR)

Il processo maggiormente vantaggioso in termini economici risulta essere lo steam reforming. Il processo prevede l'immissione di gas naturale, alla temperatura di 800° C ed a una pressione di 4 bar, all'interno del reattore di steam-reforming, dopo esser stato opportunamente depurato da eventuali composti solforati che determinerebbero l'avvelenamento dei catalizzatori utilizzati per la reazione.



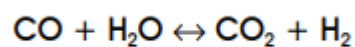
[16] Hydrogen as Future Energy Carrier: The ENEA Point of View on Technology and Application Prospects
Autori: Mario Conte, Francesco Di Mario Agostino Iacobazzi, Antonio Mattucci, Angelo Moreno e Marina Ronchetti.

Data pubblicazione articolo: 23 Marzo 2009

Il calore necessario alla reazione, viene fornito, in parte dal vapore surriscaldato, che viene introdotto in miscela con il gas naturale, e in parte per riscaldamento dall'esterno, grazie ad un processo di combustione.

Il risultato della reazione è il syngas, una miscela gassosa composta principalmente da carbonio ed idrogeno.

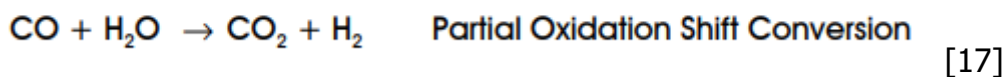
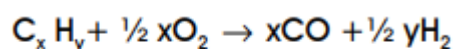
Il processo non si completa qui. Infatti la prima reazione viene seguita da una seconda denominata shift, una reazione esotermica catalitica, che ha l'obiettivo di innalzare il livello di idrogeno all'interno della miscela di Syngas.



Come risultato della seconda reazione si ottiene sempre una miscela gassosa composta per il 77% da H₂, CO 1%, CO₂ 19%, H₂O e CH₄ per il 3%, che deve essere purificata prima di essere utilizzata mediante assorbimento chimico o PSA (Pressure Swing Absorption). Il PSA permette, infine, di separare i vari componenti della miscela ottenendo così idrogeno puro. [17]

5.2.1.2 Partial oxidation (POX)

Un altro metodo per la produzione di idrogeno è l'ossidazione parziale degli idrocarburi prodotti dalle raffinerie, come metano o nafta, i quali vengono ossidati per produrre CO e H₂ secondo le seguenti reazioni:



Essendo la reazione esotermica, al contrario della reazioni di steam-reformin, non viene richiesto calore dall'esterno, così come a causa delle elevate temperature non è richiesto l'uso dei catalizzatori.

Confrontando l'efficienza dei processi di SMR e POX notiamo come il primo attesti valori pari a 65-70% mentre il secondo sia caratterizzato da un rendimento inferiore (50% circa) a causa delle elevate temperature richieste dalla reazione e della difficoltà di immagazzinare il calore necessario all'interno del reattore.

[17] "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili" Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco" Università degli Studi di Firenze Autori: David Chiamonti, Francesco Martelli, Roberto Galante Dipartimento di Energetica "S.Stecco" Milva Celli, Daniele Colognesi, Marco Zoppi CNR – Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"

5.2.1.3 Coal gasification

Sempre nel campo dei combustibili fossili troviamo il processo di gassificazione del carbone. Stando ai dati del 2009, riportati nella fonte [16], l'idrogeno prodotto tramite il processo di gassificazione è pari al 18% della produzione mondiale, grazie anche ad una presenza importante del carbone in numerose parti del mondo.

Questa tecnologia è definita, nel testo "Produzione di idrogeno da fonti fossili e rinnovabili", come reazione fra combustibili solidi o liquidi con aria, oppure ossigeno o vapore o ancora una miscela di essi, a temperature sufficientemente elevate, in modo da produrre un gas adatto allo scopo a cui è destinato. [17]

I metodi per la gassificazione del carbone sono numerosi, ma solitamente vengono raggruppati in tre categorie; in base alla geometria del gassificatore avremo quindi:

- Processi a letto trascinato
- Processi a letto fluido
- Processi a letto mobile

Il processo attualmente più utilizzato è quello a letto trascinato. In questo tipo di gassificatore, le particelle di carbone polverizzato ed il flusso di gas alla temperatura di 1250° C, si muovono nello stesso verso ad alta velocità. A causa del basso tempo di permanenza all'interno del reattore, la carica, per assicurare un adeguato rapporto di conversione del carbonio, deve essere finemente polverizzata. Infine questa tipologia di gassificatori possono funzionare sia se alimentati con carbone allo stato solido, sia allo stato liquido, l'unica necessità deriva dal fatto di utilizzare un carbone con alto indice di legnosità in modo tale da favorire la produzione di materiale bitumoso in alte concentrazioni.

Nel processo a letto mobile, invece, solamente alcune delle particelle di carbone si trovano in sospensione nel flusso gassoso, altre tornano indietro verso la parte più densa del letto dove subiscono la gassificazione ad una temperatura di circa 1000° C.

[16] Hydrogen as Future Energy Carrier: The ENEA Point of View on Technology and Application Prospects
Autori: Mario Conte, Francesco Di Mario Agostino Iacobazzi, Antonio Mattucci, Angelo Moreno e Marina Ronchetti.
Data pubblicazione articolo: 23 Marzo 2009

[17] "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili" Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco"
Università degli Studi di Firenze Autori: David Chiamonti, Francesco Martelli, Roberto Galante
Dipartimento di Energetica "S.Stecco" Milva Celli, Daniele Colognesi, Marco Zoppi CNR – Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"

Questa tipologia di gassificatori lavorano quasi esclusivamente con carbone allo stato solido, solamente in presenza di una particolare tecnologia gassificano carbone liquido. Essendo infine le temperature all'interno del reattore più basse rispetto al processo a letto trascinato, è necessario utilizzare carboni altamente reattivi come la lignite e il Brown-coal.

Per ultimo troviamo il processo a letto mobile. All'interno di questi reattori, il flusso di gas risale lentamente attraverso il letto di carbone che costituisce la carica. Il combustibile può essere utilizzato sia allo stato solido che allo stato liquido. Nel primo caso è comunque consigliabile utilizzare un carbone abbastanza reattivo come la lignite, a causa delle basse temperature sviluppate durante il processo.

La caratteristica più importante per i gassificatori a letto mobile è l'alta permeabilità del letto, per evitare cadute di pressione e l'incanalamento delle sostanze reagenti attraverso il materiale costituente il letto del gassificatore in maniera inerte, cioè senza che vi siano reazioni durante questo passaggio. Questo fenomeno denominato come channeling e le cadute di pressioni, possono generare infatti instabilità all'interno del reattore, aumentando così il rischio di esplosione.

Da queste brevi descrizioni dei tre principali processi di gassificazione del carbone salta all'occhio come ogni tipologia di reattore funzioni con differenti tipologie di combustibili in diversi stati fisici e come ciò influisca sui prodotti finali. Per questo motivo si riporta una tabella tratta dalla fonte [17] che riassume i principali prodotti della gassificazione in base alla tipologia di carbone utilizzato.

Tipo di carbone	Pittsburgh N 8 (wt%)	Blair Athol (wt%)	Lignite (wt%)
C	69.4	74.0	48.0
H	4.5	4.5	4.0
O	6.1	5.0	12.3
N	1.2	1.7	0.6
S	2.9	0.4	2.1
Ceneri	9.9	9.9	8.0
Umidità	6.0	4.5	25.0
Materiale volatile	35.9	29.4	36.1
Carbonio fisso	48.2	56.2	30.9
LHV-MJ/kg	28.9	30.1	19.1

Figura 5.3 – Prodotti della gassificazione del carbone [17]

[17] "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili" Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco"
 Università degli Studi di Firenze Autori: David Chiamonti, Francesco Martelli, Roberto Galante
 Dipartimento di Energetica "S.Stecco" Milva Celli, Daniele Colognesi, Marco Zoppi CNR – Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"

5.2.2 Produzione di idrogeno per elettrolisi dell'acqua

Il processo di elettrolisi permette la suddivisione dell'acqua nei suoi componenti elementari, ovvero in ossigeno ed idrogeno puri, mediante l'utilizzo di energia elettrica. Per produrre idrogeno è necessario sciogliere un elettrolita (acido, base, o sale ad elevato prodotto ionico di dissociazione) in una soluzione acquosa. Successivamente il passaggio di una corrente elettrica libera idrogeno al catodo ed ossigeno all'anodo, esclusivamente a spese delle molecole di acqua.

Su questo principio si basa il funzionamento della cella elettrolitica, uno dei dispositivi maggiormente utilizzati in questo campo.

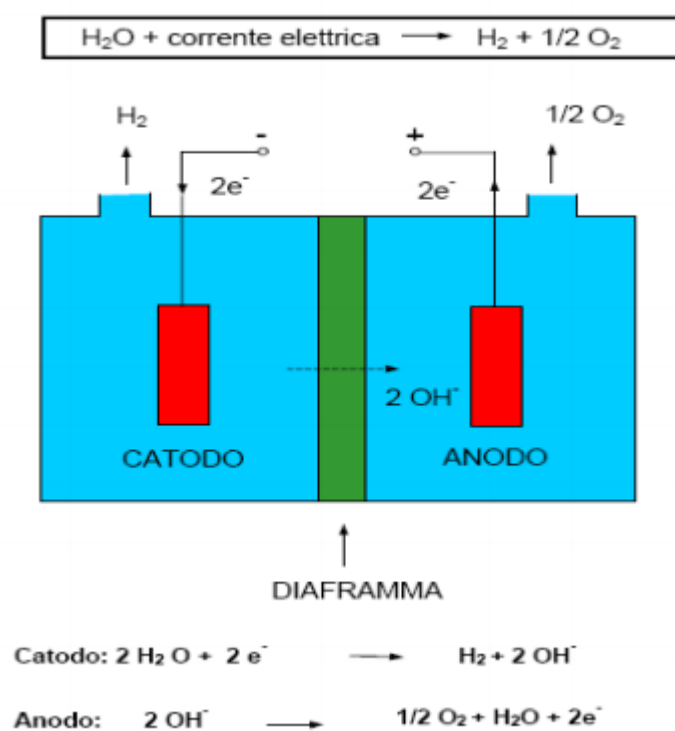


Figura 5.4 – Schema di un elettrolizzatore [18]

Essa, come vediamo dalla figura qui sopra, è costituita dai due elettrodi: l'anodo e il catodo. All'anodo avviene la reazione di ossidazione, mentre al catodo avviene la reazione di riduzione, per cui nella cella si realizza globalmente una reazione redox, ovvero una reazione durante la quale si ha lo scambio di elettroni da una

specie chimica all'altra. Tale reazione, non essendo una reazione spontanea sfrutta l'energia elettrica proveniente da un generatore esterno.

I due elettrodi vengono quindi immersi in una vasca contenente la soluzione acquosa che consente il passaggio di corrente. Un diaframma microporoso che divide la vasca in due sezioni permette, invece, il passaggio e la separazione degli ioni impedendo il contatto e la ricombinazione dei gas che si formano sui due elettrodi. Nell'istante in cui il generatore produce una forza elettromotrice gli elettroni si muovono all'interno del sistema dando il via alle reazioni che porteranno alla formazione di ossigeno ed idrogeno.

Come riportato nell'articolo "Hydrogen as a future energy carrier" allo stato attuale questo processo presenta costi molto più elevati rispetto alla produzione di idrogeno da combustibili fossili. Per questo motivo, nonostante l'impatto ambientale sia di molto minore rispetto ad altri processi e l'idrogeno prodotto presenti elevate caratteristiche di purezza, la produzione mondiale di idrogeno per elettrolisi si limita solamente al 4%. [16]

Rendimento elettrolisi	Consumi e prodotti finali	Consumo di elettricità [kWh _{el} /litro H ₂ O]	Prodotti finali	
			H ₂	O ₂
Processo ideale rendimento $\eta = 100\%$		4.4098	1.358 [m ³] (=111.898 [g])	0.679 [m ³]
Processo reale rendimento $\eta = 70\%$		6.299	1.358 [m ³] (=111.898 [g])	0.679 [m ³]

Figura 5.5 – La produzione di 1 kg di idrogeno mediante elettrolisi [18]

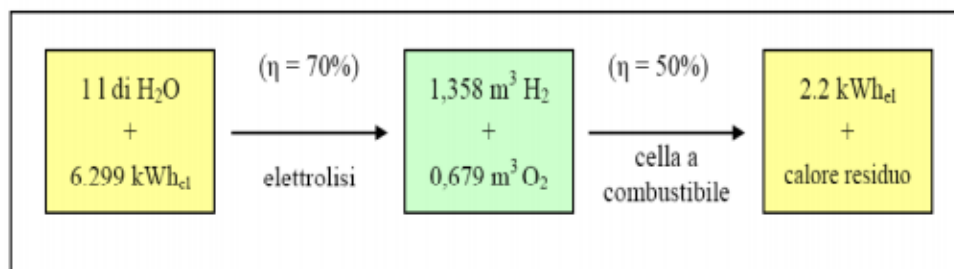


Figura 5.6 – Ciclo semplificato integrato elettrolizzatore/cella a combustibile [18]

[16] Hydrogen as Future Energy Carrier: The ENEA Point of View on Technology and Application Prospects
Autori: Mario Conte, Francesco Di Mario Agostino Iacobazzi, Antonio Mattucci, Angelo Moreno e Marina Ronchetti.

Data pubblicazione articolo: 23 Marzo 2009

[18] http://www.dol.unina.it:8445/idea/tecnologie_energetiche/UD08/download/uf02.pdf

La diffusione della produzione di idrogeno per elettrolisi, oltre che per aspetti economici, viene limitata anche da aspetti energetici. Analizzando le tabelle sopra riportate infatti notiamo come la scissione (rendimento = 70%) di un litro d'acqua nelle sue componenti H₂ e O₂, richieda per esempio circa 6.3 kWh di energia elettrica. Il contenuto energetico dell'idrogeno così prodotto (circa 1.3 m³) corrisponde approssimativamente a 4.41 kWh di energia chimica. Volendo nuovamente ricavare energia elettrica da 1.36 m³ di idrogeno con l'impiego di un ciclo combinato oppure di una cella a combustibile si otterrebbero circa 2.2 kWh di energia elettrica. I numeri appena riportati in prima battuta confermano quanto sia poco conveniente puntare sulla tecnologia dell'elettrolisi. In realtà, il procedimento sopra descritto può essere interessante a determinate condizioni. Si pensi ad esempio all'utilizzo di energia idroelettrica in estate, quando risulta conveniente produrre grazie a costi inferiori e allo sfruttamento dell'idrogeno immagazzinato in inverno, quando i costi di produzione sarebbero maggiori. In questo caso, l'analisi potrebbe risultare più favorevole sia dal punto di vista economico che energetico ed ecologico. [18]

5.2.3 Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili

Oltre che da combustibili fossili e con il processo di elettrolisi, l'idrogeno può essere prodotto anche a partire da fonti energetiche rinnovabili come le biomasse, l'energia solare e l'energia eolica del vento. Tra tutte queste, come affermato nella fonte [17] la biomassa è una delle più studiate ed analizzate non solo per la generazione diretta di energia, sia essa elettrica o sotto forma di calore, ma anche ai fini della produzione dell'idrogeno. Si possono distinguere due grandi classi di processo di conversione della biomassa in idrogeno:

- Processi biologici
- Processi termochimici

Nel primo gruppo troviamo la digestione anaerobica, la fermentazione e i processi metabolici, mentre nel secondo troviamo i processi di gassificazione (processo attualmente più sviluppato) e di pirolisi.

[17] "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili" Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco" Università degli Studi di Firenze Autori: David Chiaramonti, Francesco Martelli, Roberto Galante Dipartimento di Energetica "S.Stecco" Milva Celli, Daniele Colognesi, Marco Zoppi CNR – Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"

[18] http://www.dol.unina.it:8445/idea/tecnologie_energetiche/UD08/download/uf02.pdf

È importante inoltre distinguere la produzione di idrogeno in altri due gruppi:

- Produzione per vie dirette
- Produzione per vie indirette

Nel primo caso alla fine del processo avremo come risultato idrogeno puro, mentre nel secondo caso alla fine del processo otterremo un prodotto intermedio dal quale, solo successivamente, si potrà ottenere idrogeno. Le vie di produzione indirette possono risultare convenienti quando è necessario immagazzinare e trasportare il composto intermedio. Il suo trasporto infatti risulta più agevole rispetto a quello dell'idrogeno.

Ad oggi la produzione d'idrogeno da biomassa è ancora in via di sviluppo, infatti è ancora difficile parlare di impianti completamente funzionanti viste le grosse difficoltà tecniche ed economiche che caratterizzano questo settore. A tal proposito si pensi che i costi di produzione dell'idrogeno possono variare tra i 10 e i 25 euro/GJ in base alla taglia dell'impianto [16]. La ricerca tuttavia non smette di approfondire l'argomento in quanto, come affermato dalla fonte [17], nonostante il contenuto d'idrogeno nella risorsa biomassa iniziale sia modesto (circa il 6%), come pure il suo contenuto energetico, a causa dell'elevata presenza di ossigeno (40%) e nonostante un basso contenuto in peso di idrogeno, l'efficienza di conversione energetica è un vero punto di forza di questa fonte energetica sul quale la ricerca fonda le proprie basi.

Anche le tecniche di produzione di idrogeno basate sullo sfruttamento dell'energia solare sono ancora in via di sviluppo, anche se ad oggi, grazie a:

- Tecnologie fotoelettrochimiche
- Tecnologie termochimiche
- Centrali fotovoltaiche ad idrogeno

La strada è certamente praticabile e sempre più in discesa. Bisogna però ricordare che anche in questo caso, uno dei principali ostacoli della loro diffusione sono gli elevati costi di realizzazione e produzione.

