

Analisi dei fumi

La regolazione della combustione basata su regole pratiche pecca evidentemente di precisione anche se presenta l'indubbio vantaggio dell'immediatezza di esecuzione; una regolazione più rigorosa può essere ottenuta basandosi sulla composizione volumetrica dei prodotti della combustione, analizzando cioè — a intervalli regolari oppure con continuità — i fumi prodotti e deducendo l'eccesso d'aria (e) dalla percentuale di CO_2 , CO e O_2 in essi contenuti. Abbiamo già visto infatti al capitolo 22 che la reazione di combustione del carbonio, è: $\text{C}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ per cui, **qualora si bruciasse del carbonio puro, ogni molecola di ossigeno che con esso reagisce, darebbe origine a una molecola di anidride carbonica**. In questo caso, la legge di Avogadro **1** ci consente di affermare che l'anidride carbonica prodotta, occupa lo stesso volume dell'ossigeno impiegato per generarla, e poiché l'aria atmosferica, nelle condizioni normali, contiene il 20,9% in volume di ossigeno, ne segue che, bruciando il carbonio puro senza eccesso d'aria, la percentuale di anidride carbonica presente nei fumi deve essere del 20,9%.

È chiaro che nella realizzazione pratica, essendo comunque necessario un modesto eccesso d'aria e , sarà senz'altro:

$$(\text{CO}_2)_{\text{vol}} > 0,209$$

con una differenza tanto più sensibile rispetto al valore teorico, quanto maggiore è l'eccesso d'aria impiegato. Si potrà perciò valutare il valore di e dalla proporzione:

$$(\text{CO}_2)_{\text{vol}} : 0,209 = 1 : (1 + e) \quad (1)$$

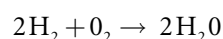
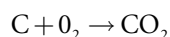
ricavando:

$$1 + e = \frac{0,209}{(\text{CO}_2)_{\text{vol}}} \quad (2)$$

formula che si risolve facilmente una volta misurata, con adatte apparecchiature, la percentuale in volume di CO_2 . I combustibili industriali però non sono costituiti da carbonio puro ma prevalentemente da carbonio e idrogeno, se trascuriamo gli elementi secondari la cui efficacia è limitatissima; indicando perciò, come di consueto, con:

- C la percentuale in massa di carbonio;
- H la percentuale in massa di idrogeno;

e ricordando le due reazioni di combustione:



1 La legge di Avogadro afferma che volumi uguali di gas diversi, nelle stesse condizioni di pressione e di temperatura, contengono ugual numero di molecole.

è facile osservare che:

- 12 parti in massa di carbonio si combinano con 32 di ossigeno per dare origine a 44 parti (in massa) di anidride carbonica;
- 4 parti di idrogeno si combinano con 32 di ossigeno per dar luogo a 36 parti di vapore d'acqua;

e quindi dedurre che per la combustione di 4 parti di idrogeno occorre la stessa quantità (in massa) di ossigeno che si rende necessaria per bruciare 12 parti di carbonio. In altre parole, per bruciare l'idrogeno occorre una quantità di ossigeno tripla di quella impiegata per il carbonio.

Si può perciò esprimere il volume di ossigeno che si combina con l'idrogeno con un'espressione del tipo:

$$3(\text{CO}_2)_{\text{vol}} \left(\frac{\text{H}}{\text{C}} \right)$$

ricordando l'equivalenza fra volumi di O_2 e di CO_2 già messa in evidenza.

