

## Mixture percentage limit

### *Proprietà fondamentali della miscela Idrogeno-Aria*

I motori a combustione interna, in particolare ad accensione comandata, alimentati a idrogeno, o arricchiti con idrogeno, hanno la capacità (ampiamente confermata in letteratura) di bruciare in modo più pulito e di funzionare più efficientemente, rispetto agli stessi motori alimentati con combustibili tradizionali quali benzina, metano, gpl. Tali vantaggi sono da ascrivere alle caratteristiche uniche di combustione dell'idrogeno che consentono una combustione ultra-magra con produzione drasticamente ridotta di NOx ed un incremento dell'efficienza di conversione energetica del motore soprattutto nell'operatività ai bassi carichi. Al contrario, le stesse caratteristiche di combustione impongono particolari sfide tecniche agli alti carichi di esercizio del motore a causa di una maggiore propensione alla preaccensione della miscela aria-idrogeno.

Le proprietà di maggiore interesse dell'idrogeno sono elencate nella tabella seguente:

Fuel properties at 25 °C and 1 atm

Property	Hydrogen CNG	Gasoline
Density (kg/m <sup>3</sup> )	0.0824	730 <sup>a</sup>
Flammability limits (volume % in air)	4–75	4.3–15
Flammability limits ( $\phi$ )	0.1–7.1	0.4–1.6 $\approx$ 0.7–4
Autoignition temperature in air (K)	858	723
Minimum ignition energy (mJ) <sup>b</sup>	0.02	0.28
Flame velocity (m s <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	1.85	0.37–0.43
Adiabatic flame temperature (K) <sup>b</sup>	2480	2214
Quenching distance (mm) <sup>b</sup>	0.64	2.1 <sup>c</sup>
Stoichiometric fuel/air mass ratio	0.029	0.069
Stoichiometric volume fraction %	29.53	9.48 $\approx$ 2 <sup>d</sup>
Lower heating value (MJ/kg)	119.7	45.8
Heat of combustion (MJ/kg <sub>air</sub> ) <sup>b</sup>	3.37	2.9

<sup>a</sup>Liquid at 0 °C.

<sup>b</sup>At stoichiometry.

<sup>c</sup>Methane.

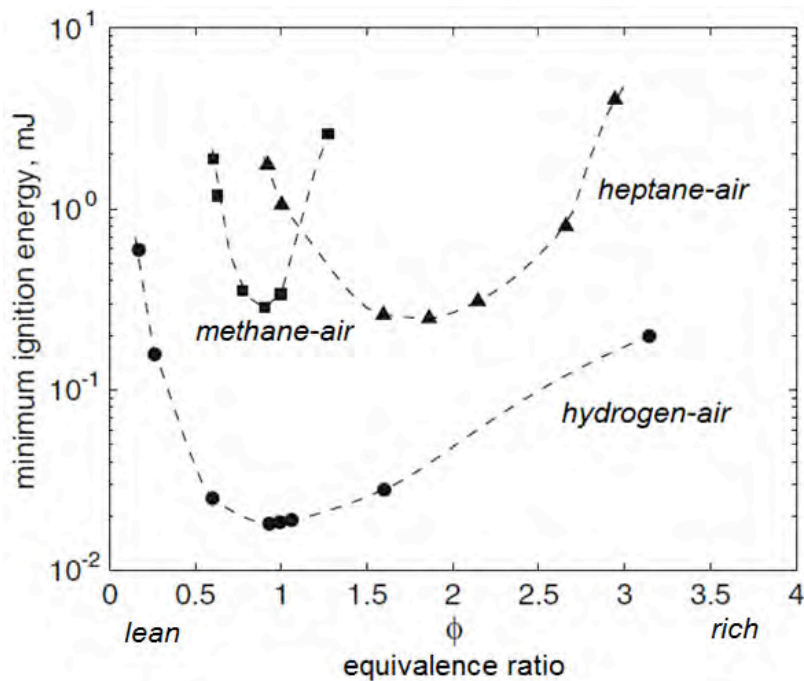
<sup>d</sup>Vapor.

