



STRUMENTO

## Analizzatori di gas

Oggetto

### L'analisi dei gas nei motori a benzina

#### DISPENSA

##### Introduzione

Il motore trasforma l'energia chimica contenuta nel **combustibile** (benzina) e nel **comburente** (ossigeno) in energia termica, attraverso una reazione chimica detta di **COMBUSTIONE**. Questa reazione avviene, e avviene con il massimo rendimento possibile, solo se vengono rispettate le giuste proporzioni fra le varie sostanze che partecipano alla reazione stessa. In pratica è necessario che aria e benzina entrino nella camera di scoppio in adeguate quantità l'una rispetto all'altra. Questa giusta proporzione è definita "**rapporto stechiometrico**" o "**rapporto lambda**".

Poiché è piuttosto complicato misurare **quello che entra** nel motore, si preferisce, almeno a livello diagnostico di auto-riparazione, misurare **quello che ne esce** dopo la combustione. Questo tipo di approccio ha il vantaggio di essere più pratico e di fornire maggiori informazioni:

- permette di conoscere **che cosa è entrato nel motore** per produrre la combustione
- consente anche di sapere **quale è stata la qualità** della combustione.

##### Che cosa entra nel motore.

**Benzina:** è costituita essenzialmente da **idrocarburi** (HC), cioè sostanze organiche composte da **idrogeno** (H) e **carbonio** (C).

**Aria:** è composta da **ossigeno** (O) per circa il 21% e da **azoto** (N) per quasi tutto il restante 79%.

Semplificando, possiamo dire che gli elementi che entrano nel motore sono: **H + C + O + N**, in diverse concentrazioni.

Solo nel 1979, il Dott. **Johannes Bretschneider** sviluppò una formula per determinare scientificamente le corrette quantità di questi elementi, per arrivare ad una reazione chimica completa ed efficiente. Dai suoi calcoli (la formula completa occuperebbe mezza pagina, quindi ce la risparmiamo!) risulta che una corretta **miscela aria/benzina** deve essere composta da:

benzina = 1 grammo  
aria = 14,7 grammi (11,6 grammi di azoto + 3,1 grammi di ossigeno)  
totale = 15,7 grammi

ovvero un **rapporto aria/benzina di 14,7 : 1**.

Questo significa che per ogni litro di benzina (circa 750 grammi) il nostro motore si "beve" anche 11 Kg di aria, equivalenti a circa 9.000 (novemila!) litri.

##### Che cosa esce dal motore

Sempre secondo Bretschneider, questo tipo di miscela dovrebbe produrre **teoricamente** una



combustione che dà origine, come prodotto della combustione stessa, ad un gas composto dal 15% di **anidride carbonica** (CO<sub>2</sub>), un po' di **vapore acqueo** (H<sub>2</sub>O) e **azoto** (N), che entra ed esce in quantità identica, non avendo parte attiva nella reazione chimica di combustione.

Grosso modo:

anidride carbonica =	2,4 grammi	15%
vapore acqueo =	1,7 grammi	11%
azoto =	11,6 grammi	74%
totale =	15,7 grammi	100% (nulla si crea, nulla si distrugge...)

Per i pignoli, le quantità sopra riportate sono indicative, in quanto calcolate assumendo pesi specifici identici per i vari gas, il che non è esattamente vero.

Riassumendo, in teoria:

nel motore entrano: Benzina      H + C  
Aria                      O + N

ed escono:              Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)    C + O  
Acqua (H<sub>2</sub>O)                      H + O  
Azoto                                      N

Nella realtà, a causa del breve tempo a disposizione per la combustione e delle alte temperature in gioco, le cose vanno in modo leggermente diverso da quanto previsto dalla teoria.

In particolare, non tutti gli idrocarburi si scindono in H e C, non tutto il carbonio si combina con l'ossigeno per formare CO<sub>2</sub> e non tutto l'ossigeno riesce a combinarsi con carbonio e idrogeno. Per conseguenza una parte degli HC restano **incombusti**, una parte del carbonio si unisce all'ossigeno formando **monossido di carbonio** (CO), una piccola parte di ossigeno non entra a far parte della reazione e un'altra piccola parte di ossigeno si unisce all'azoto formando ossido di azoto in varie forme (NO + NO<sub>2</sub> = NO<sub>x</sub>).