[16] Hydrogen as Future Energy Carrier: The ENEA Point of View on Technology and Application Prospects
 Autori: Mario Conte, Francesco Di Mario Agostino Iacobazzi, Antonio Mattucci, Angelo Moreno e Marina Ronchetti.
 Data pubblicazione articolo: 23 Marzo 2009

[17] "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili" Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco"
 Università degli Studi di Firenze Autori: David Chiaramonti, Francesco Martelli, Roberto Galante
 Dipartimento di Energetica "S.Stecco" Milva Celli, Daniele Colognesi, Marco Zoppi CNR – Istituto di Fisica Applicata
 "Nello Carrara"

In maniera molto sintetica questi sistemi captano la radiazione e l'energia termica del sole tramite pannelli e celle fotovoltaiche capaci di convertirla in energia elettrica destinata al processo di elettrolisi dell'acqua per la produzione di idrogeno. In alternativa l'uso di materiali speciali, capaci di sopportare elevate temperature e di trattenere il calore, permette di avviare il processo di scissione termica della molecola dell'acqua che avviene alla temperatura di 2300° C. Vista però l'elevata temperatura alla quale ha inizio il processo e vista la difficoltà che vi è nel reperire tali materiali, si è soliti disciogliere nell'acqua dei catalizzatori che favoriscano il processo di scissione, permettendogli di avviarsi a temperature di 800 – 1000° C, temperature facilmente ottenibili grazie a concentratori solari parabolici.

Infine anche l'energia eolica rappresenta un'ulteriore opzione per la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili. Anzi come affermato nel testo "Produzione di idrogeno da fonti fossili e rinnovabili", la produzione di energia elettrica per via eolica è certamente la più tecnologicamente e commercialmente matura. Nonostante ciò l'accoppiamento con sistemi per la produzione di idrogeno, ed in particolare impianti di elettrolisi, non è assolutamente una pratica ovvia e consolidata. Infatti per la produzione elettrolitica di idrogeno va detto che se è vero che un impianto di elettrolisi dell'acqua connesso ad un impianto di generazione solare o eolico garantisce un bassissimo impatto ambientale a livello di emissioni inquinanti, è altresì vero che esso presenti grossi limiti dal punto di vista economico.

In conclusione quindi, il grosso limite della produzione di idrogeno da fonti rinnovabili ha radici economiche. Per questo motivo gli autori della fonte, arrivano ad affermare che: "l'idrogeno prodotto da fonti rinnovabili potrà essere usato dapprima in aree ove ci sia eccedenza di energia oppure non siano presenti sorgenti convenzionali di energia oppure ove sia richiesta un'elevata purezza del gas. Nel medio e lungo termine, tuttavia, e sulla falsariga dell'andamento attuale, è prevedibile una marcata riduzione del costo dell'elettricità prodotta da fonte

solare od eolica in grado di rendere economicamente fattibili i sistemi di produzione dell'idrogeno da sorgente rinnovabile.

Gli sforzi di ricerca e sviluppo e la richiesta del mercato provocherà anche una diminuzione del costo di acquisto degli elettrolizzatori, promuovendo la diffusione di questa tecnologia con gran beneficio per l'ambiente". [17]

5.2.4 Tecnologie innovative per la produzione di idrogeno

Ulteriori opzioni tecnologiche per la produzione di idrogeno si stanno sviluppando negli ultimi anni, ma spesso queste nuove tecnologie, ancora in fase di sviluppo, vengono limitate da problemi tecnico-economici che ne impediscono la diffusione su larga scala. Se ne riassumono alcune di esse:

- Radiolisi
- Reforming del plasma
- Ion transport membrane

proposte nella tesi "Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno." [19]

Savino, afferma che la radiolisi consiste nella separazione di molecole dell'acqua tramite collisione con particelle ad elevato contenuto energetico prodotte in un reattore nucleare e stima che con questa tecnica di produzione dell'idrogeno non si possano raggiungere efficienze superiori all'1% a causa della rapida ricombinazione degli atomi di ossigeno e di idrogeno ottenuti durante il processo di separazione.

Per quanto riguarda la tecnica di reforming del plasma, con essa si può produrre idrogeno partendo dal metano e da altri combustibili liquidi. Tale sistema è caratterizzato da elevatissime temperature che spaziano dai 3000° C ai 10000° C e può essere utilizzato per accelerare la cinetica delle reazioni di reforming nei reattori convenzionali, in assenza di catalizzatori.

Il plasma viene creato attraverso un arco elettrico, i reagenti, solitamente costituiti da metano miscelato a vapore oppure da gasolio unito ad acqua o aria,

[19] Savino F.A. "Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno". Tesi di Laurea, Università degli Studi di Foggia, Facoltà di Economia, 2000.

vengono introdotti all'interno del reattore nel quale avvengono le reazioni che portano alla formazione di idrogeno ed altri prodotti.

Esperimenti condotti al Massachusetts Institute of Technology hanno evidenziato un'efficienza di conversione dell'idrogeno superiore al 70%, con un consumo specifico di energia inferiore al 3%. L'efficienza globale del processo si attesta quindi intorno a valori del 90%. [19]

Parallelamente a vantaggi come elevata efficienza di conversione, compattezza e leggerezza dell'impianto ed assenza di particolato nei gas prodotti durante il processo, la tecnica di reforming del plasma presenta lo svantaggio di un'elevata dipendenza dall'energia elettrica.

Infine la tecnologia Ion Transport Membrane consiste nell'utilizzo di membrane di materiale ceramico, non poroso, operanti a temperature superiori ai 700° C, con alta selettività e permeabilità all'ossigeno.

L'ossigeno viene separato dall'aria da un lato della membrana a pressione ambiente e reagisce dall'altro lato con metano e vapore in pressione per formare una miscela di H₂ e CO. L'ossigeno proveniente dalla corrente d'aria ad elevata temperatura viene quindi ridotto in ioni. Successivamente passa attraverso la membrana nella quale, reagendo con i catalizzatori, ossida parzialmente la miscela metano-vapore.

Per concludere l'argomento riguardante i sistemi di produzione dell'idrogeno, si propone una tabella riassuntiva delle varie tecnologie per la produzione di H₂ precedentemente esposte. Nella tabella vengono evidenziate la fase di sviluppo, le emissioni di CO₂, la tipologia di produzione (distribuita e/o centralizzata) e i costi di produzione (presenti e futuri). Parametri essenziali per effettuare una valutazione tecnico – economica, per ogni singola tecnologia.

[19] Savino F.A. "Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno". Tesi di Laurea, Università degli Studi di Foggia, Facoltà di Economia, 2000.

TECHNOLOGY	Development stage	CO ₂ emissions	Production type		Production cost (€/GJ)	
			Distributed	Centralized	Today	Future
Natural gas steam reforming	no CCS	Commercial plants		✓	5-9 €/GJ (NG 3-6 €/GJ) (20,000-250,000 Nm ³ /h)	
	with CCS	Prototypes in development	✓		19-22 €/GJ (<20,000 Nm ³ /h)	21-25 €/GJ NG 6 €/GJ (2020)
Coal gasification	no CCS	Commercial plant		✓	8-10 €/GJ (Coal 1.5-2 €/GJ)	-
	with CCS	Prototypes in development		✓	-	10-12 €/GJ Coal 2 €/GJ (2020)
Biomass gasification	Pilot plants	Low	✓	✓	10-25 €/GJ	10-20 €/GJ (2020)
Biological processes	Lab stage	Low		✓	-	-

Electrolysis Electricity from electric grid	Commercial units	*	✓	✓	25 €/GJ (EE 0.025 €/kWh) 200 €/GJ (EE 0.20 €/kWh)	15-30 €/GJ EE 0.03 €/kWh (2030)	
Thermochemical cycles	solar	R&S stage	Zero		✓	-	20-30 €/GJ (2030)
	nuclear	R&S stage	Zero		✓	-	10-20 €/GJ (2030)

* The CO₂ emissions are those produced in the electric energy generation phase

Figura 5.7 – tabella panoramica dei processi di produzione dell'idrogeno [16]

5.3 Trasporto e stoccaggio dell'idrogeno

Il trasporto e lo stoccaggio rappresentano gli aspetti infrastrutturali più problematici dell'idea dell' "Economia dell'idrogeno". Infatti nel momento in cui si pensa all'utilizzo dell'idrogeno come combustibile pulito, in quanto esso genera acqua come unico prodotto della sua combustione, per abbattere le emissioni inquinanti prodotte dai motori a combustione interna nel settore dei trasporti, bisogna pensare a dei sistemi di trasporto dell'idrogeno a bordo del veicolo sufficientemente efficienti, tali da permettere al veicolo di percorrere distanze ragionevoli se paragonate a quelle coperte con motori alimentati con i tradizionali combustibili fossili.

[16] Hydrogen as Future Energy Carrier: The ENEA Point of View on Technology and Application Prospects
Autori: Mario Conte, Francesco Di Mario Agostino Iacobazzi, Antonio Mattucci, Angelo Moreno e Marina Ronchetti.

Data pubblicazione articolo: 23 Marzo 2009

L'idrogeno può essere conservato e trasportato come gas ad alta pressione, come liquido a bassa temperatura e a pressione atmosferica oppure sotto forma di sostanze chimiche dove l'idrogeno è legato in modo stabile ma reversibile. Nel caso di H₂ allo stato liquido il trasporto è associato allo stoccaggio, in quanto deve avvenire all'interno di speciali serbatoi isolati termicamente. [20]

In tabella viene riportato un confronto tra le proprietà dell'idrogeno e quelle di altri combustibili. L'ampio intervallo del campo di infiammabilità, la bassa energia di accensione minima, come l'elevata velocità di propagazione di fiamma in aria, evidenziano quanto sia problematico e rischioso immagazzinare e trasportare idrogeno a bordo del veicolo.

PROPRIETÀ	H ₂	CH ₄	BENZINA (—CH ₂ —)
Potere calorifico inferiore (MJ/kg)	120	50	45
Temperatura di autoaccensione (°C)	585	540	228-501
Temperatura di fiamma (°C)	2.045	1.875	2.200
Limiti di infiammabilità (% volume)	4-75	5,3-15	1,0-7,6
Energia di accensione minima (mJ)	0,02	0,29	0,24
Propagazione della fiamma in aria (m/s)	2,65	0,4	0,4
Coefficiente di diffusione in aria (cm ² /s)	0,61	0,16	0,05
Tossicità (ppm)	0	0	500

Figura 5.8 – Proprietà chimico-fisiche di alcuni combustibili (Schlapbach e Zuttel, 2001) [20]

L'idrogeno allo stato di gas in pressione (10-20 MPa) all'interno di tubi o bombole in acciaio è il metodo di trasporto più comune. L'aspetto più delicato di questo metodo di trasporto riguarda l'infragilimento dell'acciaio, questo fenomeno è noto ed è particolarmente evidente negli acciai ad alta resistenza. Esso dipende dal fatto che la molecola si dissocia e l'idrogeno atomico diffonde nell'acciaio, ciò può avvenire nelle diverse fasi di vita dell'acciaio o durante il suo impiego a causa della corrosione. L'infragilimento corrisponde ad un calo della capacità di

[20] Enciclopedia degli idrocarburi Treccani – Volume III / Nuovi sviluppi: energia, trasporti, sostenibilità. (http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_3/idro_vol_3_ita.pdf)

deformarsi plasticamente e porta alla frattura improvvisa del condotto o della bombola (esplosione). Inoltre il basso contenuto energetico per unità di volume dell'idrogeno comporta un notevole ingombro in termini di dimensioni e peso della bombola, rendendo complesso il montaggio di quest'ultima a bordo del veicolo.

Nel caso di idrogeno liquefatto gli strumenti di conservazione e trasporto devono avere caratteristiche molto differenti. L'idrogeno a pressione ambiente, infatti, liquefa ad una temperatura di -253°C , quindi i contenitori adibiti al suo trasporto e stoccaggio devono avere requisiti di isolamento termico molto severi. Unica soluzione è quindi l'utilizzo di costosi serbatoi criogenici. Inoltre il punto debole di tali serbatoi risiede nel fatto che circa l'1-2% in peso di idrogeno al giorno viene perso per evaporazione. Se pensiamo al caso dell'autovettura questo significherebbe che nel giro di pochi giorni di inutilizzo del veicolo il serbatoio si svuoterebbe in maniera autonoma a causa del riscaldamento ed evaporazione dell'idrogeno contenuto in esso.

Per superare le problematiche tipiche delle prime due tecnologie, per trasportare e stoccare grandi quantità di idrogeno si è pensato di utilizzare composti chimici ricchi di H_2 , come gli idruri alcalini, il metanolo, l'ammoniaca, il metilcicloesano, il sodio boridruro e molti altri, i quali verrebbero consegnati alle stazioni di distribuzione per la produzione in sito. Tali composti vengono chiamati idruri chimici, essi sono capaci di acquisire e cedere idrogeno in maniera reversibile, infatti una volta prelevato l'idrogeno presente in esso possono essere ri-idrogenati per un nuovo utilizzo. Questa tecnologia assume una certa importanza all'interno dello scenario del trasporto di H_2 in quanto sono sistemi facilmente maneggiabili, sono tecnologicamente commerciabili ed esiste già un'infrastruttura ben radicata.

5.3.1 Trasporto e stoccaggio innovativi

Viste le difficoltà nell'applicazione on-board delle tecnologie classiche, la ricerca, come affermato nell'enciclopedia Treccani, negli ultimi anni ha spostato il proprio interesse verso sistemi di stoccaggio innovativi

destinati al settore automobilistico. I paesi industrializzati sono quindi impegnati nello stoccaggio a bordo, in altre parole nella ricerca di un serbatoio ideale che sia leggero, poco ingombrante, poco costoso, sicuro e infine, ma non meno importante, ricaricabile in poco tempo presso apposite stazioni di servizio, come avviene per i serbatoi dei motori a combustione interna benzina e diesel.

Il DOE (Department of Energy) degli Stati Uniti segue da molti anni questo progetto e ha stabilito degli obiettivi inerenti all'energia per unità di massa, alla frazione in peso del serbatoio e alla densità di energia che permettano a una vettura di media cilindrata (50kW) un'autonomia di 400 km. Tali obiettivi vengono riportati nella tabella sottostante.

ANNO	ENERGIA PER UNITÀ DI MASSA (kWh/kg)	FRAZIONE DEL SERBATOIO (% peso)	DENSITÀ DI ENERGIA (kWh/l)
2005	1,5	4,5	1,2
2010	2,0	6,0	1,5
2015	3,0	9,0	2,7

Figura 5.9 – Obiettivi del DOE per serbatoi di idrogeno per autoveicoli [20]

Per dare una visione realistica del problema la fonte [20] riporta una serie di dati numerici: per percorrere 400 km il consumo di benzina di un'autovettura è in media di 30 kg, nelle stesse condizioni servono 8 kg di idrogeno mentre per un veicolo dotato di fuel cell ne servono 4 kg.

4 kg di H₂ a temperatura e pressione ambiente occupano un volume di 45 metri cubi, pari a un serbatoio sferico di circa 5 metri di diametro. Nel caso di gas in pressione, invece, per conservare 4 kg di H₂ a 20 MPa servirebbe un contenitore da 225 litri, equivalente a circa 5 bombole in acciaio, è evidente quindi che sarebbe impensabile montare serbatoi di tali dimensioni a bordo del veicolo.

Le soluzioni al problema sono sostanzialmente due: la prima, più vicina all'idea di serbatoio tradizionale che permetta di fare rifornimento presso una stazione di servizio, prevede l'utilizzo di materiali di ultima generazione e leghe ultra leggere

[20] Enciclopedia degli idrocarburi Treccani – Volume III / Nuovi sviluppi: energia, trasporti, sostenibilità. (http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_3/idro_vol_3_ita.pdf)

come il carbonio e il Kevlar per la realizzazione di bombole più resistenti, che non presentino problemi di fragilità (come quelle in acciaio) e capaci di sopportare pressioni più elevate in modo tale da comprimere una maggiore quantità di idrogeno in volumi minori. In alternativa prevede la realizzazione di specifici contenitori per l'idrogeno liquefatto capaci di limitarne l'evaporazione grazie ad appositi circuiti refrigeranti che attraversano il serbatoio. Sempre rimanendo legati all'idea di serbatoio, si stanno sviluppando nuove tecnologie, basate sull'intrappolamento dell'idrogeno all'interno degli idruri metallici, come le nanostrutture in carbonio, le microsfele di cristallo e i materiali adsorbenti, con l'obiettivo di aumentare la capacità di assorbimento riducendo le dimensioni del serbatoio.

La seconda soluzione invece prevede lo sviluppo di sistemi capaci di produrre, e non di trasportare, idrogeno direttamente a bordo. Tra tali sistemi citiamo l'utilizzo dello steam reformer, i reattori per la produzione di idrogeno e i sistemi per la produzione di ossidrogeno tutti operanti a bordo del veicolo. Essi sono sistemi in via di sviluppo, ma sembrerebbero una soluzione molto interessante.

Capitolo 6

Produzione di Ossidrogeno on-board per l'alimentazione dei mci

Viste le difficoltà ed i pericoli che vi sono nello stoccaggio sul veicolo dell'idrogeno, al fine di utilizzarlo come combustibile per i motori a combustione interna, e vista la necessità, sempre più premente, di ridurre le emissioni inquinanti prodotte da quest'ultimi, si è pensato di realizzare un dispositivo capace di produrre una miscela di ossigeno ed idrogeno, chiamata ossidrogeno o gas di Brown, a bordo del veicolo.

Una volta prodotta la miscela, essa viene direttamente convogliata nel collettore di aspirazione e quindi nei cilindri del motore dove si miscela con il combustibile per dare il via ad un processo di combustione che generi una minore quantità di sostanze nocive allo scarico. Così facendo non vi è più la necessità di trasportare il combustibile in pericolose, pesanti e ingombranti bombole.

6.1 Il gas di Brown

Il gas di Brown è per una piccola parte composto da una miscela di idrogeno ed ossigeno, prodotti da un elettrolizzatore mediante il processo di elettrolisi, e per gran parte da "acqua", che rispetto alla normalità, possiede due elettroni in più, caratteristica che la rendono carica elettricamente.

L'acqua a temperatura ambiente è normalmente liquida grazie alla sua struttura dipolare che permette la formazione di legami "a idrogeno" tra le parti cariche delle molecole. Quando invece si forma una struttura lineare H-O-H, che prende il nome di ossidrogeno, le molecole non sono più polari, non si formano legami "a idrogeno" tra di esse e non ci sono forze che tengano l'ossidrogeno legato in forma liquida a temperatura ambiente.