Nella stessa, sono riportate anche le stesse proprietà per la benzina e il gas naturale compresso (CNG).

Per un confronto diretto, conviene discutere le proprietà dei combustibili prendendo a riferimento un motore ad accensione comandata and iniezione nel condotto (Port Fuel Injection – PFI).

### ***Preaccensione e detonazione***

Dalla figura seguente<sup>1</sup> si evidenzia che l’energia di autoaccensione dell’idrogeno è molto bassa, almeno di un ordine di grandezza, (nonostante la più alta temperatura di autoaccensione).



La bassa energia di accensione dell’H2 implica una predisposizione dello stesso a fenomeni indesiderati di preaccensione.

Al contrario la la più alta temperatura di autoaccensione, implica invece che la detonazione (intesa come accensione di “end-gas” ancora non raggiunti dal fronte di fiamma) è meno probabile. In effetti il Research Octane Number (RON) della dell’idrogeno è RON > 120, mentre per la benzina RON = 91 – 99 e per il metano RON = 120.

<sup>1</sup> Si noti che  $\phi=1/\lambda$ , dove  $\phi$  = rapporto di equivalenza,  $\lambda$  = indice di eccesso d’aria (lambda)

La bassa energia di attivazione dell'idrogeno in condizioni stechiometriche ( $f=1$ ) implica che ad elevato carico può diventare difficile operare il motore proprio in prossimità di  $f=1$ , senza l'insorgere di fenomeni di preaccensione.

### ***Infiammabilità***

L'intervallo di infiammabilità dell'idrogeno è  $0.1 < \phi < 7.1$  (come mostrato nella Tabella iniziale), mentre per il CNG è  $0.4 < \phi < 1.6$  e per la benzina è  $0.7 < \phi < 4$ . In termini di eccesso d'aria, tali intervalli si leggono:

H2 :             $0.14 < \lambda < 10$

CNG:            $0.62 < \lambda < 2.5$

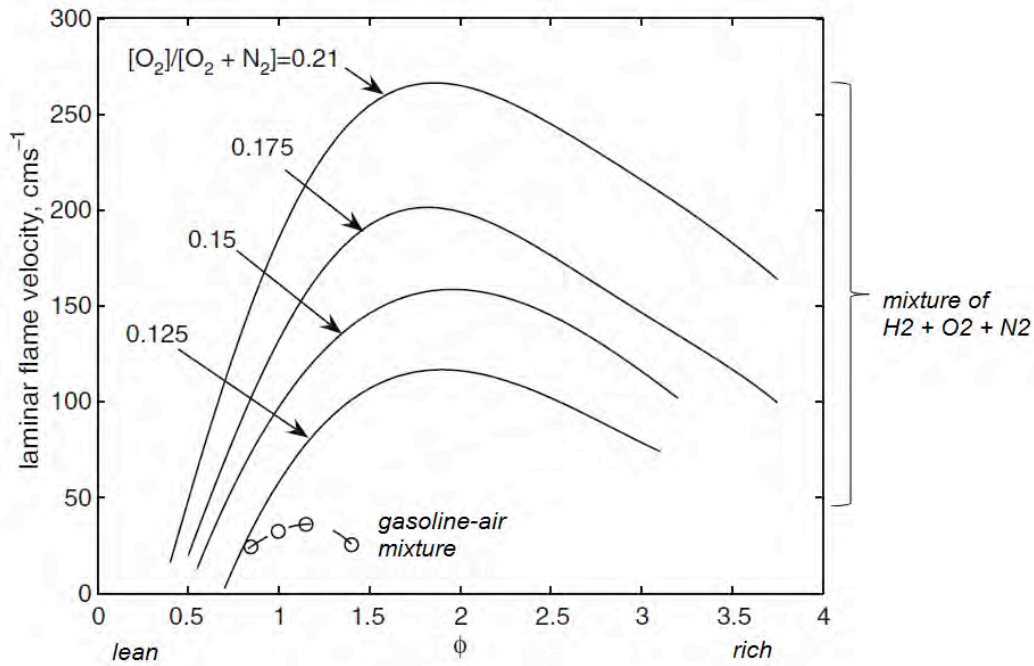
Benzina:       $0.25 < \lambda < 1.43$

In base a questi valori, è evidente che l'idrogeno favorisce un'operatività stabile del motore in condizioni di elevato grado di diluizione, che permette un'elevata capacità di controllo del motore sia ai fini della riduzione delle emissioni che per la dosatura del combustibile.