Dal punto di vista chimico possiamo esprimere tutto questo con la seguente formula chimica non bilanciata:  $O_2 + N_2 + HC \rightarrow H_2O + CO_2 + N_2 + O_2 + HC + NO_x + CO$ .

Anidride carbonica	CO <sub>2</sub>	14%	Gas responsabile dell'effetto serra. Non tossico.
Ossido di carbonio	CO	1%	Gas tossico, letale oltre il 2% dell'aria respirata.
Idrocarburi incombusti	HC	0,03% (300 PPM)	Gas irritanti e cancerogeni
Ossigeno	O <sub>2</sub>	1%	Ovviamente non è preoccupante per la nostra salute
Ossidi di azoto	Nox	1%	Gas irritante, responsabile delle piogge acide
Azoto	N	73%	Gas inerte
Vapore acqueo	H <sub>2</sub> O	10%	Acqua allo stato gassoso

Trascuriamo eventuali tracce di altre sostanze "parassite" che potrebbero essere presenti nel carburante (zolfo...) e che potrebbero produrre anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) a seguito della combustione. Questo inquinante è presente soprattutto nel gasolio, e quindi nei motori diesel.

Eventuali scostamenti del rapporto aria/benzina rispetto a quello stechiometrico ideale, produrranno diverse temperature di combustione, quindi variazioni nella ripartizione dei vari gas emessi e, ovviamente, riduzioni del rendimento del motore.

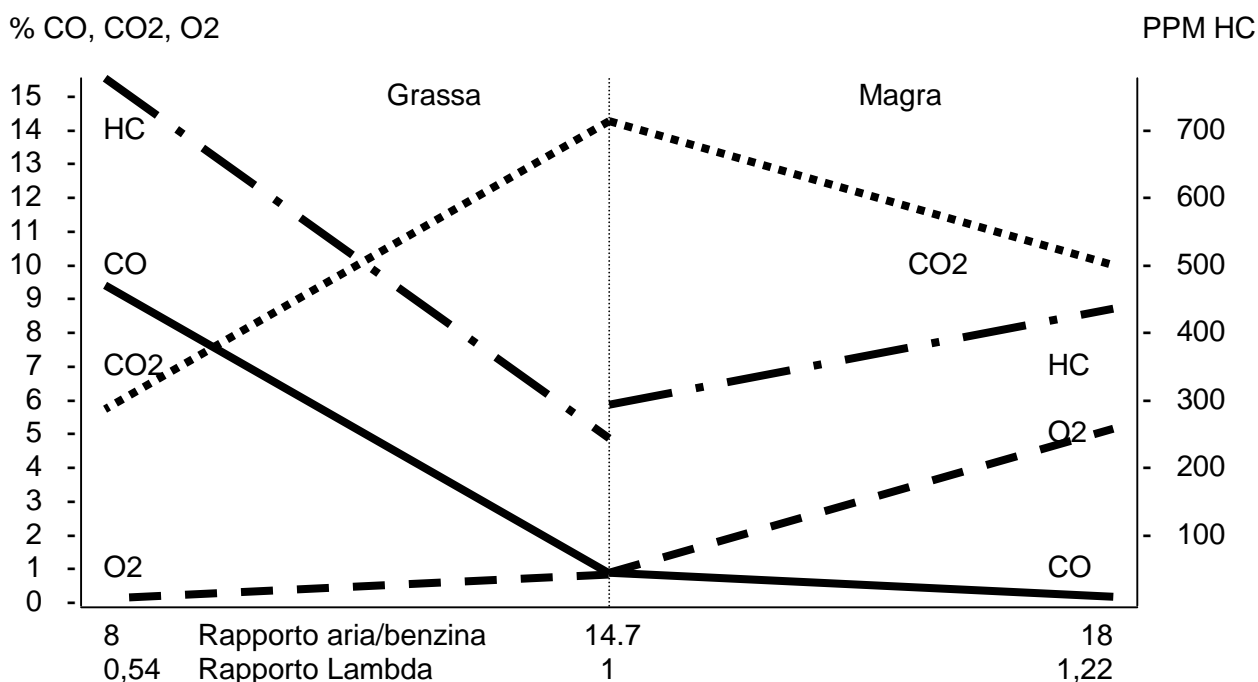
Per maggior chiarezza, vedere il grafico sottostante, che fornisce un'idea approssimativa del comportamento dei vari gas in funzione del rapporto aria/benzina.