L'ossidrogeno o gas di Brown viene quindi definito da L. Saporito, come una miscela di gas di idrogeno e ossigeno tipicamente nella proporzione atomica di 2:1, come nel caso dell'acqua. Esso a temperatura e pressione ambiente presenta

un campo d'infiammabilità che si estende tra il 4% e il 94% di volume in idrogeno con una fiamma alla temperatura di circa 2000° C.

L'ossidrogeno brucia nel momento in cui viene portato alla temperatura di ignizione, circa 120° C, producendo energia e vapore acqueo. La quantità di calore sviluppato è, secondo Saporito di 34,116 calorie per ogni grammo di idrogeno bruciato. Inoltre egli afferma che i due gas che compongono la miscela, se adoperati nelle stesse proporzioni presenti nell'acqua, presentano effetti interessanti. I due elementi miscelati, infatti, non generano esplosioni e una volta riuniti, a mezzo di una scintilla implodono generando un gas. Il gas prodotto non esala emissioni nocive, è inodore e non nuoce se inalato. Inoltre se opportunamente innescato esso produce una fiamma sicura, in quanto nonostante riesca a vaporizzare molti materiali, anche quelli che presentano temperature di vaporizzazione molto elevate, emana temperature relativamente basse che non comportano vampate di calore o bruciature per chi vi è nelle vicinanze. [21]

6.1.1 L'ossidrogeno nel settore dell'autotrazione

Se utilizzato diluito insieme ai tradizionali combustibili per l'autotrazione, l'ossidrogeno porta a diversi vantaggi che L. Saporito riporta nel suo articolo. Egli infatti afferma che applicando il dispositivo per la produzione di ossidrogeno on-board a qualsiasi tipo di veicolo dotato di motore a combustione interna, partendo dalle autovetture, passando per i mezzi pesanti come autobus e tir, fino ad arrivare a piccole imbarcazioni si ha:

- Notevole risparmio di carburante, che in media oscilla tra il 20-40%
- Aumento delle prestazioni e della potenza: il combustibile diluito infatti brucia completamente e in maniera più rapida.
- Riduzione delle emissioni di CO₂ fino a valori dell'80%.
- Riduzione della produzione di incombusti e depositi carboniosi all'interno del motore

[21] "Gas di Brown: un'energia per il futuro" Luciano Saporito (http://www.hydrobetatron.org/files/GAS-DI-BROWN_Articolo.pdf)

- Diminuzione delle temperature massime, con conseguente vantaggio per la longevità del motore stesso.
- Riduzione della rumorosità del motore, grazie a un processo di combustione meno brusco. [21]

Questi vantaggi sono frutto del principio caratterizzante il gas di Brown, esso quando brucia produce acqua. L'acqua raffredda la camera di combustione del motore, ne conseguono minori temperature e minore usura delle parti meccaniche.

Temperature massime minori permettono di raggiungere rapporti di compressione più elevati, che significa prestazioni migliori.

L'aggiunta d'idrogeno diluito al combustibile comporta una combustione completa e regolare con conseguenti vantaggi in termini di emissioni inquinanti. Inoltre se l'utilizzo d'idrogeno viene implementato con una combustione magra e una modifica idonea del rapporto aria/combustibile allora si registrano vantaggi anche a livello di consumi e costi.

In conclusione, Saporito, supportato da dati e analisi computazionali, afferma che complessivamente l'aumento di efficienza di un motore a combustione interna che utilizza ossidrogeno come combustibile, è di gran lunga maggiore rispetto ai consumi energetici richiesti per la generazione dell'idrogeno direttamente a bordo del veicolo. Questo rende quindi efficiente anche da un punto di vista economico l'intero sistema. [21]

6.2 Il dispositivo

Il dispositivo viene solitamente alloggiato all'interno del bagagliaio del veicolo e collegato al motore tramite l'impianto mostrato nella figura sottostante:

[21] "Gas di Brown: un'energia per il futuro" Luciano Saporito (http://www.hydrobetatron.org/files/GAS-DI-BROWN_Articolo.pdf)

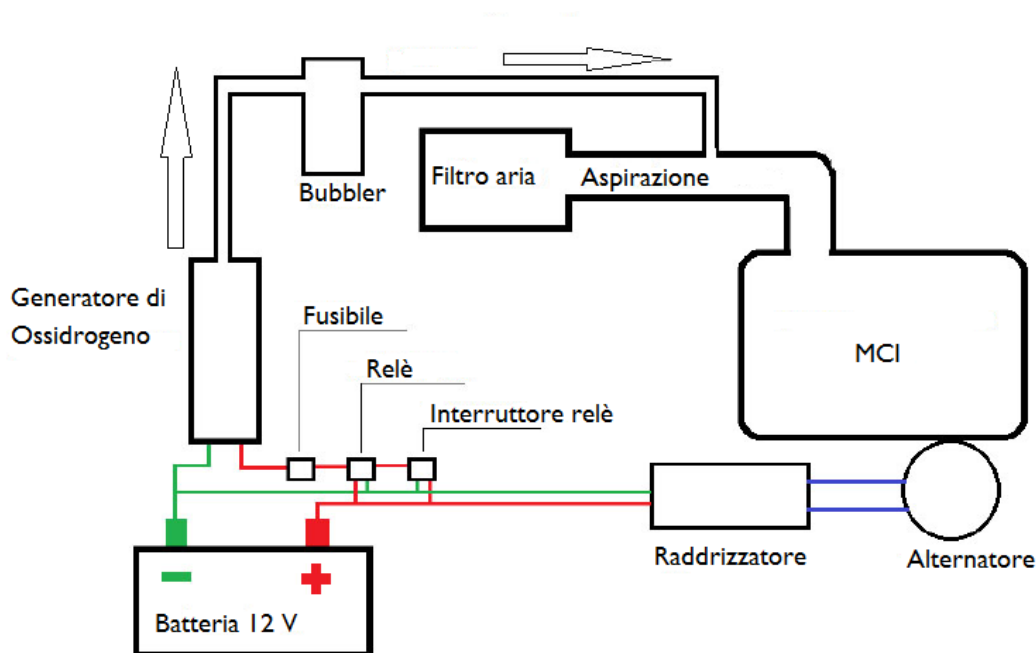


Figura 6.1 – Schema d’installazione del dispositivo [22]

Come possiamo vedere, l’impianto nel suo insieme risulta essere molto semplice. Il generatore di ossidrogeno, che consiste in una cella elettrolitica per la produzione di idrogeno dall’acqua mediante processo di elettrolisi, viene alimentato dai morsetti della batteria 12V montata sul veicolo, ricaricata a sua volta dall’alternatore.

Subito dopo il generatore troviamo installato il Bubbler, una vaschetta di acqua che grazie anche al supporto di una valvola di non ritorno impedisce il flusso inverso del carburante eliminando così il pericolo del ritorno di fiamma.

L’ossidrogeno prodotto passa quindi nel condotto di aspirazione, attraverso il quale raggiunge la camera di combustione del motore.



Figura 6.2 – cella elettrolitica posizionata nel bagagliaio [22]

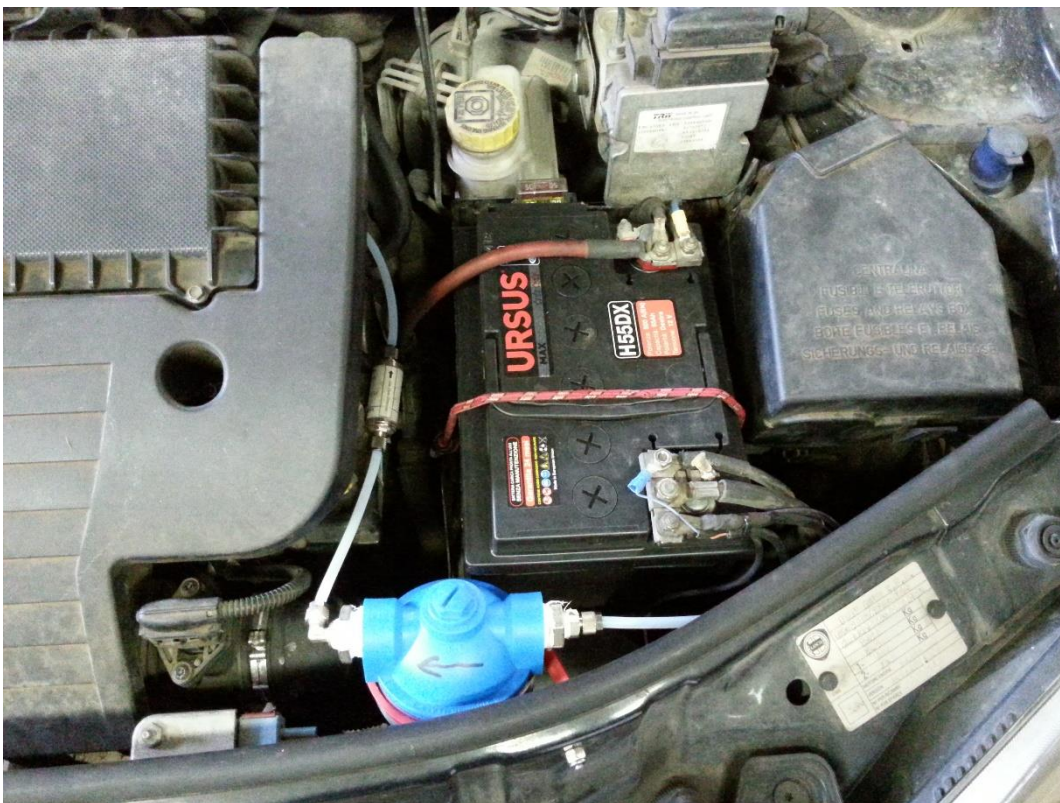


Figura 6.3 – Particolare del bubbler e della valvola di non ritorno [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016



Figura 6.4 – Particolare del fusibile di alimentazione dell’impianto [22]

Inserendo o disinserendo il fusibile mostrato nella figura qui sopra, è possibile, in maniera agevole, azionare o escludere l’impianto di produzione dell’ossidrogeno. In tale maniera è possibile effettuare prove sulle emissioni del veicolo sia con il dispositivo di produzione dell’HHO inserito sia nel caso contrario senza eccessive perdite di tempo che porterebbero alla variazione delle condizioni al contorno, come temperatura ambiente, umidità e temperatura del motore, e di conseguenza a variazioni dei risultati finali delle prove.

6.3 Le prove

Analizziamo ora le prove svolte presso ENEA, circa il progetto CIRPS, riportate da Scocozza nella sua tesi. I veicoli sui quali è stato montato il dispositivo per la produzione di ossidrogeno sono una Renault Clio del 2006, dotata di motore 1200cc a benzina euro 4 ed una Lancia Y 1300cc, diesel euro 3 del 2004.

[22] “Valutazione degli effetti dell’ossidrogeno nei motori a combustione interna” Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

Le prove, per avere un confronto tra le varie situazioni, vengono svolte sia prima dell'installazione a bordo del dispositivo sia dopo l'installazione. Inoltre una volta montato il dispositivo si effettuano misurazioni sia con il dispositivo acceso che nel caso di dispositivo spento e consistono in:

- Misurazione della coppia e della potenza erogate dal motore al variare del numero dei giri
- Monitoraggio del veicolo in condizioni stazionarie
- Simulazione del funzionamento del veicolo su strada.

6.3.1 Misure di coppia e potenza al variare del regime di rotazione

Martarelli, nel corso di "Misure meccaniche e termiche" definisce la coppia come il momento meccanico delle forze esercitato da un elemento generatore, nel nostro caso il motore, su un elemento utilizzatore attraverso un albero di trasmissione. La potenza di un sistema meccanico è invece definita come il prodotto tra la forza applicata F e la velocità v con cui trasla, su un albero rotante. Quindi la potenza è il prodotto tra la coppia C e la velocità angolare w .

$$P = \vec{F} \times \vec{v} \quad [W] = \left[\frac{Nm}{s} \right] = \left[\frac{J}{s} \right]$$

$$P = \vec{C} \times \vec{\omega} \quad [W] = \left[Nm \frac{rad}{s} \right]$$

unità SI watt

[23]

Per effettuare queste misurazioni è necessario posizionare il veicolo su un banco a rulli dinamometrico, in questo caso i dati fanno riferimento a prove condotte sul banco LPS 1300 della MAHA (MaschinenbauHaldenwang GmbH e Co. KG), che garantisce un errore di misura del 2%.

Il funzionamento del banco si basa sul principio dell'induzione magnetica, esso infatti, è dotato di un rotore ad alta permeabilità magnetica, posto in rotazione dal motore del veicolo mediante le ruote, che ruota all'interno di uno statore.

La variazione del flusso magnetico, dovuta al movimento del rotore, genera delle correnti parassite che vengono captate da appositi sensori come segnali elettrici. Questi segnali vengono quindi tradotti in misure di coppia e potenza.

Il banco oltre alla potenza, misura la velocità di rotazione dei rulli, attraverso la quale si possono calcolare i giri del motore, infatti prima della prova effettiva viene effettuato un test di marcia che permette di stabilire la relazione che intercorre tra i numeri di giri dei rulli e il numero di giri del motore. Nella pratica si porta il motore a 2000 giri al minuto innestando la quarta marcia e il software del banco ricava il rapporto tra velocità dei rulli e del motore, in modo da effettuare in seguito la conversione in tempo reale nella prova effettiva.

La prova vera e propria, in fase di avviamento, può essere svolta essenzialmente in due modi. Nel primo caso se si utilizza un banco a rulli di nuova generazione il veicolo parte da fermo e si accelera dolcemente fino a raggiungere la velocità di prova, se invece si utilizzano banchi più datati, come LPS 1300, sono i rulli del banco ad essere posti in rotazione in modo tale da trascinare le ruote del veicolo fino alla velocità di avvio misurazione, solo a questo punto si innesta la quarta marcia e si dà il via alla prova. Giunti quindi al massimo regime di rotazione si rilascia l'acceleratore e si preme il pedale della frizione fino ad azzerare la velocità. Durante questa fase di decelerazione il banco misura la potenza dissipata. Sommando la potenza dissipata e quella alla ruota si risale alla potenza del motore dalla quale a sua volta si risale alla coppia erogata.

I dati ricevuti dal banco vengono quindi digitalizzati e convertiti in appositi grafici di semplice lettura, un esempio di questi viene riportato nella figura 6.4, in essa possiamo vedere la curva di potenza norma DIN 70020 che indica la potenza sviluppata in base alle diverse condizioni ambientali. Essa infatti, tiene conto di variazioni dovute alla temperatura T e alla pressione p dell'aria moltiplicando la potenza misurata per un coefficiente correttivo K dato dalla formula:

$$K = \frac{1013}{p[mbar]} * \left(\frac{T[K]}{293} \right)^{0.5}$$

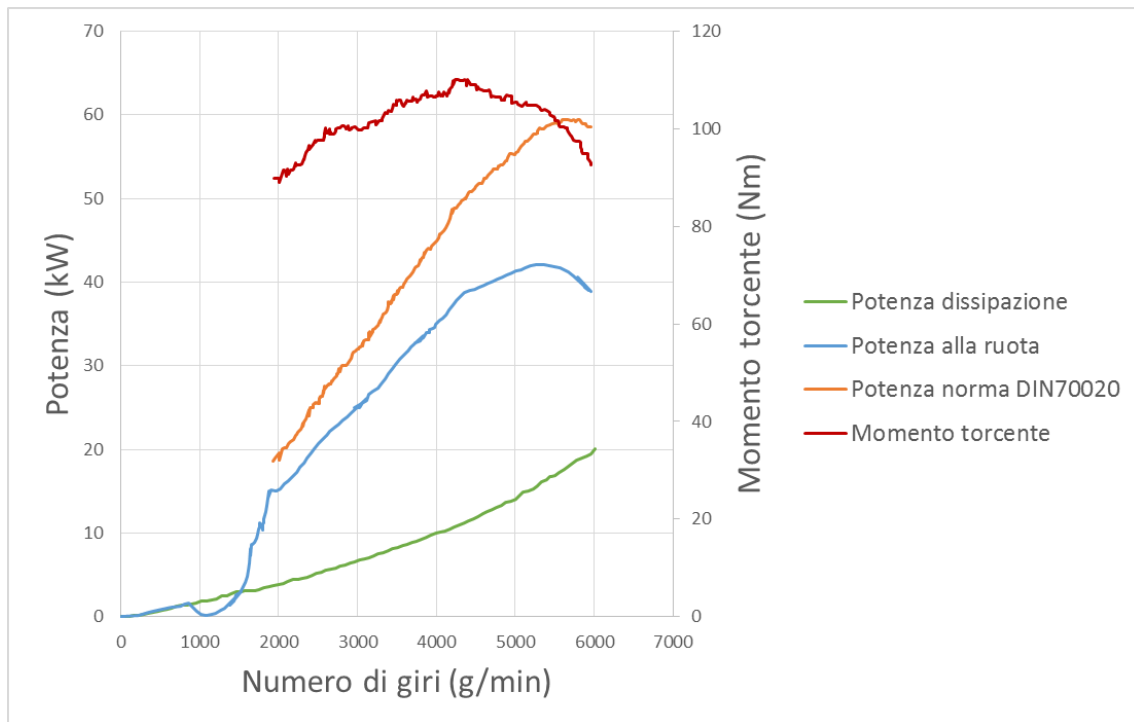


Figura 6.4 – Curve di coppia e potenza Renault Clio, prima dell’installazione del dispositivo [22]

6.3.2 Monitoraggio del veicolo in condizioni stazionarie

La prova svolta presso i laboratori ENEA, prevede l’ancoraggio del veicolo sul banco a rulli, una volta messo in sicurezza, il veicolo viene portato alla velocità prestabilita dalla prova grazie al movimento dei rulli. A questo punto il pedale della frizione viene rilasciato innestando così la marcia e la prova ha inizio.