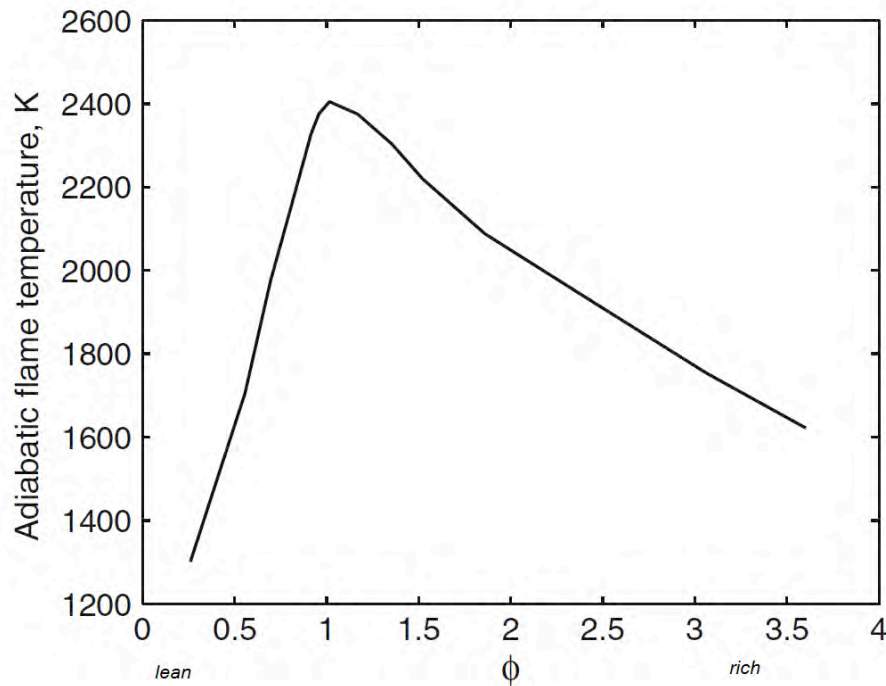
Da precisare che la diluizione può essere ottenuta sia con eccesso d'aria (operatività in magro), sia con ricircolo di gas combusti. La differenza tra i due sostanzialmente risiede nel fatto che quest'ultimo permette un funzionamento stochiometrico del motore con evidenti vantaggi nell'applicazione poi di tecnologie consolidate di post-trattamento dei gas di scarico con cataliche trivalenti per l'abbattimento dei NOx.

### ***Velocità di propagazione della fiamma e temperatura adiabatica di combustione***

La seguente figura mostra la velocità laminare di combustione di idrogeno-aria a confronto con una miscela benzina-aria, al variare del rapporto di equivalenza. L'incremento impiegando l'idrogeno è evidentemente notevole. Maggiore velocità di propagazione di fiamma laminare implica di conseguenza una maggiore velocità di combustione turbolenta (che in effetti ha luogo nei motori).



La seguente figura mostra invece la temperatura adiabatica di combustione caratteristica della miscela aria-idrogeno.



Queste due proprietà hanno importanti effetti e ricadute

- sulle emissioni di NO<sub>x</sub>,
- sulla potenza,
- e sull'efficienza di conversione energetica del motore (rendimento)

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

Operando il motore in condizioni ultra-magre ( $\phi < 0.5$  o  $\lambda > 2$ ), che è sinonimo di temperature di combustione molto basse, si ha la possibilità di ridurre considerevolmente la formazione di NO<sub>x</sub>.