L'esempio si riferisce alla misura dei gas al collettore di scarico, quindi a monte di un eventuale



catalizzatore. Si precisa che i valori misurati al collettore sono praticamente identici indipendentemente dal fatto che si tratti o no di un motore catalizzato.

E' importante notare come nel punto di corretta miscela (14,7 : 1) i valori di CO e di Ossigeno si equivalgono, e che la somma dei valori di **CO** (1%) + **CO2** (14%) è di **15%**. Spostandosi verso sinistra (miscela ricca) il CO2 diminuisce e il CO aumenta. La loro somma resta sostanzialmente costante intorno al **15%**.



## Il rapporto Lambda

Si è parlato finora di ripartizione aria / benzina in termini di rapporto fra le due quantità: 14,7 parti di aria per 1 di benzina rappresentano, come visto, la corretta miscela.

C'è un modo diverso per esprimere questa relazione, tenendo conto della sola aria o, più esattamente, dell'ossigeno.

Se consideriamo uguale a 1 la quantità di ossigeno necessaria in teoria per la corretta miscela, la quantità di ossigeno realmente utilizzata sarà il "rapporto lambda". In pratica, il rapporto lambda è il rapporto fra ossigeno reale e ossigeno teorico. Facciamo un altro esempio più chiaro:

Si è visto che per 1 grammo di benzina sono necessari 14,7 grammi di aria. Ovvero l'ossigeno teorico è uguale a 14,7.

Nell'esempio che segue, il nostro motore è ben "carburato", quindi consuma effettivamente 14,7 grammi di ossigeno per ogni grammo di benzina. Per conseguenza:

$$\text{Lambda} = \frac{\text{ossigeno reale } 14,7}{\text{ossigeno teorico } 14,7} = 1. \text{ Questo è il rapporto stechiometrico corretto.}$$

Nel caso seguente il motore è "grasso", cioè troppa benzina e poca aria:

$$\text{Lambda} = \frac{\text{ossigeno reale } 13,6}{\text{ossigeno teorico } 14,7} = 0,925. \text{ Lambda basso = miscela grassa:}$$



In quest'ultimo caso il motore è "magro", cioè troppa aria e poca benzina:

$$\text{Lambda} = \frac{\text{ossigeno reale } 15,8}{\text{ossigeno teorico } 14,7} = \frac{15,8}{14,7} = 1,075. \text{ Lambda alto} = \text{miscela magra.}$$

Il rapporto lambda deve essere normalmente compreso fra 0,97 e 1,03, che significa un rapporto aria/benzina compreso fra 14,26 e 15,14. Come si vede la tolleranza è piuttosto stretta. Al di fuori di queste tolleranze il rendimento della combustione diminuisce e l'inquinamento aumenta. Un lambda superiore a 1,3 o inferiore a 0,7 renderà impossibile la combustione.

### Il CO Corretto

Il CO corretto non è una misura, è un calcolo. Tale calcolo è stato voluto, a partire dagli anni '70, allo scopo di evitare misure erronee del CO. Vediamo come.

Si è detto che nei gas le concentrazioni di CO e CO<sub>2</sub> danno come somma circa 15 (CO = 1, CO<sub>2</sub> = 14). Nel caso ci fosse una infiltrazione di aria nello scarico (marmitta rotta, sonda dell'analizzatore difettosa, prese d'aria da parte dell'analizzatore) il risultato sarebbe una **diluizione** dei gas in aria, con conseguente **diminuzione** dei valori misurati. Se, ad esempio, il nostro analizzatore si ritrovasse a misurare gas di scarico e aria in parti uguali, i valori misurati sarebbero la metà di quelli reali. Per capirci meglio, se prendiamo un bicchiere di vino (gradazione alcolica 12°) e lo diluiamo con un bicchiere d'acqua, otterremo 2 bicchieri di acqua e vino con gradazione alcolica di 6°.