Durante tutto lo svolgimento di questa prova il numero dei giri del motore e il carico sull’acceleratore non variano mai, requisiti necessari per permettere al motore di lavorare in condizioni stazionarie. Nella realtà queste condizioni sono difficilmente raggiungibili a causa di moltissimi fattori che obbligano il conducente ad una continua variazione della velocità e quindi del numero di giri del motore, ma se consideriamo dei casi approssimativi, quali ad esempio le situazioni che permettono l’innesto di dispositivi di regolazione dei parametri motoristici come il Cruise Control, che riduce in maniera sensibile le variazioni di velocità e rotazione

[22] “Valutazione degli effetti dell’ossidrogeno nei motori a combustione interna” Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

del motore, allora possiamo considerare validi per il confronto i dati ottenuti in laboratorio.

Durante la prova i livelli di velocità e giri del motore sono trasmessi in maniera istantanea dalla centralina del veicolo ad un pc di monitoraggio attraverso la presa di autodiagnosi OBD (On Board Diagnostic). I livelli inquinanti e i dati relativi alla potenza sviluppata dal motore, sono invece registrati utilizzando Horiba OBS 1300.

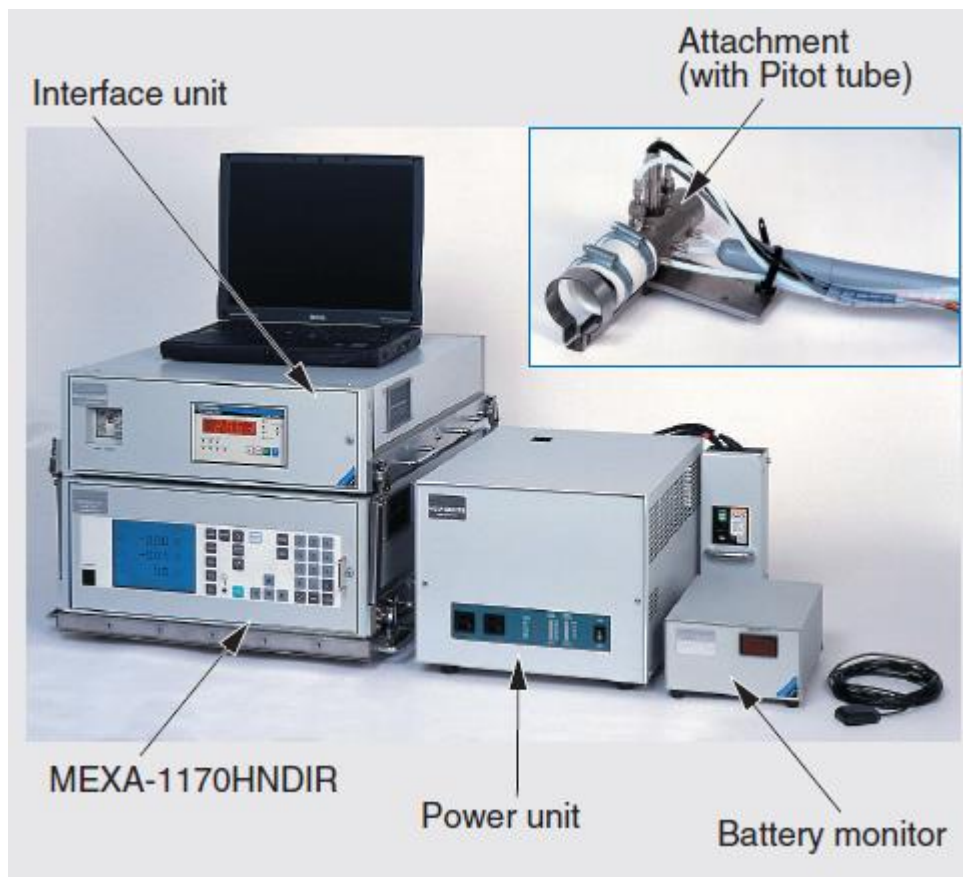


Figura 6.5 – Strumentazione Horiba OBS 1300 [24]

Questa strumentazione presentata da Nobutaka Kihara nell'articolo "The OBS-1000 Series On-board Engine Emission Measurement System", è dotata di un tubo di Pitot, inserito in un apposito attacco da applicare al tubo di scarico del veicolo, che analizza la velocità del flusso gassoso e di un termometro che ne controlla la temperatura. Una serie di sensori, integrati nello strumento, registrano la pressione, la temperatura e l'umidità ambiente.

[24] "The OBS-1000 Series On-board Engine Emission Measurement System" – Horiba Technical Reports - Nobutaka Kihara

Un'antenna gps, permette inoltre, di localizzare il veicolo monitorando le variazioni delle grandezze fisiche misurate al variare di latitudine e longitudine.

L'alimentazione dello strumento è garantita dalla "power unit", mentre il notebook funge da visualizzatore dei dati registrati.

Durante la prova quindi, il flusso dei gas di scarico prodotti dal motore ed espulsi allo scarico, entrano nel tubo di Pitot (di diametro noto) dotato di due fori per la misura delle pressioni.

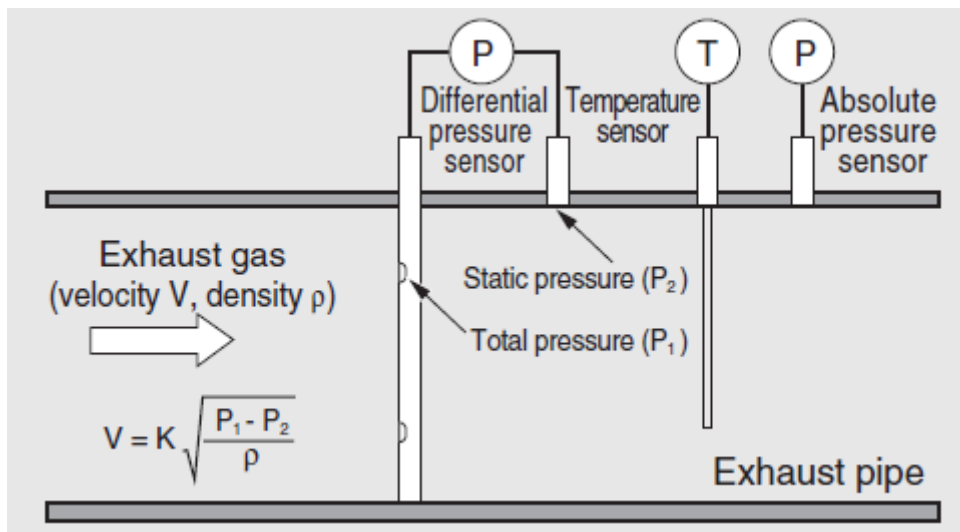


Figura 6.6 – Schema funzionamento tubo di Pitot inserito nella strumentazione per l'analisi del flusso gassoso di scarico [24]

Esso rileva la velocità del flusso calcolando la differenza di pressione che vi è tra quella totale, misurata al foro posto parallelamente al flusso (P_1) e quella statica, misurata al foro perpendicolare al flusso (P_2).

Una volta calcolata la velocità del flusso il pc riesce a trasformare la velocità in portata attraverso il seguente calcolo.

$$Q_{exh}(t) = K \times \sqrt{\frac{P_{exh}(t)}{101.3} \times \frac{293.15}{T_{exh}(t)} \times \frac{\Delta h(t)}{\gamma_{exh}}}$$

$Q_{exh}(t)$: Exhaust gas flow rate (at standard condition)
[m³/min]

K : Coefficient

$P_{exh}(t)$: Exhaust pressure [kPa]

$T_{exh}(t)$: Exhaust temperature [K]

$\Delta h(t)$: Differential pressure of Pitot tube [kPa]

γ_{exh} : Exhaust density at the standard condition [g/m³]

Nota quindi la portata del flusso e la concentrazione degli elementi inquinanti come CO, CO₂, HC e NO_x è possibile risalire alle concentrazioni in massa per ciascuno degli elementi inquinanti citati e al consumo di carburante in base al chilometraggio, mediante i seguenti calcoli:

$$M_x(t) = C_x(t) \times 10^{-6} \times \frac{Q_{exh}(t)}{60} \times \gamma_x$$

$$M_{x_total} = \Sigma M_x(t) \times \frac{1}{L}$$

$M_x(t)$: Mass emission per unit time of component x [g/s]

$C_x(t)$: Concentration of component x [ppm]

$Q_{exh}(t)$: Exhaust flow rate (standard condition) [m³/min]

γ_x : Density of component x at the standard condition
[g/m³]

M_{x_total} : Mass emission per mileage of component x [g/km]

L : Running distance [km]

Tornando alla prova effettuata presso i laboratori di ENEA le prove effettuate su veicoli dotati di motori a benzina son condotte alla velocità di 52 Km/h, ovvero 4250 rpm in seconda marcia, portando il carico al 25%, al 50% e al 60%. Nel caso di veicoli dotati di motore diesel, la velocità impostata è di 49 Km/h, ovvero 2200 rpm in terza marcia con posizione percentuale del pedale dell'acceleratore inizialmente del 25%, per passare poi al 50% e infine al 60%.

Alla fine della prova il pc elabora dei grafici che riportano il consumo di combustibile e di conseguenza le emissioni prodotte al variare del tempo e del carico sull'acceleratore.

6.3.3 Simulazione del funzionamento del veicolo su strada

Per avere una panoramica completa ed il più possibile simile alla realtà, presso i laboratori ENEA viene eseguita un'ultima prova, che riproduce il funzionamento su strada del veicolo secondo il metodo imposto dai cicli ECE-15.

In laboratorio il veicolo viene posto sul banco a rulli e mediante l'ausilio di un software per pc, in questo caso "DriverAid", l'operatore visualizza su monitor le rampe di accelerazione e decelerazione oltre ai cambi di marcia, ed esso ha il compito di mantenere la velocità del veicolo entro i range visualizzati. Al termine del ciclo è quindi possibile valutare le emissioni inquinanti espresse in g/km.

Infine, R. Scocozza, sottolinea come la prova venga svolta solamente a livello di ciclo urbano e non anche extra-urbano, infatti egli afferma che anche se il dispositivo per la produzione di ossidrogeno on-board avesse introdotto dei miglioramenti, è proprio sul tratto urbano che questi si sarebbero potuti meglio apprezzare. [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

Capitolo 7

I risultati delle prove

In questo capitolo si analizzano e confrontano i risultati delle prove, esposte nel capitolo precedente, prima e dopo l'installazione per la produzione di ossidrogeno a bordo del veicolo, presso i laboratori ENEA.

Si analizzeranno pregi e difetti e i risultati per ogni singola prova, partendo da Renault Clio per seguire con Lancia Y.

7.1 – Renault Clio

Renault Clio: anno di produzione 2006, motore 1200cc benzina euro 4.

7.1.1 – Confronto delle curve di coppia e potenza per Clio

Durante le misurazioni di coppia e potenza il software utilizzato, grazie ai dati misurati sul banco a rulli, ha tracciato, come risultato delle prove i seguenti grafici

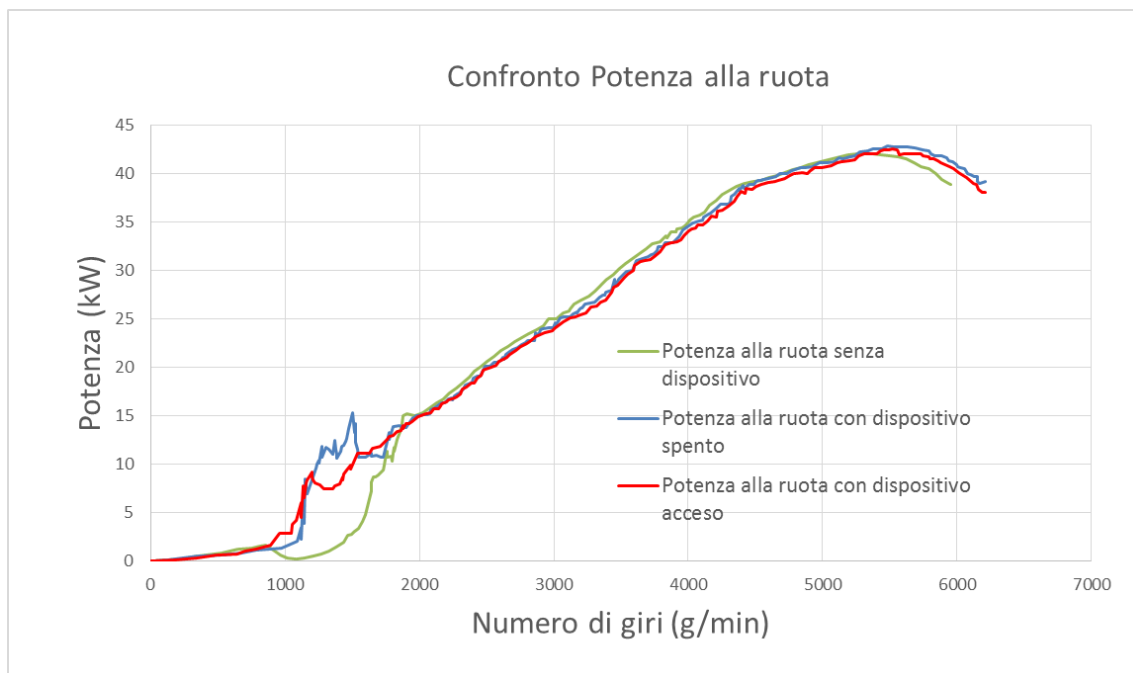


Figura 7.1 – Confronto delle curve di potenza alla ruota. [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

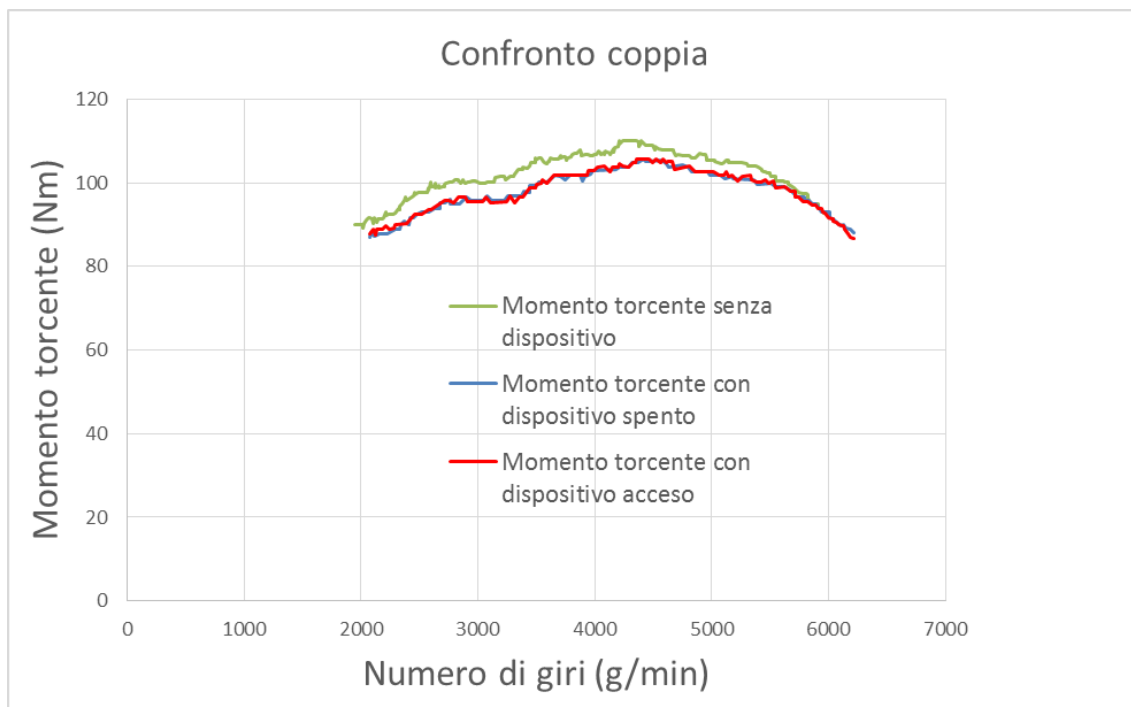


Figura 7.2 – Confronto delle curve di coppia [22]

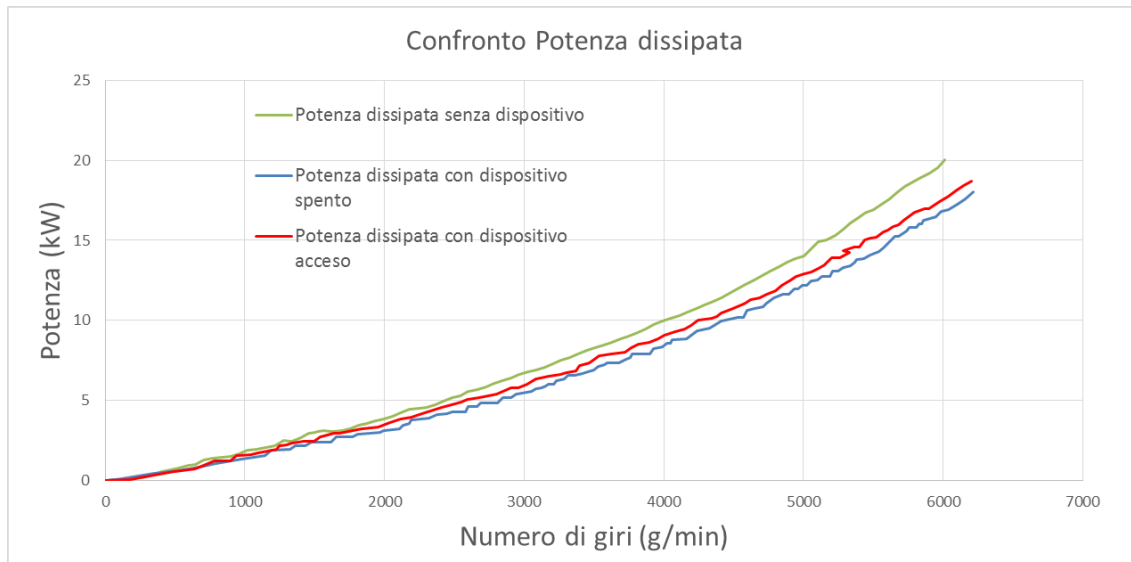


Figura 7.3 – Confronto delle curve di potenza dissipata [22]

Osservando i grafici dobbiamo tenere presente che le curve rappresentanti la coppia del motore, vengono realizzate dal software in seguito al confronto tra le curve di potenza alla ruota e le curve di potenza dissipata.