### ***Potenza sviluppata***

Prescindendo dai sistemi di abbattimento, vi è in genere un compromesso tra la potenza erogata dal motore (che tende a scendere con l'aumentare del livello di smagrimento) e la riduzione dei NO<sub>x</sub> (che scendono quanto più si opera in magro).

Inoltre, la potenza massima erogabile da un motore alimentato ad idrogeno, è affetta da problemi di efficienza volumetrica del motore stesso, in quanto la bassissima densità del combustibile (soprattutto in motori ad iniezione indiretta, nel condotto) sottrae cilindrata utile all'aria di combustione e di fatto riduce la massima potenza erogabile da un motore di data cilindrata.

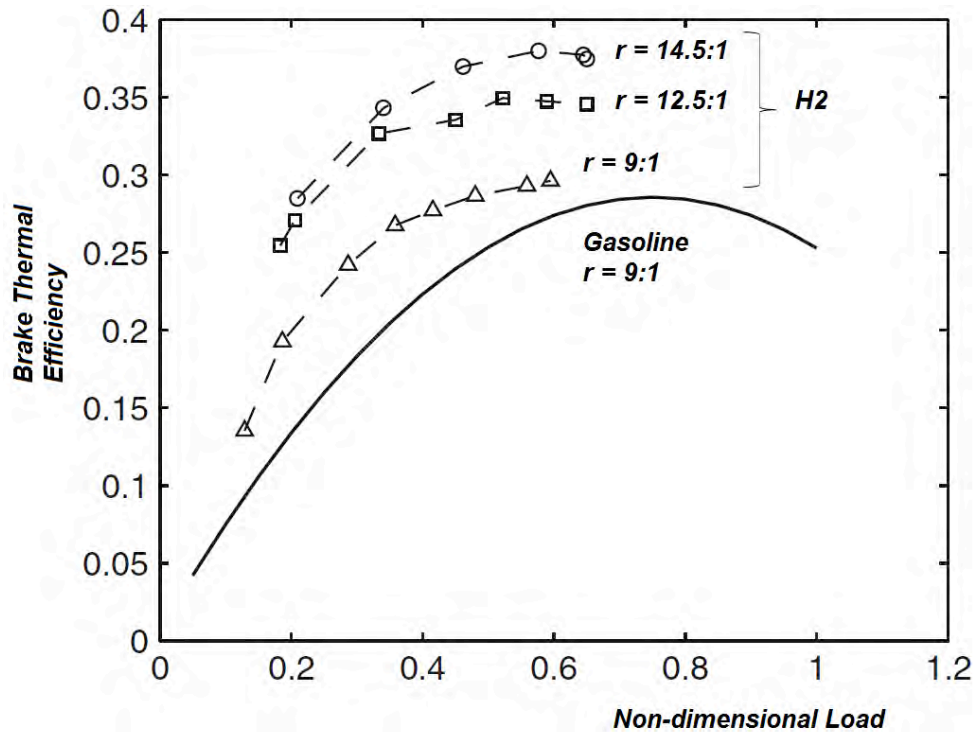
Per contro, se il motore ad idrogeno soffre di una riduzione di potenza al massimo carico, ai carichi parziali o molto bassi si rende possibile l'operatività del motore in condizioni non strozzate (con farfalla tutta, o molto, aperta) con diretti vantaggi sui consumi a causa delle minori perdite dovute al lavoro di pompaggio della miscela fresca.

### ***Rendimento termodinamico (efficienza di conversione energetica)***

L'alto RON e l'elevata infiammabilità in condizioni ultra-magre, consentono al motore alimentato ad idrogeno di ottenere elevati rendimenti termodinamici, rispetto a pari motori alimentati con combustibili convenzionali.

Nella figura seguente si mettono in evidenza risultati ottenibili con alimentazione a idrogeno, anziché a benzina, sfruttando anche il fatto che l'elevato RON dell'H<sub>2</sub> permette

un considerevole incremento del rapporto di compressione del motore a parità di ogni altro fattore.