Nel caso di cui sopra (CO = 1%, CO<sub>2</sub> = 14%) troveremmo CO = 0,5% e CO<sub>2</sub> = 7%, cioè misure totalmente false. In questi casi l'analizzatore deve essere capace, a partire dall'errore sulla somma (7,5 invece che 15), di ricostruire i valori reali. La formula di calcolo è la seguente:

$$\text{CO corretto} = \text{CO} \times \frac{15}{\text{CO} + \text{CO}_2}. \text{ Usando i valori dell'esempio precedente:}$$

$$\text{CO corretto} = 0,5 \times \frac{15}{0,5 + 7} = 0,5 \times \frac{15}{7,5} = 1.$$

In pratica, il calcolo del **CO corretto** è la ricostruzione del **valore vero** di CO, anche quando la sua misura è falsata da eventuali **infiltrazioni d'aria**. Nel caso del **bollino blu**, è il CO corretto ad essere verificato e **non** il CO misurato.

### La carburazione.

Nel caso di un carburatore, l'immissione di aria e benzina nel motore avviene per aspirazione, in proporzione più o meno costante, dosata dai getti del carburatore stesso. Una maggior apertura della farfalla, produrrà una maggior aspirazione sia del carburante che dell'aria. La proporzione fra le due sostanze è regolata con una certa approssimazione e la nebulizzazione avviene, anch'essa, in maniera approssimativa. Il risultato è una combustione ben lontana dalla perfezione, e soprattutto risulta abbastanza variabile nel tempo e anche in funzione delle condizioni atmosferiche (pressione, temperatura, umidità).

Nei moderni sistemi di iniezione elettronica, solo l'aria viene immessa per aspirazione e la sua quantità è regolata dall'apertura della farfalla. Un opportuno sensore (pressione assoluta, massa d'aria...) misura costantemente la quantità d'aria aspirata. Una centralina elettronica comanda



l'apertura degli iniettori per tempi proporzionali, in modo da dosare la quantità di benzina iniettata in proporzione a quella dell'aria aspirata. Altri sensori (temperatura acqua, aria, posizione della farfalla, velocità del veicolo...) forniscono alla centralina informazioni utili a compensare le diverse condizioni di funzionamento del motore e il diverso peso specifico dell'aria.

Questo tipo di regolazione della miscela e di iniezione del carburante garantisce generalmente un corretto e costante rapporto stechiometrico e una corretta nebulizzazione del carburante, con evidenti vantaggi relativamente ai consumi e al rendimento del motore.

### **Il catalizzatore**

Le nuove normative in materia di anti-inquinamento, hanno imposto ai costruttori una pesante limitazione alle emissioni di gas nocivi (CO, HC, NOx).

La soluzione è stata l'adozione di particolari dispositivi, detti appunto catalizzatori, che sono costruiti utilizzando particolari metalli (platino e rodio) che hanno la caratteristica di favorire determinate reazioni chimiche. All'interno dei moderni catalizzatori trivalenti (o a tre vie) avvengono le seguenti reazioni:

Ossido-riduzione:  $\text{NO}_x = \text{N} + \text{O}$   
Ossidazione:  $\text{CO} + \text{O} = \text{CO}_2$   
Ossidazione:  $\text{HC} + \text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}$   
Ossidazione:  $\text{H} + \text{O} = \text{H}_2\text{O}$

Il risultato finale è, dunque, un abbattimento dei gas nocivi (CO, HC, NOx) con un aumento del CO<sub>2</sub>. Quest'ultimo, purtroppo, non lo possiamo eliminare. E' la naturale conseguenza dell'ossidazione di combustibili fossili (a base di carbonio).

Il catalizzatore non fa altro, insomma, che proseguire e completare quella reazione di combustione che è iniziata nel motore e che, per le ragioni viste prima, non si era conclusa. Il risultato finale è molto simile a quello previsto dalla teoria di Brettschneider, cioè vengono quasi annullati i gas indesiderati: la molecola di NO<sub>x</sub> viene scissa in ossigeno e azoto, il CO viene ossidato per formare CO<sub>2</sub>, gli HC vengono ossidati per formare altro CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Restano anidride carbonica (15%), acqua (11%) e azoto (74%), come visto a pagina 1.

In media, l'efficienza di un catalizzatore si riduce al 50% dopo 80 – 100.000 Km.