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

Tali curve pertanto potrebbero risultare falsate a causa delle differenze, immotivate, registrate nelle curve di potenza dissipata. Non vi è alcuna ragione infatti per cui la potenza dissipata cambi in base all'accensione o allo spegnimento del dispositivo. Per questo motivo durante l'analisi si terrà conto della sola potenza alla ruota, la cui unica differenza nei dati si registra tra i dati raccolti nel mese di giugno, prima che il dispositivo fosse installato, e quelli del mese di ottobre, quando il dispositivo era installato ma non funzionante. Tale differenza è da imputare alle variazioni di temperatura e umidità dell'aria ambiente dovute alla lunga distanza temporale intercorsa tra le due prove.

Osservando il primo grafico notiamo come la potenza alla ruota con dispositivo per la produzione di ossidrogeno acceso risulti, per ogni regime di rotazione, leggermente inferiore a quella misurata quando il dispositivo è spento.

Il secondo grafico, ci mostra come la coppia erogata a dispositivo acceso sia sostanzialmente uguale a quella erogata nel caso di dispositivo spento, ma tale coppia risulta di molto inferiore a quella erogata dal motore prima dell'installazione del dispositivo. Tale differenza è causata, come notiamo anche dall'ultimo grafico, dal diverso valore di potenza dissipata. La potenza dissipata infatti dipende da parametri come la temperatura delle ruote o dall'aderenza di esse con i rulli del banco, e non dall'installazione o meno del dispositivo.

7.1.2 Monitoraggio Clio in condizioni stazionarie

Durante le prove a velocità e regime di giri costanti effettuate su Renault Clio benzina, sono stati elaborati i seguenti dati.

Andando ad analizzare i risultati ottenuti circa la potenza sviluppata dal motore durante la prova, possiamo affermare che al variare del carico, la potenza erogata rimane identica per ogni variazione del carico, indipendentemente dal fatto che il dispositivo sia acceso o spento. Tale conclusione, già confermata dal confronto tra le curve di coppia e potenza, viene ulteriormente ribadita dal grafico sotto riportato.

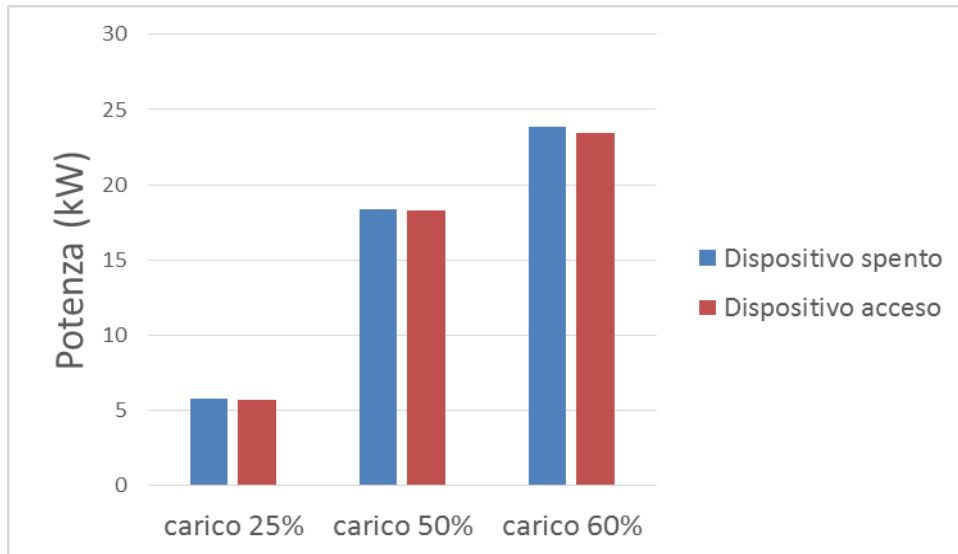


Figura 7.4 – Potenza erogata in condizioni stazionarie e velocità costante [22]

Per quanto riguarda il rendimento del motore, calcolato come:

$$\eta = \frac{P}{m_c * H_i}$$

Dove P indica la potenza erogata, m_c il consumo di combustibile espresso in g/s e H_i il potere calorifico della benzina pari a 43600 J/g, possiamo osservare la figura 7.5. Notiamo come nei casi di carico al 25% e 50% i rendimenti maggiori si registrino quando la cella elettrolitica per la produzione di ossidrogeno sia in funzione, per poi tornare a rendimenti quasi identici nel caso di carico al 60%. In tutti e 3 i casi le differenze di rendimento sono molto piccole, con valori che differenziano per circa l'1%, bisogna quindi considerare tali dati con molta cautela, infatti variazioni così minime potrebbero essere frutto di incertezze di misura e/o dipendere da parametri quali la temperatura e l'aderenza dei pneumatici.

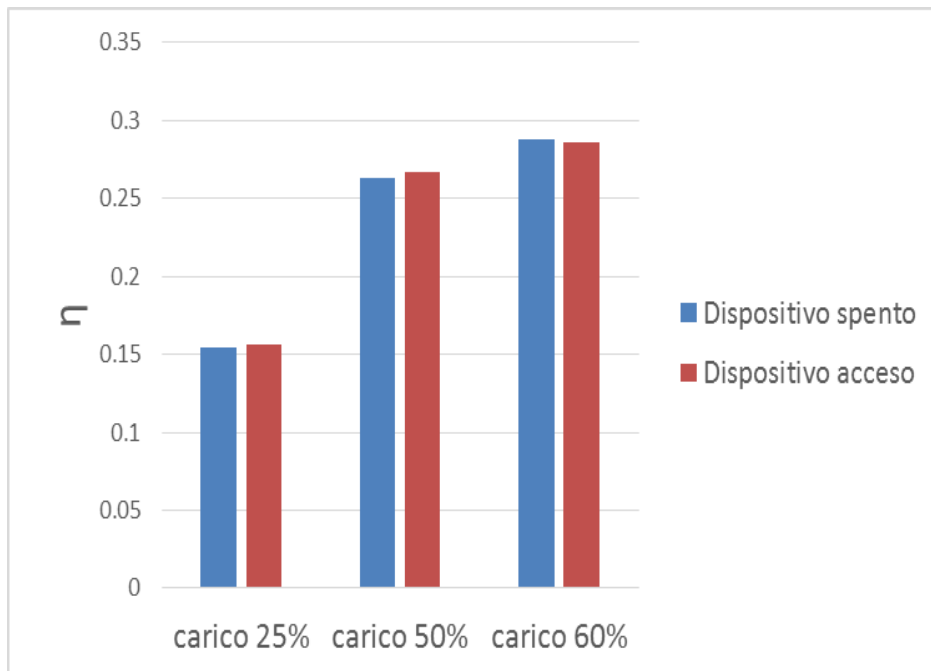


Figura 7.5 – Confronto fra rendimenti a velocità costante [22]

Per questo motivo Scocozza afferma che per avere dati più precisi sarebbe utile limitare la prova al solo motore e non al veicolo nel suo complesso, così facendo si andrebbe a monitorare il solo processo di combustione, che è l'unico sul quale il dispositivo ha un reale effetto. [22]

Effettuare la prova esclusivamente sul motore, sarebbe interessante anche per evitare "disturbi" durante le misurazioni relative alle emissioni inquinanti prodotte dal veicolo, in quanto esse verrebbero effettuate a monte del catalizzatore, il quale ha un diverso impatto sulle emissioni di CO e NOx in base alla temperatura alla quale lavora. Esso infatti rende i dati raccolti, che si presentano altamente oscillanti, inaffidabili per effettuare un confronto tra le due configurazioni d'impianto.

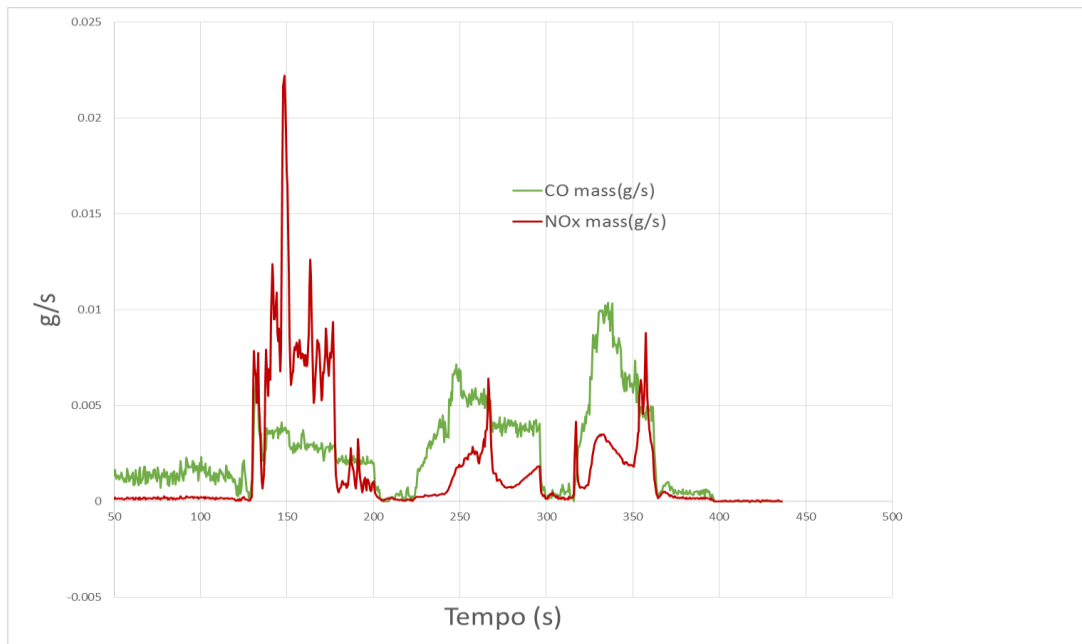


Figura 7.6 – Emissioni di CO e NOx in una prova a velocità costante al variare del carico. [22]

A causa di questo andamento oscillatorio mostratoci nel grafico precedente, risulta più corretto effettuare un'analisi qualitativa, piuttosto che quantitativa delle emissioni prodotte con dispositivo acceso oppure spento.

Per questo motivo prendiamo in considerazione i grafici 7.7 e 7.8

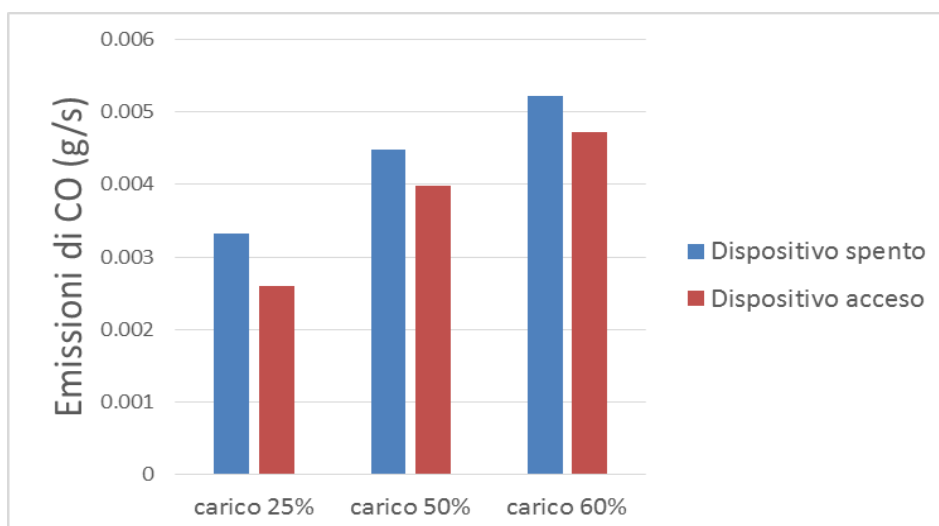


Figura 7.7 – Confronto emissioni CO durante prove in condizioni stazionarie [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

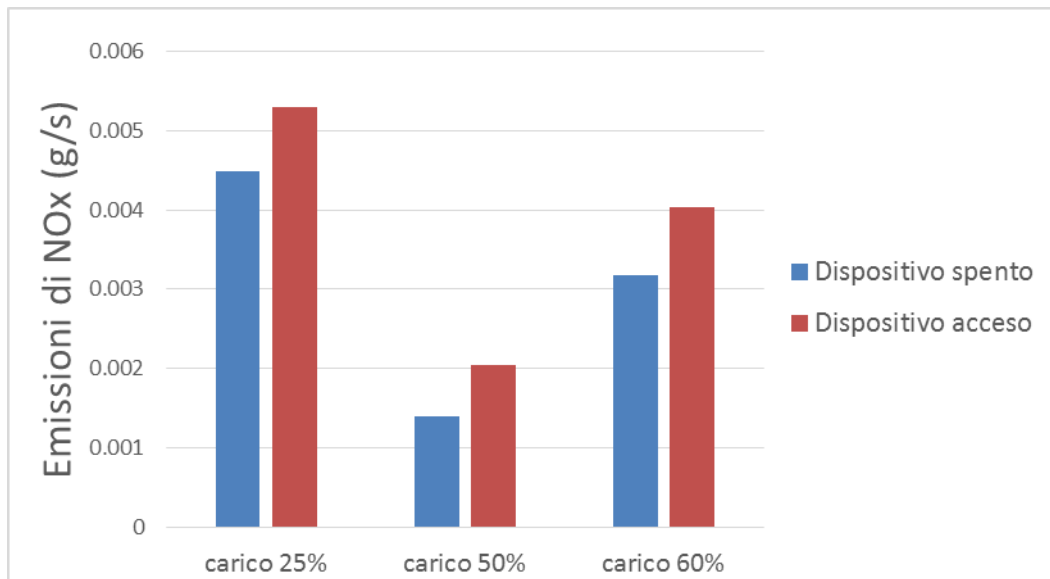


Figura 7.8 – Confronto emissioni NOx durante prove in condizioni stazionarie [22]

Da essi notiamo come nonostante i valori medi, a parità di carico, siano piuttosto diversi tra di loro, nel complesso la loro distribuzione risulti sensata e coerente, infatti all'aumentare del carico aumentano le emissioni di CO ed anche quelle dei NOx, fatta eccezione per la condizione di carico al 25% dove si registrano picchi dovuti al fatto che il motore sia ancora freddo ed il catalizzatore non lavori alla temperatura ottimale. Inoltre notiamo come, diminuiscano le emissioni di CO ed aumentino quelle di NOx quando il dispositivo sia acceso. In questo caso infatti le temperature di combustione sono maggiori a causa della presenza di idrogeno nella miscela combustibile.

7.1.3 Risultati simulazione prova su strada per Clio

Durante lo svolgimento dei cicli ECE-15 bisogna tenere presente che questo tipo di test, per quanto ben eseguiti, sono difficilmente ripetibili ed eseguibili in maniera speculare a causa di diversi parametri, tra i quali le temperature del motore e del catalizzatore, l'aderenza dei pneumatici ai rulli, la miscela più o

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici - università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

meno magra, che influiscono sulle emissioni prodotte e di conseguenza sui dati elaborati dal software.

Un chiaro esempio di quanto sopra esposto lo troviamo analizzando i seguenti grafici.

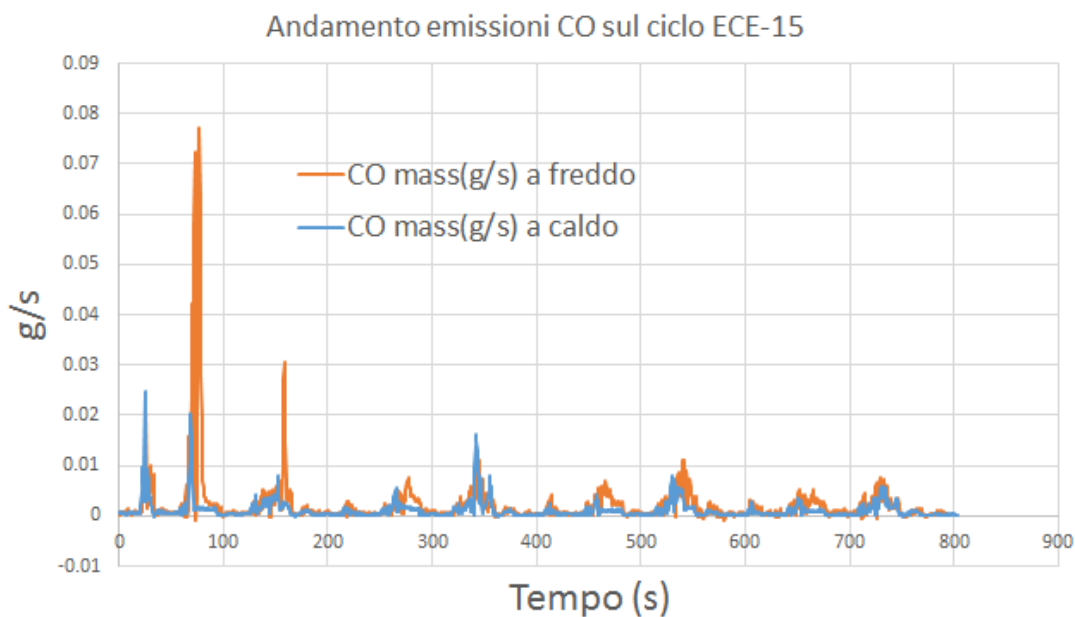


Figura 7.9 – Confronto emissioni di CO fra un ciclo eseguito a motore freddo e uno eseguito a motore caldo. [22]

Fin dal primo grafico di confronto delle emissioni di CO emesse per ogni ciclo ECE-15, ma questo varrà anche per cicli di misura dei NOx come vedremo nel grafico seguente, possiamo notare come le maggiori emissioni inquinanti si registrino nella prima fase della prova a motore freddo. Inoltre lo spiccato moto ondulatorio del grafico oltre a valori discordanti trovati effettuando le medie su tutti i cicli eseguiti, come ad esempio nel caso di dispositivo acceso dove sia le emissioni di CO che quelle di NOx diminuiscono, ci porta a non fidarci ciecamente dei risultati trovati. Per questo motivo si andrà ad effettuare un'analisi semplificata, concentrandosi solamente sulle prove effettuate con motore già in temperatura.