Possiamo concludere infine che bruciando un combustibile industriale senza eccesso d'aria, l'ossigeno impiegato vale:

$$(\text{O}_2)_{\text{vol}} = (\text{CO}_2)_{\text{vol}} \left(1 + 3 \frac{\text{H}}{\text{C}} \right)$$

e di conseguenza la proporzione (1) diventa, nel caso più generale:

$$(\text{CO}_2)_{\text{vol}} \left(1 + 3 \frac{\text{H}}{\text{C}} \right) : 0,209 = 1 : (1 + e) \quad (3)$$

e da essa si ricava:

$$1 + e = \frac{0,209}{(\text{CO}_2)_{\text{vol}} \left(1 + 3 \frac{\text{H}}{\text{C}} \right)} \quad (4)$$

La formula (4) non è però direttamente applicabile inserendo in essa i valori della percentuale di CO_2 valutati con gli apparecchi di normale impiego:

- in primo luogo, il simbolo $(\text{CO}_2)_{\text{vol}}$ rappresenta il rapporto fra il volume di CO_2 e quello dell'aria che ha partecipato alla combustione, mentre gli apparecchi misurano il rapporto fra CO_2 e i fumi prodotti;
- in secondo luogo, nella misurazione pratica, il vapore d'acqua contenuto nei fumi si condensa prima che la misurazione venga effettuata; ne segue che quest'ultima tiene conto del rapporto fra la CO_2 e il fumo privo di vapor d'acqua.

Per questi motivi, la formula (4) viene rielaborata tenendo conto degli effettivi valori dei fumi e assume la forma definitiva:

$$1 + e = \frac{0,209}{(\text{CO}_2)_{\text{vol}}} \cdot \frac{1 + 3 \frac{\text{H}}{\text{C}} (\text{CO}_2)}{1 + 3 \frac{\text{H}}{\text{C}}} \quad (5)$$

in cui il simbolo (CO_2) rappresenta la percentuale di anidride carbonica contenuta nei prodotti della combustione, così come è stata rilevata dall'apparecchio misuratore.

La sola misurazione della percentuale di CO_2 contenuta nei fumi non è sufficiente ad assicurarci che la combustione sia avvenuta in piena regolarità; basta infatti pensare che alimentando il focolare con aria in difetto, parte del combu-

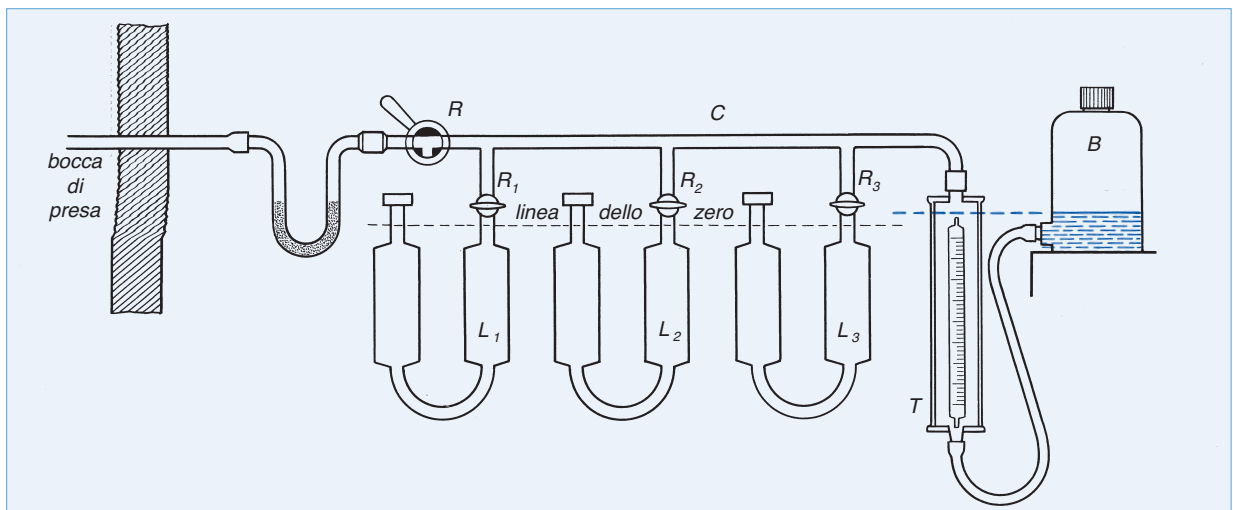
stibile non brucia completamente, producendo una certa quantità di ossido di carbonio (CO), e lo stesso può dirsi per la parziale combustione dell'idrogeno. È perfettamente giustificabile perciò in tutti gli impianti di una certa importanza, l'installazione di opportune apparecchiature atte a misurare le percentuali di **anidride carbonica**, di **ossido di carbonio**, e di **ossigeno** presenti nei prodotti della combustione. Questi apparecchi sono basati su due principi distinti:

- **assorbimento e relativa misurazione dei componenti** che interessano la combustione da parte di particolari sostanze (metodi chimici);
- **rilevazione della conducibilità termica** degli elementi o dei composti chimici che influiscono sulla combustione (metodi fisici).