### **La sonda lambda**

Il massimo rendimento del catalizzatore e la sua massima durata di vita si ottengono solo a condizione che il rapporto aria/benzina e, quindi, le varie concentrazioni di gas allo scarico, abbiano dei ben precisi valori. Una miscela troppo grassa darebbe origine ad una quantità di ossigeno insufficiente per ossidare l'idrogeno e il carbonio. Una miscela troppo magra produrrebbe temperature troppo elevate con conseguente maggior concentrazione di ossidi di azoto, nonché una combustione di cattiva qualità con maggior emissione di HC.

La sonda lambda è un sensore che misura la quantità di ossigeno presente nei gas prima del catalizzatore. Si comporta come un interruttore: se l'ossigeno è troppo alto (miscela magra) il sensore produce una tensione di circa 100 mV. Se l'ossigeno è troppo basso (miscela grassa) il sensore produce una tensione di circa 800 mV. Non ci sono vie di mezzo. Secondo la sonda lambda la miscela non è mai corretta: o è magra o è grassa. La tensione prodotta dalla sonda viene misurata dalla centralina, che aumenta o diminuisce la quantità di benzina iniettata, mantenendo il rapporto stechiometrico in continua oscillazione intorno al punto ideale. Il corretto funzionamento del sistema si ottiene quando tutti i componenti (sonda, centralina...) sono adeguatamente rapidi nel "sentire" le variazioni di miscela e nel reagire di conseguenza. Una sonda lambda esaurita produrrà **con ritardo** le variazioni di tensione dovute alle variazioni di



ossigeno nei gas, comportando oscillazioni troppo ampie nella regolazione della miscela. Il risultato è un cattivo funzionamento del motore, una minor efficienza e più rapido invecchiamento del catalizzatore.

**Qualche esempio:** da notare che il valore di CO indicato è il valore misurato e NON quello corretto.

CO 0,1%  
CO2 14,9%  
HC 30 PPM  
O2 0,1%  
 $\lambda$  1,000

Miscela corretta, catalizzatore efficiente.

CO **0,6%**  
CO2 14,4%  
HC **100 PPM**  
O2 **0,6%**  
 $\lambda$  1,000

La miscela è corretta ma CO, O2 e HC troppo alti. Catalizzatore esaurito o assente.

CO 0,0%  
CO2 15%  
HC 20 PPM  
O2 **0,8%**  
 $\lambda$  **1,036**

Ossigeno elevato: miscela magra. Problemi di sonda lambda, aspirazione di aria, pressione benzina scarsa.

CO **0,9%**  
CO2 14,1%  
HC **150 PPM**  
O2 0,0%  
 $\lambda$  **0,967**

A prima vista, i valori elevati di CO e HC potrebbero far pensare a un catalizzatore esaurito. In realtà la miscela è grassa (lambda basso), quindi ossigeno insufficiente per l'ossidazione. Problemi di sonda lambda, sensori di temperatura e massa d'aria, pressione benzina elevata...

CO 0,1%  
CO2 14,9%  
HC **150 PPM**  
O2 0,1%  
 $\lambda$  0,996

HC elevati, il resto ok. Probabile perdita di un iniettore. La benzina non viene correttamente nebulizzata e non brucia. Anche problemi di valvole possono dare effetti simili.

CO 0,1%  
CO2 **12,7%**  
HC 25 PPM  
O2 **3,1 %**  
 $\lambda$  **1,132**

A prima vista, i valori elevati di ossigeno e lambda potrebbero far pensare a una miscela magra.



In realtà il valore di CO<sub>2</sub> è troppo basso, e la somma CO + CO<sub>2</sub> è inferiore a 15: aspirazione di aria dallo scarico o sull'analizzatore.

**Limiti di legge per revisioni e bollino blu**

Veicoli non catalizzati immatricolati fino al 31/9/1986:

- Prova al minimo: CO < 4,5%

Veicoli non catalizzati immatricolati dal 1/10/1986

- Prova al minimo: CO < 3,5%

Veicoli catalizzati immatricolati fino al 30/6/2002:

- Prova al minimo: CO < 0,5%  
- Prova a 2000 - 3000 RPM CO < 0,2%  
 $\lambda = 1 \pm 0,03$

Veicoli catalizzati immatricolati dal 1/7/2002:

- Prova al minimo: CO < 0,3%  
- Prova a 2000 - 3000 RPM CO < 0,2%  
 $\lambda = 1 \pm 0,03$