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

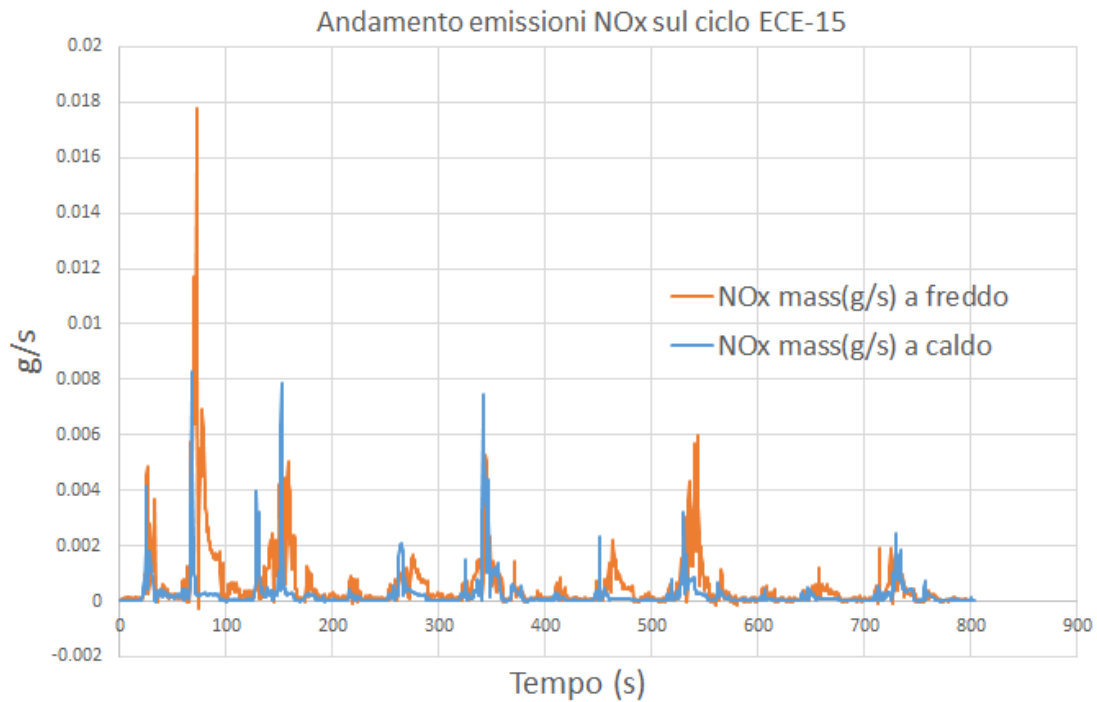


Figura 7.10 - – Confronto emissioni di NOx fra un ciclo eseguito a motore freddo e uno eseguito a motore caldo. [22]

Dalla sola analisi dei cicli eseguiti con motore caldo si deduce che, quando il dispositivo per la produzione di ossidrogeno è acceso:

- I consumi e le emissioni di CO₂ aumentano del 4%
- Le emissioni di CO diminuiscono del -2.9%
- Le emissioni di NOx aumentano del 7% [22]

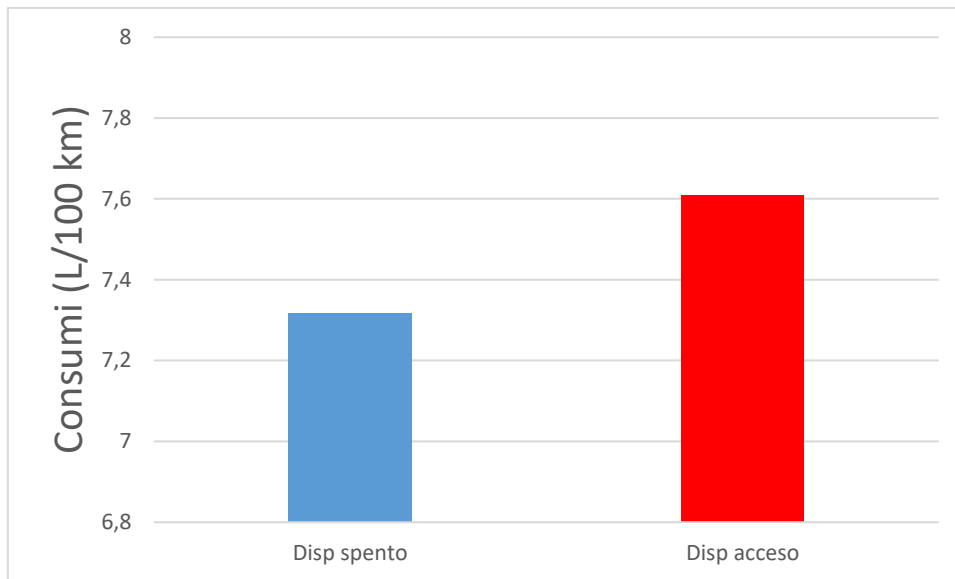


Figura 7.11 – Confronto dei consumi nei cicli ECE-15 con motore caldo [22]

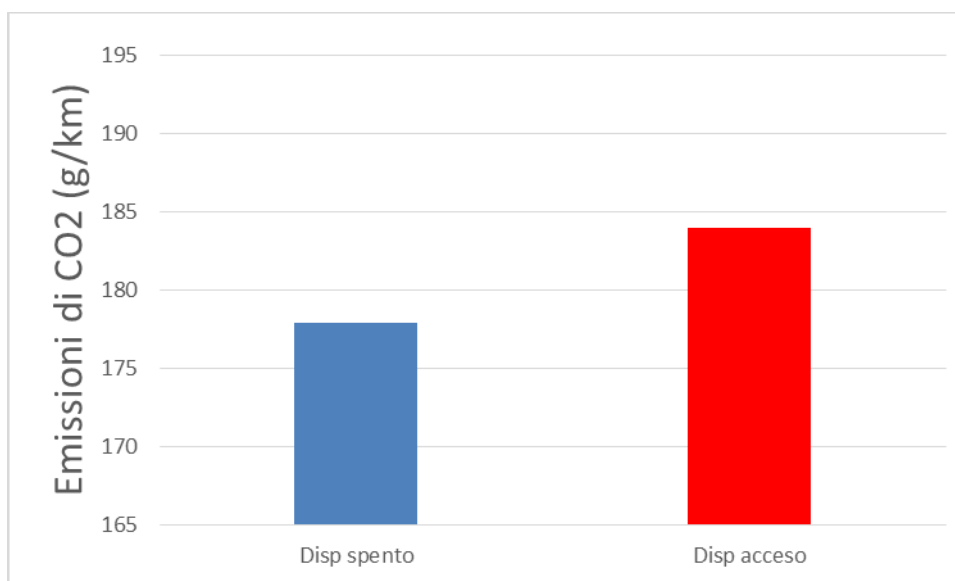


Figura 7.12 - Confronto delle emissioni di CO2 nei cicli ECE-15 con motore caldo [22]

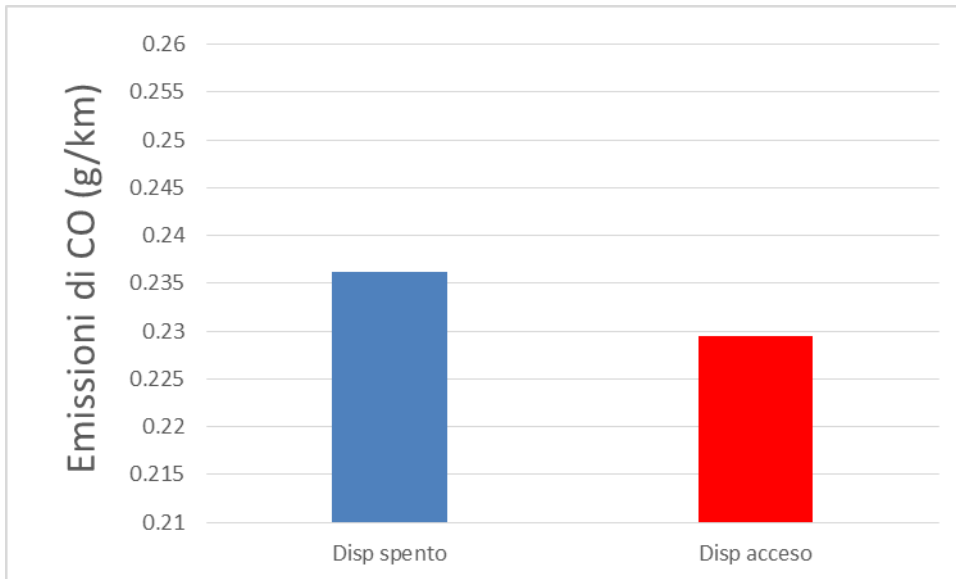


Figura 7.13 – Confronto delle emissioni di CO nei cicli ECE-15 con motore caldo [22]

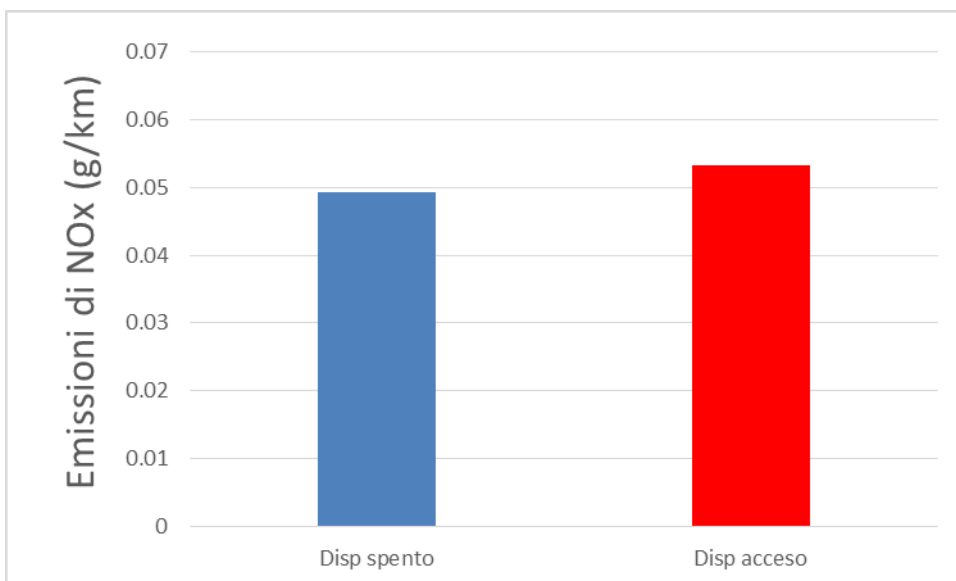


Figura 7.14 - Confronto delle emissioni di NOx nei cicli ECE-15 con motore caldo [22]

7.2 – Lancia Y

In questo capitolo si presentano i risultati ottenuti dalle prove effettuate su Lancia Y: anno di produzione 2004, motore 1300cc diesel euro 3.

Va precisato che l'azienda fornitrice del dispositivo, al momento dell'installazione su Y, ha effettuato anche una modifica della centralina, con l'obiettivo di ridurre la quantità di gasolio iniettato a parità di posizione del pedale, per favorire la combustione dell'idrogeno ed ottenere una miscela più magra. Tuttavia come verrà esposto in seguito, si è ottenuto l'effetto contrario in quanto la modifica sembrerebbe aver portato ad una miscela più grassa con conseguente aumento dei consumi di combustibile.

7.2.1 – Confronto delle curve di coppia e potenza per Y

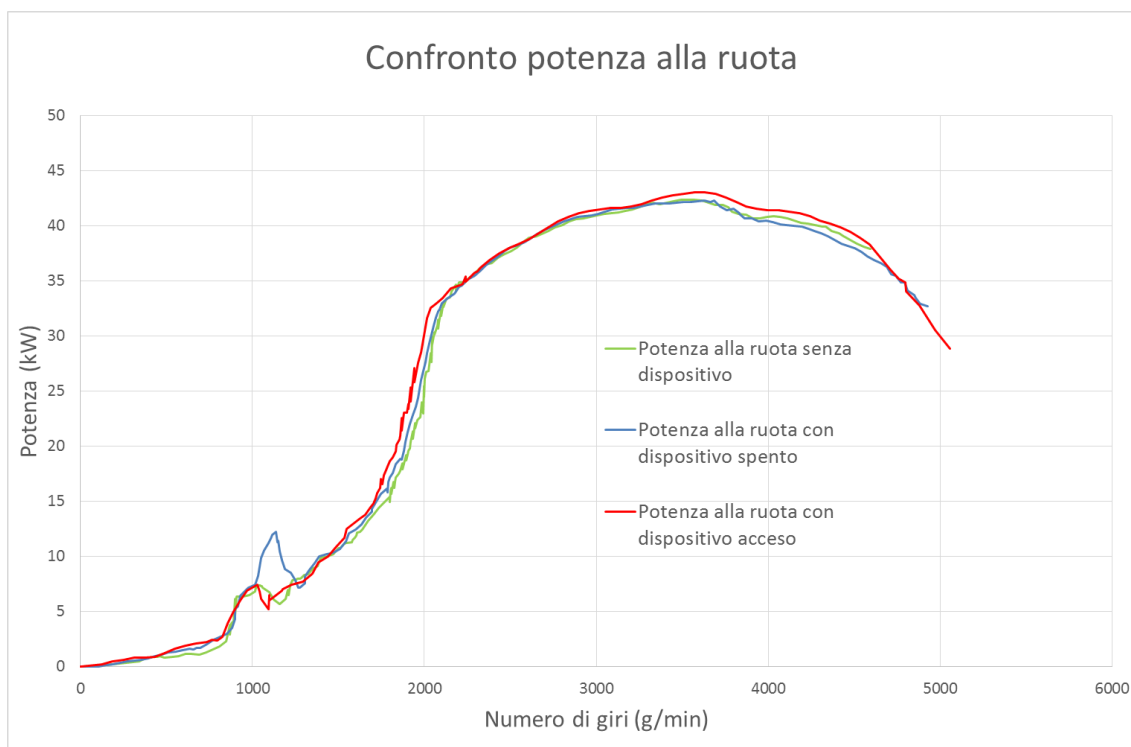


Figura 7.15 – Confronto delle curve di potenza alla ruota in funzione del numero di giri [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scozzoa A/A 2015-2016

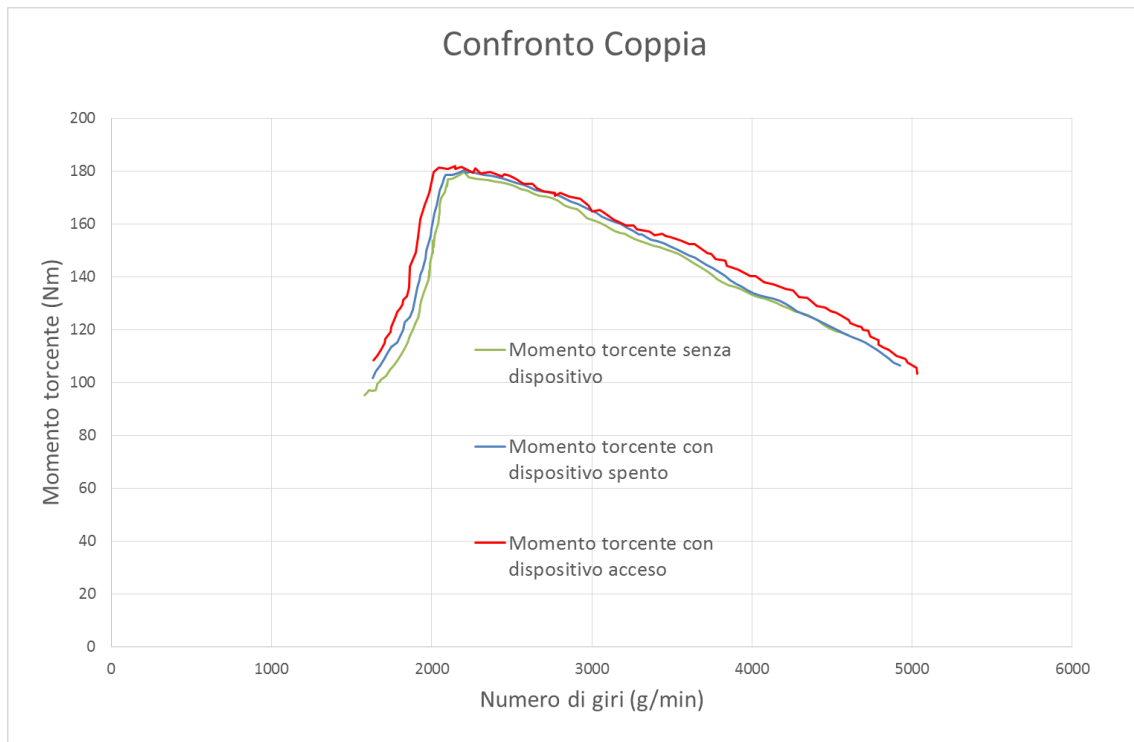


Figura 7.16 – Confronto delle curve di coppia in funzione del numero di giri [22]

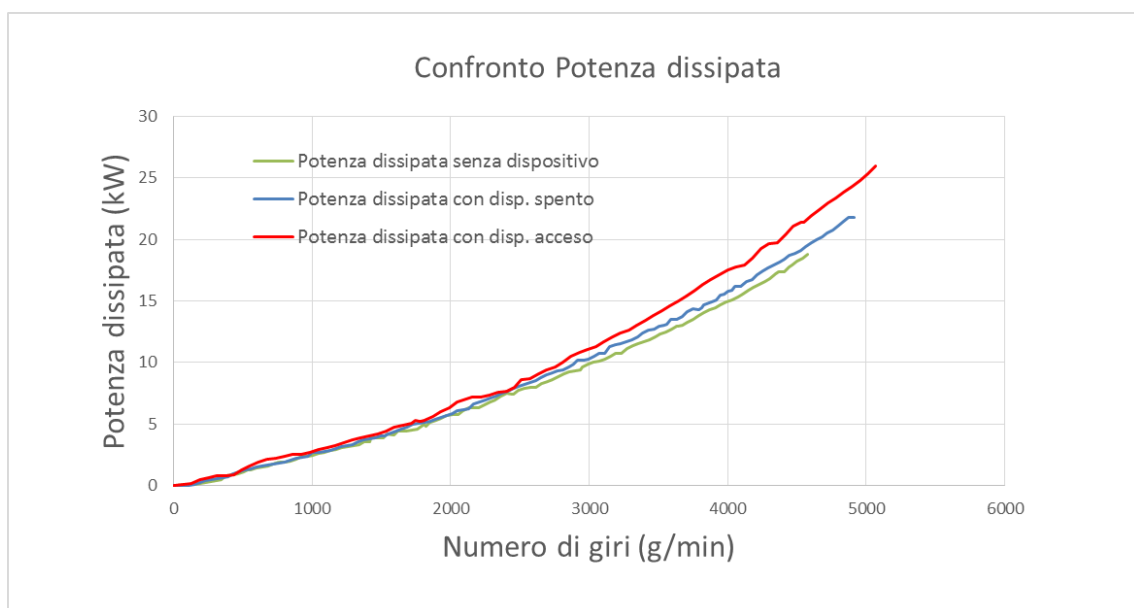


Figura 7.17 – Confronto delle curve di potenza dissipata in funzione del numero di giri. [22]

I grafici tratti dalla tesi di Scocozza, ci mostrano come durante le prove sia stato registrato un piccolo aumento della potenza e della coppia quando la cella elettrolitica era in funzione. Come successo anche durante le prove effettuate su Renault Clio, l'aumento di coppia deriva in parte dall'aumento di potenza dissipata a parità di regime di rotazione.