Oltre a questa distinzione se ne può impostare una seconda basata sulla maggiore o minore rapidità di esecuzione della misura; esistono infatti apparecchi molto precisi che però richiedono un tempo piuttosto lungo per fornire i risultati dell'analisi, mentre altri danno letture immediate a scapito però della precisione di misura.

Per quanto ci riguarda ci limiteremo a descrivere il sistema di analisi dell'apparecchio di Orsat, (per misure saltuarie) limitandoci a brevi cenni indicativi sugli strumenti industriali che forniscono rilevazioni immediate e continue. **L'apparecchio di Orsat** appartiene alla categoria degli strumenti ad assorbimento e permette di misurare le percentuali in volume di anidride carbonica, ossido di carbonio e ossigeno; esso consta (FIGURA 1) di tre laboratori (L_1 , L_2 e L_3) per l'assorbimento del composto chimico da analizzare, di una buretta (T) graduata da 0 a 100 (dal basso verso l'alto) e di una bottiglia mobile (B) contenente acqua acidulata la cui spostamento verticale consente di effettuare azione di risucchio o di spurgo nel collettore (C) e nei singoli laboratori.

1 Apparecchio di Orsat (schema)



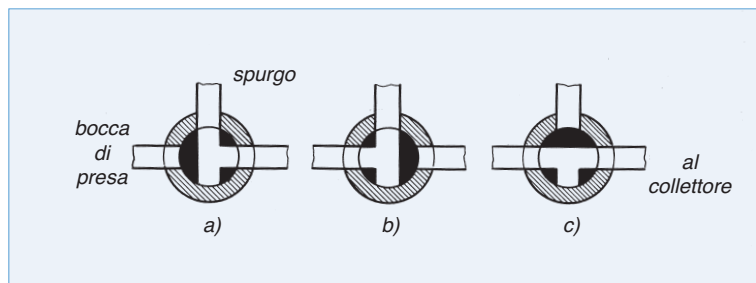
La presa dei fumi deve avvenire in un punto del camino in cui si possa ritenere che la massa gassosa presenti carattere di omogeneità per non procedere a misure imprecise; il tubo di presa comunica con il collettore (C) attraverso un tubicino a forma di U che contiene lana di vetro per eliminare le impurità e un rubinetto a tre vie (R) che consente di escludere l'apparecchio, di spurgare il tubo o di mettere in comunicazione l'apparecchio con il tubo di presa per il prelievo dei fumi.

L'operazione procede nel seguente modo:

- si prepara l'apparecchio facendo in modo che i reagenti contenuti nei vari laboratori raggiungano la linea di azzeramento; a tale scopo, ruotato il rubinetto (R) nella posizione di (FIGURA 2.a), si solleva la bottiglia (B) in modo da trava-

sare l'acqua entro la buretta espellendo eventuali residui contenuti nell'apparecchio, poi, ruotato (R) nella posizione b) e aperto (R_1), si isola lo strumento e abbassando la bottiglia si effettua una leggera azione aspirante che richiama il reagente contenuto in (L_1) fino alla linea dello zero. A tal punto si chiude il rubinetto (R_1) e si apre (R_2), procedendo nel modo già descritto fino a che le tre ampolle non saranno pronte per la prova.