Rimane evidenziato, per le curve relative all'H2, che i rendimenti di conversio sono nettamente superiori, ma il carico massimo raggiungibile scende (es. 0.6-0.7 del carico massimo ottenibile con alimentazione a benzina).

Tutti gli aspetti sopra rapidamente menzionati sono tratti da letteratura scientifica, in particolare dai seguenti lavori:

1. C.M. White, R.R. Steeper, A.E. Lutz, "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review", *International Journal of Hydrogen Energy* 31 (2006) 1292 – 1305
2. J. A. Goldwitz, J. B. Heywood, "Combustion Optimization in a Hydrogen-Enhanced Lean-Burn SI Engine", SAE Technical Paper 2005-01-0251, Detroit, SAE World Congress 2005.
3. J.M. Gomes Antunes, R. Mikalsen, A.P. Roskilly, "An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine", *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009) 6516 – 6522.
4. Cheolwoong Park, Changgi Kim, Young Choi, Sangyeon Won, Yasuo Moriyoshi, "The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine" *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011) 3739-3745.

**Allestimento test su motore Iveco 2800 cc**

Il motore impiegato in questa campagna sperimentale è un quattro cilindri in linea, 2800 cc, ad accensione comandata, quattro tempi, alimentato a gas metano, prodotto dalla IVECO, modello 8148 MPI, che equipaggia il veicolo Daily CNG.

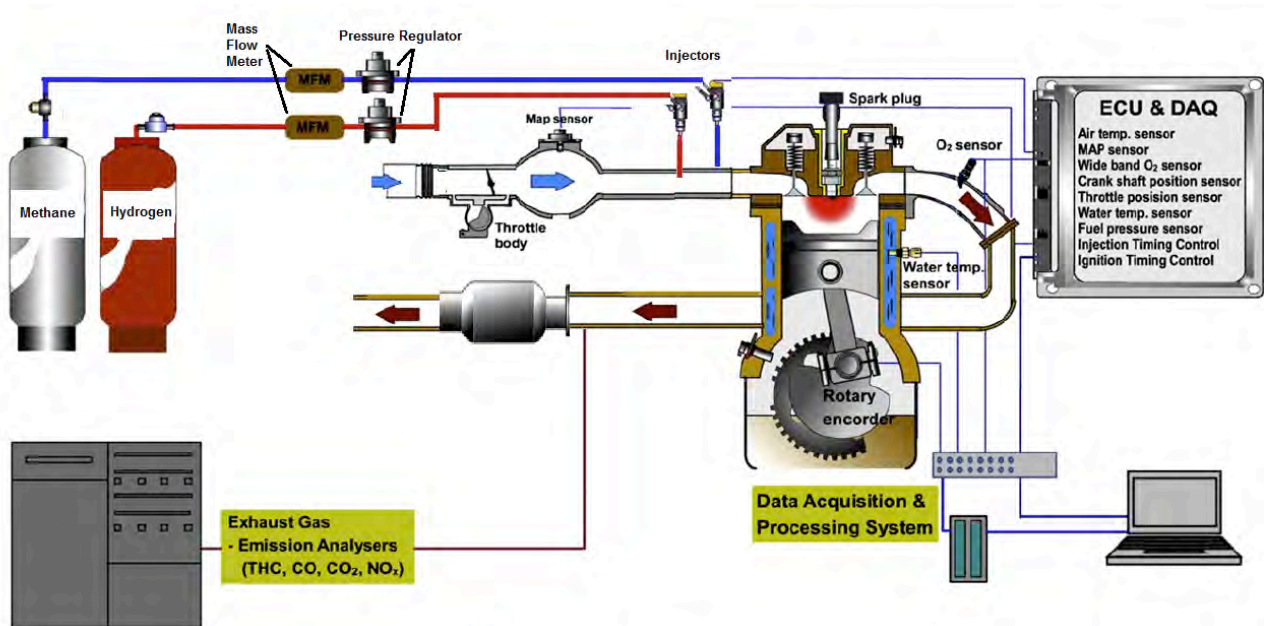
Le principali caratteristiche del motore in oggetto sono riportate nella tabella seguente:

Alesaggio (mm)	94.4
Corsa (mm)	100
Rapporto di Compressione	12.2:1
Cilindrata (cc)	2800
Alimentazione Aria	Aspirato
Alimentazione Carburante	Indiretta, Multi-Point, Sequenziale, Fasata
Coppia max (Nm @ rpm)	220 @ 2200
Potenza max (kW @ rpm)	78 @ 3800

L'intera campagna condotta congiuntamente dall'Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, e da Egenera srl, ed è stata svolta all'interno del Laboratorio "Sala Prova Motori", del Dip. Ing. Industriale.

Il motore è stato connesso ad un freno dinamometrico Borghi & Saveri FE 260 ed i gas di scarico sono estratti mediante dispositivi di estrazione forzata dedicati. La sala dispone di un impianto di raffreddamento del liquido motore e di un sistema di ventilazione dell'aria di sala.

Lo schema di installazione del motore al banco e la relativa strumentazione è illustrata nella seguente figura.



Schematic diagram of the experimental engine setup.

Si evidenziano in particolare i seguenti dispositivi installati:

- Stoccaggio bombole Metano 100% (puro), esterno alla sala prove;
- Stoccaggio bombole miscela H<sub>2</sub> (35% vol) – CH<sub>4</sub> restante, esterno alla sala prove;
- Linea di adduzione dei combustibili, composta, per ciascun carburante, da
  - o riduttore di pressione operante fra 220 bar e 30 bar,
  - o misuratore di portata massico ad effetto Coriolis, Siemens MASS2100
  - o riduttore di pressione con uscita 7 bar (Tartarini);
- Elettro-Iniettori Weber Marelli WM-IAW0003;
- Centralina di controllo motore (ECU - Electronic Control Unit) EFI Technology;
- Sonda lambda lineare Bosch LSU 4.2 su ciascun condotto di scarico
- Sonda lambda lineare Bosch LSU 4.2 su condotto comune a valle di giunzione di scarico
- Sensore di posizione albero motore (pick-up su ruota fonica)
- Sensore di fase (su distribuzione)
- Sensore di posizione farfalla (TPS)
- Sensore di pressione combustibile, monte e valle del riduttore finale Tartarini
- Temperature acqua e olio motore



- Sistema di accensione Marelli
- Candele Champion RC7 YCC, grado termico Bosch 5, spark gap 0.8 mm
- Sonde di temperatura gas di scarico su ciascun ramo uscente dai cilindri
- Sonde di temperatura su aria aspirata, molinte e valle coropo farfallato
- Pressione al collettore di aspirazione (MAP – Manifold Air Pressure)
- Pressione, temperatura e umidità in ambiente
- Analizzatore di gas combusti Fischer-Rosemount NGA 2000 (low CO, high CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub>, HC)