7.2.2 Monitoraggio Lancia Y in condizioni stazionarie

Durante le prove a velocità e regime di giri costanti, per qualsiasi posizione del pedale, non si registrano grandi variazioni, se non dell'ordine dell'1%, della potenza erogata dal motore sia nel caso di dispositivo acceso che spento.

L'unica eccezione si ha per carico al 25% e dispositivo in funzione, quando la potenza del motore aumenta, ma per contro si registra un aumento del combustibile consumato. Infatti come prima accennato ed ora confermato dai grafici sotto riportati l'installazione del dispositivo e la modifica della centralina, al posto di smagrire la miscela, portano ad un aumento dei consumi per carico pari al 25%. Nei casi di posizione del pedale al 50% e 60% non si registrano invece sostanziali differenze, nel consumo di combustibile, sia nel caso di dispositivo acceso che nel caso di dispositivo spento.

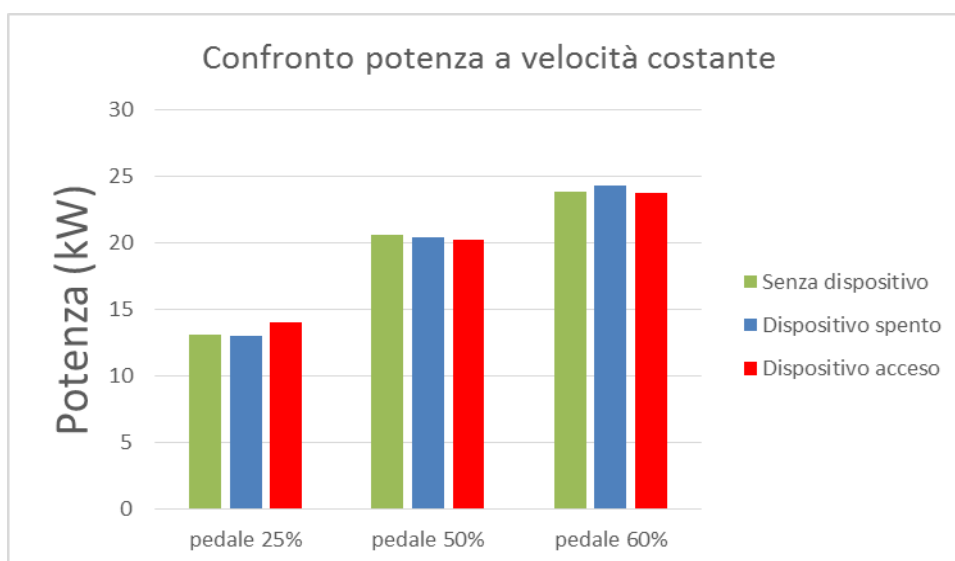


Figura 7.18 – Confronto potenze erogate in condizioni stazionarie [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

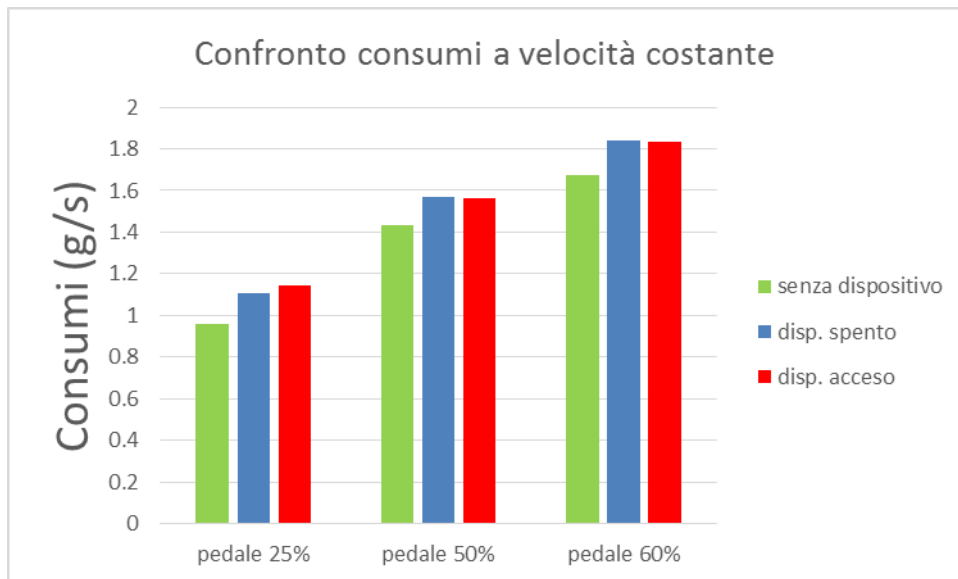


Figura 7.19 – Confronto dei consumi in condizioni stazionarie [22]

Per quanto riguarda il rendimento della vettura in condizioni stazionarie, il grafico ci mostra come:

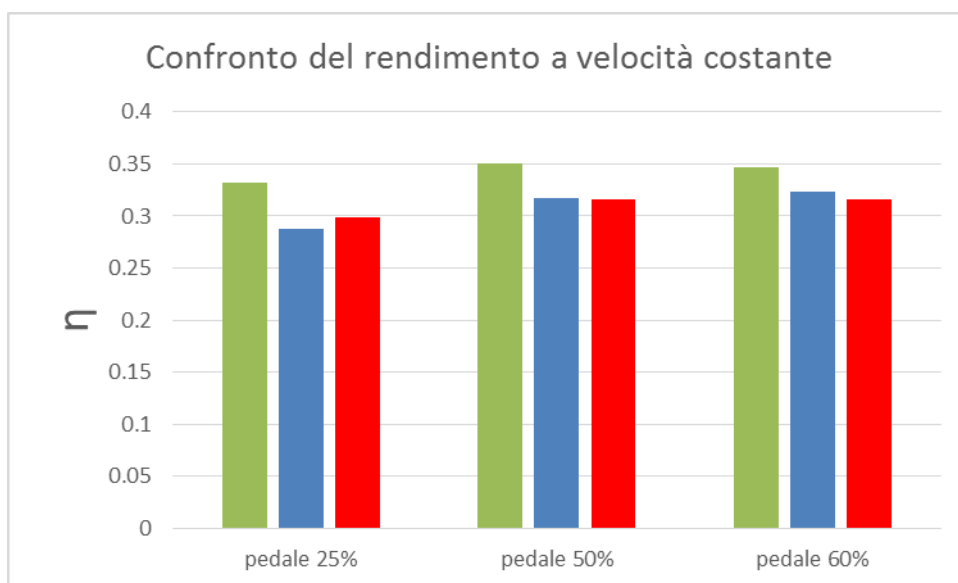


Figura 7.20 – Confronto dei rendimenti in condizioni stazionarie [22]

Esso sia maggiore per tutte e tre le posizioni del pedale prima che il dispositivo fosse installato ed aumenti, leggermente, con dispositivo funzionante solo nel caso di pedale al 25% per peggiorare poi nelle altre due situazioni.

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

La spiegazione a questo comportamento, afferma Scocozza, potrebbe risiedere nel fatto che la portata di ossidrogeno rimane costante per qualsiasi posizione del pedale, risultando quindi insufficiente quando il carico sull'acceleratore e la quantità di gasolio iniettata nel cilindro aumentano.

Infine per quanto riguarda le emissioni inquinanti, a differenza della Clio benzina, Lancia Y diesel non presenta il catalizzatore per l'abbattimento degli NOx, ma si affida unicamente alla tecnica di ricircolo dei gas di scarico EGR. Per questo motivo l'andamento nel tempo delle emissioni risulta più stabile, in quanto non è necessario attendere il tempo necessario al catalizzatore per raggiungere la temperatura di funzionamento ottimale. Le emissioni degli NOx risultano maggiori quando il dispositivo è acceso, l'incremento registrato è di circa del 7% con pedale al 25%, mentre nei casi di pedale al 50% e 60% l'incremento è inferiore al 3%.

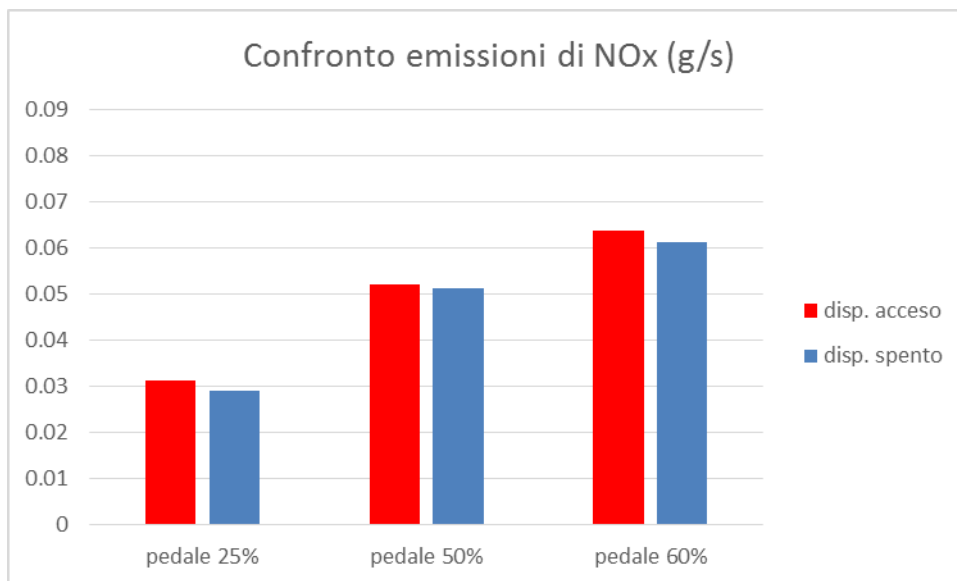


Figura 7.21 – Confronto delle emissioni di NOx in condizioni stazionare [22]

Le emissioni di CO presentano invece oscillazioni ben più marcate dell'ordine del 20% attorno al valore medio, specialmente nel caso di carico sul pedale pari al 25%, quindi risulta difficile effettuare un confronto tra le varie situazioni di funzionamento.

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

7.2.3 Risultati simulazione prova su strada per Lancia Y

Anche le simulazioni di ciclo urbano su strada evidenziano, come confermano i grafici, un aumento dei consumi successivamente alla modifica della centralina e l'aumento di CO₂ e degli NO_x prodotti nel momento in cui il dispositivo per la produzione di ossidrogeno entra in funzione. Le emissioni di CO invece come previsto diminuiscono.

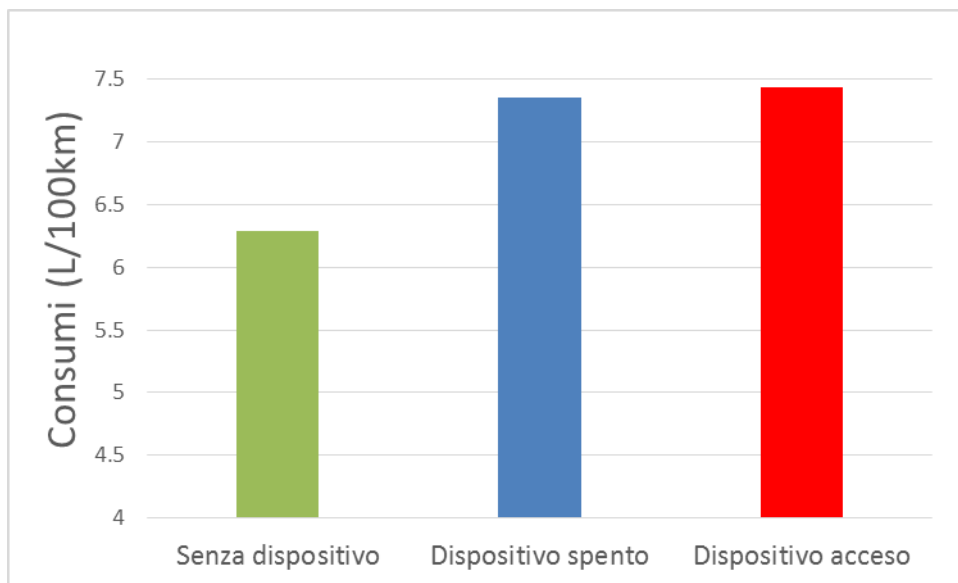


Figura 7.22 – Confronto dei consumi nei cicli ECE-15

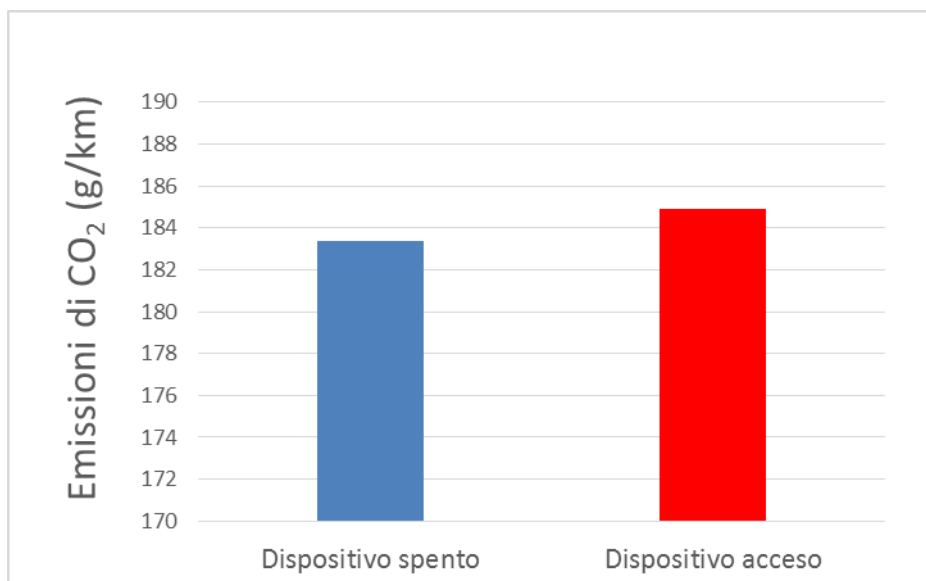


Figura 7.23 – Confronto emissioni di CO₂ nei cicli ECE-15 [22]

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma) Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

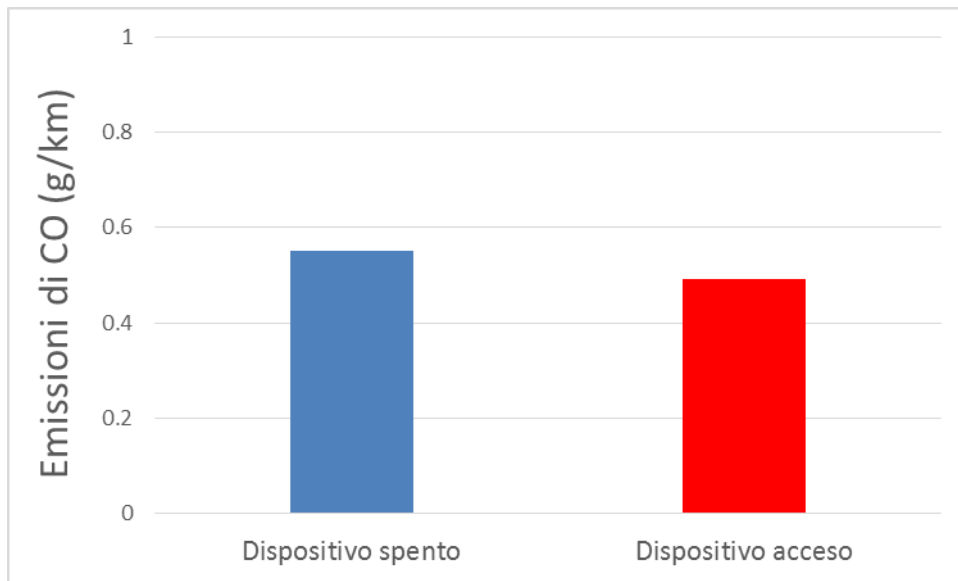


Figura 7.24 – Confronto emissioni di CO nei cicli ECE-15 [22]

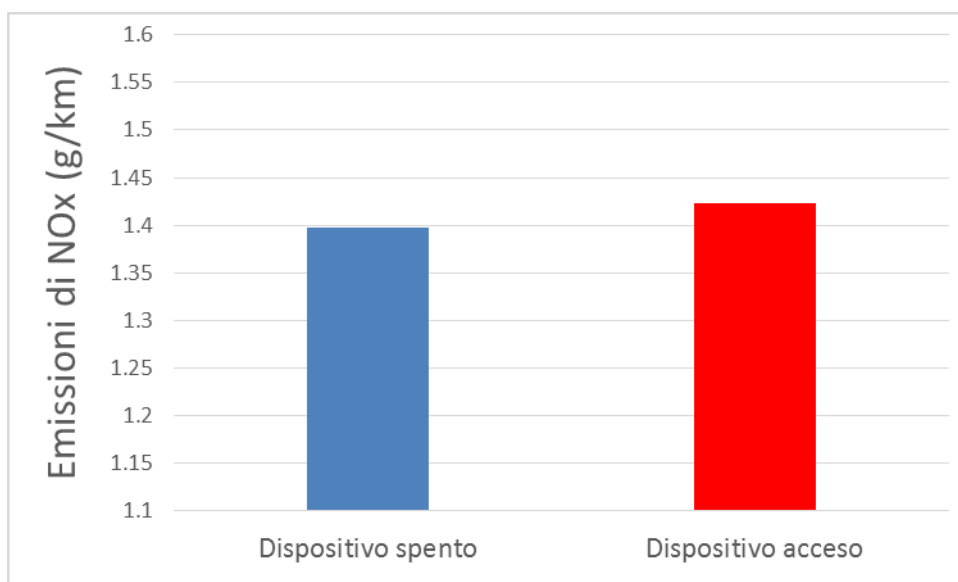


Figura 7.25 – Confronto emissioni degli NOx nei cicli ECE-15 [22].