- B.** Si pone il rubinetto (R) nella posizione c) di (FIGURA 2), e si abbassa la bottiglia (B) in modo da aspirare i prodotti della combustione; è bene comunque procedere a una ulteriore pulizia interna dell'apparecchio, espellendo i fumi aspirati (ruotando il rubinetto in posizione a) e alzando la bottiglia), ripetendo più volte l'operazione di aspirazione e spurgo. Ciò fatto si aspirano, con il procedimento già descritto, 100 cm³ di fumo entro la buretta (T).



2 Posizioni di manovra del rubinetto nell'apparecchio di Orsat: a) fase di spurgo; b) apparecchio escluso; c) comunicazione diretta

- C.** Isolato l'apparecchio con il solito rubinetto (R) (posizione b) si apre il rubinetto (R_1) e si travasa il gas contenuto nella buretta entro il laboratorio (L_1); manovrando, come sempre, la bottiglia (B); anche questa operazione va ripetuta più volte affinché il reagente possa esplicare una efficace azione di assorbimento. Il primo laboratorio **contiene una soluzione di potassa caustica e serve per l'assorbimento e relativa misurazione dell'anidride carbonica**; in effetti, conclusa la fase di assorbimento, ponendo la bottiglia (B) in posizione tale che il livello dell'acqua sia uguale a quello entro la buretta (T), la differenza fra il volume attuale (che si legge sulla scala) e quello primitivo (100 cm³) rappresenta la percentuale di CO₂ assorbita dal reagente contenuto in (L_1).
- D.** Si ripetono le operazioni già descritte inserendo il laboratorio (L_2); questo contiene **acido pirogallico che ha la proprietà di assorbire l'ossigeno** per cui la relativa percentuale può essere determinata leggendo sulla scala graduata della buretta la differenza fra il volume attuale e quello precedente.
- E.** Si ripete infine l'operazione **facendo assorbire l'ossido di carbonio presente nei fumi da una soluzione di cloruro rameoso** contenuta nel laboratorio (L_3) e valutandone la percentuale.

È chiaro che una simile analisi non può essere immediata, in contrasto con le necessità di una buona regolazione che impongono di agire tempestivamente sulla combustione in modo da ridurre al minimo le perdite di calore; esistono perciò altri apparecchi completamente automatizzati che consentono misurazioni continue e letture immediate.

Questi sono basati essenzialmente sulla diversa conducibilità termica o sulla diversa densità dei vari gas che nel loro complesso costituiscono i prodotti della combustione. È noto che ogni gas presenta un certo valore di conducibilità termica; assunto uguale a 100 il valore della conducibilità termica dell'aria, per gli altri gas che interessano il processo di combustione, valgono i seguenti dati:

tipo di gas	Conducibilità termica
ossigeno	101
anidride carbonica	59
vapore d'acqua	130
ossido di carbonio	96
idrogeno	700
metano	126

È possibile perciò rilevare la percentuale di CO₂ esistente nei fumi facendo passare quest'ultimi in un tubicino contenente un sottile filo di platino riscaldato con corrente elettrica di intensità costante. **Il filo tende a variare la propria temperatura in funzione della conducibilità termica del flusso gassoso che lo investe;** varia perciò anche la resistenza elettrica e tale variazione risulta proporzionale alla quantità di CO₂ contenuta nei fumi, quantità che può essere letta direttamente (in percentuale) sulla scala dello strumento misuratore.

Un sistema analogo non è adattabile alla valutazione del CO in quanto la sua conducibilità termica differisce pochissimo da quella dell'aria; tenuto conto però che l'ossido è un gas combustibile, è possibile ossidarlo con altra aria in presenza di un filo di platino percorso da corrente elettrica provocando un aumento di temperatura proporzionale alla quantità di CO contenuta nei fumi.

Anche in questo caso, l'apparecchio misura la variazione della resistenza elettrica e riporta direttamente in apposita scala le percentuali di ossido di carbonio. Esistono ovviamente altri sistemi e altre apparecchiature per l'analisi, più o meno efficace dei prodotti della combustione, ma riteniamo che la loro trattazione esuli dal presente testo, essendo sufficienti i concetti informativi fin qui esposti.