Prove al banco presso l'Univ. Perugia



Engine Test Bench



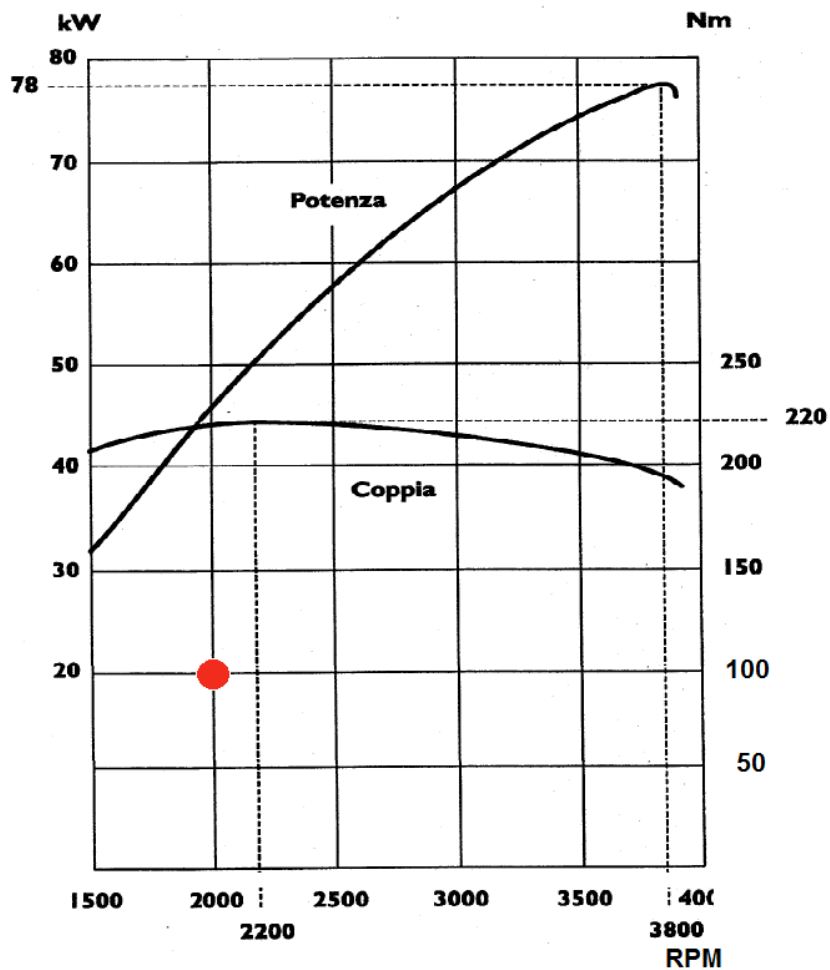
Emissions Analyzers and fuel consumption

### Metodologia di Test

Il motore è stato testato in condizioni di funzionamento parzializzato a 2000 rpm e 4.5 bar di pressione media effettiva (corrispondenti a circa 100 Nm di coppia erogata e 21 kW di potenza erogata).

Il punto in questione si colloca circa a metà carico massimo e regime di rotazione medio-basso rispetto al regime di potenza massima, come evidenziato dal punto rosso riportato nella figura sottostante.

La scelta di tale punto è motivata dal fatto che questa è una zona di più frequente impiego del su strada.



Dopo un opportuno periodo di warm-up, il motore è stato mantenuto a circa  $85\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  di temperatura acqua di raffreddamento e regimato per tutto la durata dei test.

I combustibili testati sono stati di due tipi:

- metano puro (CH<sub>4</sub> 100%)
- mix idrogeno-metano, con H<sub>2</sub> al 35 % in volume (corrispondente a 6,3% in massa)

Il rapporto di miscela è stato variato da  $\lambda = 1$  (condizioni stechiometriche) fino al massimo sostenibile dal motore in funzione del combustibile utilizzato, in particolare  $\lambda = 1.25$  per l'alimentazione a metano e  $\lambda = 1,70$  per quella ad idrometano H<sub>2</sub>\_35%.

Il controllo del motore è stato affidato al closed loop applicato dalla ECU, basato sulla sonda lambda posta sul condotto di scarico, a valle della giunzione 4 in 1.

In ogni punto, smagrendo la miscela il carico evidentemente tende a scendere, ma i test sono stati effettuati riportando sempre la coppia al valore obiettivo desiderato (di 100 Nm), agendo opportunamente sulla farfalla (aprendo quindi progressivamente al crescere dello smagrimento).

In ogni punto sono stati determinati, o valutati, il consumo, il rendimento, le emissioni e la stabilità di combustione e funzionamento motore.

Il rendimento è espresso come rapporto fra la potenza erogata e la potenza in ingresso al motore, dove quest'ultima risulta essere:

(portata massica combustibile) x (potere calorifico inferiore combustibile)

Per il metano si è assunto un P.C.I. di 50'000 kJ/kg.

Per l'idrometano H<sub>2</sub>\_35%, un P.C.I. di 54'414 kJ/kg (determinato dalla media pesata dei combustibili puri, con P.C.I. dell'H<sub>2</sub> pari a 120'000 kJ/kg).