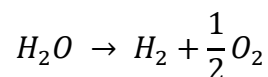
Capitolo 8

Conclusioni

In questo ultimo capitolo, si vuole interpretare e riassumere i dati ottenuti dalle prove ed esposti nel capitolo precedente, cercando di argomentare ulteriormente quanto ottenuto, grazie al supporto offerto in altri articoli proposti dalla letteratura.

Dai dati raccolti salta subito all'occhio come il dispositivo di produzione dell'idrogeno non porti agli obiettivi desiderati. Esso infatti nella maggior parte delle prove effettuate, quando installato e funzionante a bordo del veicolo, comporta una diminuzione della potenza sviluppata alla ruota e del rendimento del veicolo. Ciò avviene principalmente a causa della scorretta quantità di idrogeno prodotto dal dispositivo, esso infatti, non è capace di variare la quantità prodotta al variare del carico sull'acceleratore e quindi del carburante iniettato all'interno della camera di combustione.

Quanto affermato viene esposto, ed ulteriormente confermato grazie ai dati raccolti da S.Bari e M. Esmail, nell'articolo: "Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine" [25]. Essi affermano infatti che la potenza assorbita dalla cella elettrolitica destinata alla produzione di idrogeno sia pari a 240W, essendo la batteria del veicolo a 12V e il fusibile del dispositivo da 20A. Conoscendo quindi la potenza assorbita è possibile calcolare la massima quantità di moli d'acqua convertite nell'unità di tempo che risulta pari a 8.392 e-4 mol/s. A questo punto sapendo che da una mole di acqua si produce una mole di idrogeno e mezza di ossigeno, come si evince dalla seguente reazione:



Si stima che la portata in massa di idrogeno e ossigeno prodotti sia pari a circa, 1.7 mg/s per quanto riguarda l'idrogeno e 13.4 mg/s per l'ossigeno, per un totale di 2 l/min di ossidrogeno prodotto dal dispositivo nel caso in

[25] "Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine" S. Bari, M. Esmail, anno pubblicazione 2009

cui il processo di elettrolisi avvenisse con massima efficienza. Risulta però evidente come la quantità di ossidrogeno prodotto sia minore, in quanto i valori reali di produzione si aggirano intorno ad efficienze pari al 60-70%.

Questa quantità di idrogeno prodotto al minuto, affermano Bari ed Esmaeil, non è sufficiente per apportare un beneficio al processo di combustione, anzi comporta una perdita di potenza prodotta in quanto l'energia necessaria per il processo di elettrolisi è maggiore rispetto a quella liberata dalla combustione della miscela formata da carburante ed idrogeno.

Sarebbe quindi necessario utilizzare un dispositivo capace di produrre almeno 30 l/min di idrogeno, ma esso, per funzionare, richiederebbe un'intensità di corrente pari a 300 A, intensità irraggiungibile dai comuni alternatori installati sulle vetture.

In seguito viene riportato un diagramma tratto dalla fonte [25] che mostra la variazione del rendimento al variare della quantità di idrogeno prodotta dalla cella elettrolitica nell'unità di tempo.

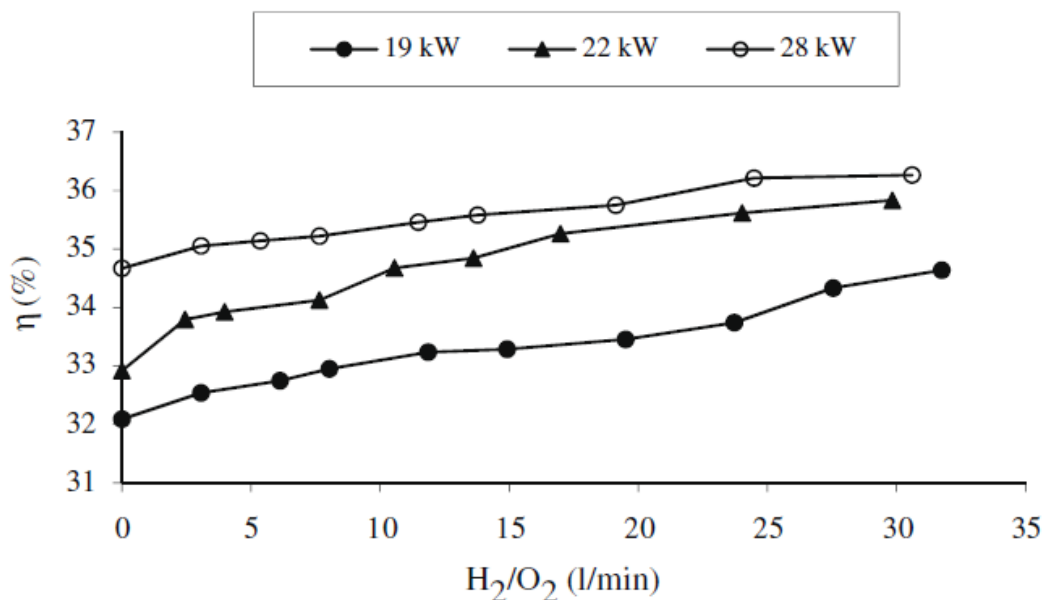


Figura 8.1 – Variazione del rendimento del motore al variare della quantità di idrogeno prodotta. [25]

Un ulteriore obiettivo dei test condotti su veicoli dotati di dispositivo per la produzione di ossidrogeno, oltre all'incremento di potenza e rendimento del motore, era quello relativo alla riduzione delle emissioni inquinanti. Anche in questo caso però i dati ottenuti non risultano incoraggianti. Infatti i grafici riportati nel capitolo precedente spesso risultano incerti, in quanto a fronte di una diminuzione di un determinato elemento inquinanti, ad esempio il CO, si registra l'aumento di un altro, come gli NOx. Inoltre vi sono delle complicanze a livello tecnico-economico dell'impianto che richiede di essere modificato, come nel caso della centralina di Lancia Y, in base alle varie condizioni operative. In questo modo risulta difficile affermare se l'installazione del dispositivo possa, veramente apportare dei benefici in termini ambientali parallelamente alla diminuzione dei costi e consumi. In sostegno di quanto affermato, l'articolo pubblicato sul sito del giornale "Il Sole 24 Ore", dal titolo: "Il futuro dell'auto tra idrogeno e motori ibridi" [26] evidenzia come numerose case automobilistiche, a fronte della necessità di smettere di bruciare idrocarburi fossili nei motori a combustione interna, si stiano concentrando sempre più su sistemi alternativi, come le fuel cell. DaimlerChrysler, il costruttore che più crede nella tecnologia delle fuel cell, ha realizzato la serie di prototipi, denominati Necar, l'ultimo dei quali utilizzava un generatore alimentato a metanolo evitando così l'utilizzo diretto dell'idrogeno come combustibile in quanto pericoloso e difficilmente immagazzinabile a bordo del veicolo. In questo modo DaimlerChrysler ha sì raggiunto l'obiettivo in termini di sicurezza, ma mentre l'utilizzo diretto d'idrogeno nel motore garantisce zero emissioni, altre schemi motoristici, come quello a metanolo, non possono garantire tale condizione. La ricerca però non si ferma, infatti, anche altre case automobilistiche come Fiat, con 600, oppure Ford, con Focus continuano a sviluppare prototipi che mirano alla produzione di serie. Chi alla produzione vi è arrivato è Mercedes, che con Classe A F-Cell, è riuscita a sviluppare un veicolo ad idrogeno efficiente. L'idrogeno è contenuto all'interno di un serbatoio in pressione a 350 bar, montato a bordo del veicolo. Ostacolo alla vendita e alla produzione su larga scala è però il prezzo spropositato.

[26] "Il futuro dell'auto tra idrogeno e motori ibridi", Il Sole 24 Ore
(<http://www.ilsole24ore.com/fc?cmd=art&codid=20.0.831591709&chId=30>)

Tuttavia, come si può ben notare, gli ostacoli allo sviluppo di queste tecnologie sono molteplici e toccano temi come i costi, la sicurezza e la distribuzione, oltre al fatto che le emissioni inquinanti variano per tipologia e percentuale in base al combustibile e alla tecnologia utilizzati, rendendo attualmente l'idea di un veicolo a zero emissioni molto difficile da realizzare.

Per finire uno degli aspetti presi in considerazione durante le prove su banco era quello relativo alla riduzione dei consumi grazie alla miscelazione, e quindi allo smagrimiento della miscela. Dai risultati ottenuti e riportati nel capitolo precedente si è notato come il dispositivo di produzione dell'ossidrogeno non avesse un'importante influenza nel caso del motore a benzina e come, invece, nel caso del motore diesel avesse, addirittura, un effetto contrario che portava ad avere una miscela più grassa a causa dell'incapacità dello stesso di variare la quantità di ossidrogeno prodotto al variare del carico sull'acceleratore.

Quanto riscontrato durante le prove concorda quindi anche con i test effettuati da Bari ed Esmaeil, essi infatti nel loro articolo propongono il seguente grafico,

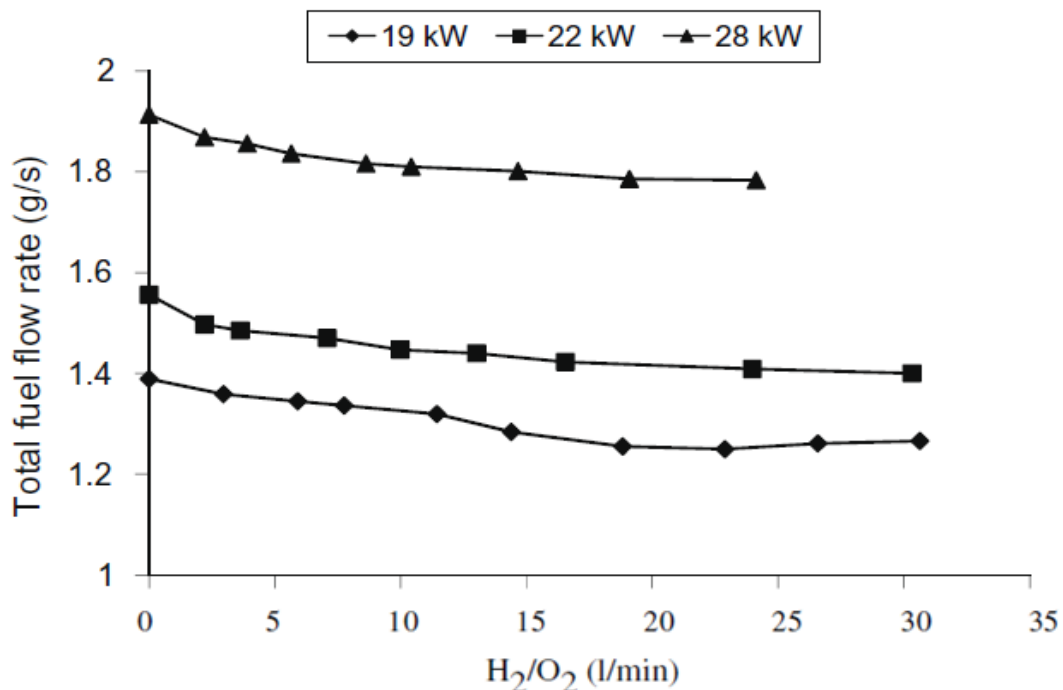


Figura 8.2 – Consumo di combustibile in funzione della quantità di ossidrogeno prodotto [25]

[25] "Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine" S. Bari, M. Esmaeil, anno pubblicazione 2009

che ci mostra come, anche nel caso in cui il dispositivo riuscisse a produrre la quantità ottimale, tale da garantire vantaggi in termini energetici e da loro identificata in 30 l/min, i risparmi di carburante si aggirerebbero intorno a valori del 10% circa. Visto il costo necessario per l'installazione del dispositivo a bordo del veicolo e viste le percentuali di risparmio, si può affermare che esso non porti alcun vantaggio. [25]

Per concludere, partendo dall'analisi della composizione dell'idrogeno e delle varie tecniche di produzione, passando successivamente all'esposizione delle tecnologie di trasporto e stoccaggio attualmente disponibili e dei vari metodi ad oggi utilizzati per alimentare un motore a combustione interna con idrogeno puro o opportunamente miscelato e infine esaminate le varie casistiche di funzionamento del dispositivo per la produzione di ossidrogeno riportate in letteratura, si può affermare che l'idrogeno risulta una fonte energetica molto interessante dal punto di vista ambientale, in quanto, nonostante le difficoltà caratterizzanti questa fonte energetica, alcune applicazioni motoristiche se opportunamente implementate con specifici sistemi di produzione/stoccaggio dell'idrogeno possono portare alla realizzazione di motori a zero, o comunque bassissime emissioni. Allo stesso tempo però altre problematiche di carattere tecnico ed economico, oltre ad un mercato ancora troppo legato all'utilizzo di fonti energetiche fossili, impediscono a questa tecnologia uno sviluppo fluido e rapido, lasciando così molti punti interrogativi su un suo utilizzo come combustibile primario, per lo meno nel breve periodo.

[25] "Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine" S. Bari, M. Esmaeil, anno pubblicazione 2009

Bibliografia

- [10] Arpa Emilia Romagna
(https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/aria/ossidi_azoto.pdf)
- [11] Arpa Lombardia
(http://www2.arpalombardia.it/qariafiles/varie/Full_Executive_Summary-final.pdf)
- [5] Arteconi Alessia, corso "Energetica", università Ecampus. 2014
- [25] "Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine" S. Bari, M. Esmaeil, anno pubblicazione 2009
- [17] "Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili" Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco" Università degli Studi di Firenze Autori: David Chiaramonti, Francesco Martelli, Roberto Galante
Dipartimento di Energetica "S.Stecco" Milva Celli, Daniele Colognesi, Marco Zoppi CNR-Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"
- [14] ISPRA "Annuario dei dati ambientali" capitolo 4: trasporti.
Autori: Mario Contaldi, Francesca Rizzitiello, Paola Sestili. Anno 2014-2015
- [16] Hydrogen as Future Energy Carrier: The ENEA Point of View on Technology and Application Prospects
Autori: Mario Conte, Francesco Di Mario Agostino Iacobazzi, Antonio Mattucci, Angelo Moreno e Marina Ronchetti.
Data pubblicazione articolo: 23 Marzo 2009
- [13] ISPRA "Trasporti: strumenti europei e nazionali per il risanamento della qualità dell'aria" Autori: Mariacarmela Cusano e Antonella De Santis – Dicembre 2013
- [6] G. De Simone – "Progetto di motori alimentati a gas naturale a carica parzialmente stratificata", 2008
- [9] Mario Di Veroli, corso "Interazione macchine ambiente", università Ecampus.

[8] Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello

[15] "Tecnologie avanzate per la combustione di idrogeno" Stefano Giammartini, Eugenio Giacomazzi, Valentina Visentin. ENEA, UTS- Fonti rinnovabili e cicli energetici innovativi.

[26] "Il futuro dell'auto tra idrogeno e motori ibridi", Il Sole 24 Ore
(<http://www.ilsole24ore.com/fc?cmd=art&codid=20.0.831591709&chId=30>)

[2] LOMBARDIABENICULTURALI

(<http://www.lombardiabeniculturali.it/scienza-tecnologia/schede/ST170-00357/>)

[23] Martarelli Milena, corso "Misure meccaniche e termiche", università Ecampus, 2014

[12] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare
(<http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>)

[3] Sito museo nazionale scienza e tecnologia Leonardo da Vinci, Milano
(<http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/motore-scoppio/>)

[24] "The OBS-1000 Series On-board Engine Emission Measurement System" – Horiba Technical Reports - Nobutaka Kihara

[21] "Gas di Brown: un'energia per il futuro" Luciano Saporito
(http://www.hydrobetatron.org/files/GAS-DI-BROWN_Articolo.pdf)

[19] Savino F.A. "Prospettive nella produzione di energia: aspetti merceologici ed economici. Il caso dell'idrogeno". Tesi di Laurea, Università degli Studi di Foggia, Facoltà di Economia, 2000.

[22] "Valutazione degli effetti dell'ossidrogeno nei motori a combustione interna" Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale - Corso di laurea in Ingegneria Meccanica - Cattedra di Sistemi Energetici – università La Sapienza (Roma)
Autore: Raffaele Scocozza A/A 2015-2016

[20] Enciclopedia degli idrocarburi Treccani – Volume III / Nuovi sviluppi: energia, trasporti, sostenibilità.
([http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_ aree/Tecnologia e Scienze applicate/enciclopedia/italiano_vol_3/idro_vol_3_ita.pdf](http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_ aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_3/idro_vol_3_ita.pdf))

[1] Treccani – Enciclopedie online
(<http://www.treccani.it/enciclopedia/motore-a-scoppio/>)

[4] Sandro Vagni, corso “Motori a combustione interna”, università Ecampus.
2014

[7] “Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines” di Sebastian Verhelst:
Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University, Sint-
Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgium
Thomass Wallner: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory,
Building 362, 9700 South Cass Avenue, Argonne, IL 60439-4815, USA

[18]http://www.dol.unina.it:8445/idea/tecnologie_energetiche/UD08/download/uf02.pdf