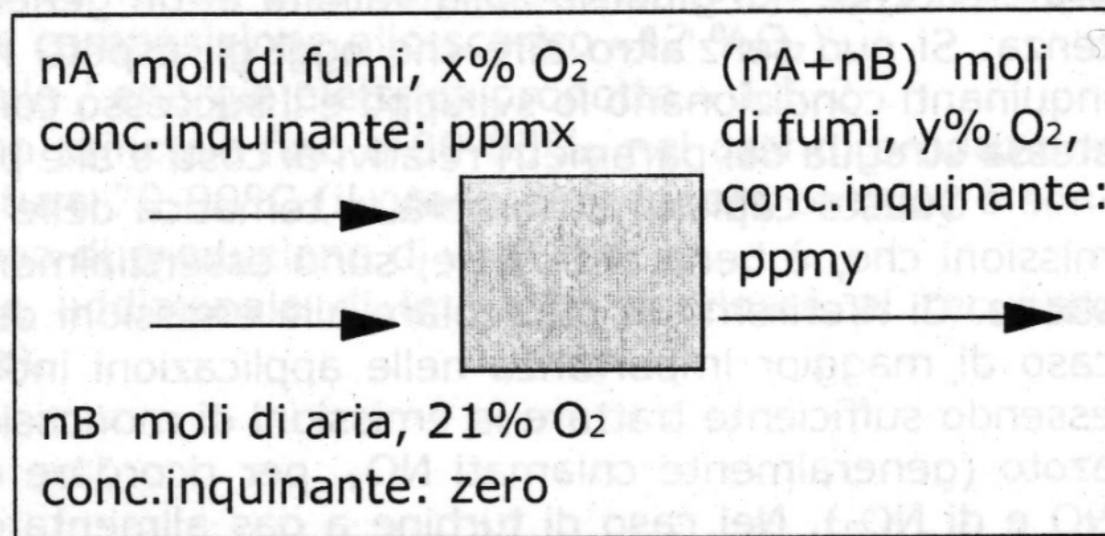
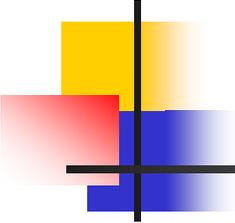


Emissioni

Unità di misura delle emissioni

- combustibili liquidi o gassosi in caldaie 3% vol O₂
- combustibili solidi in caldaie 6% vol O₂
- fumi di scarico di turbine a gas 15% vol O₂
- motori alternativi 5% vol O₂





Unità di misura delle emissioni

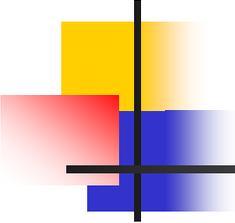
$$n_A \cdot \frac{x}{100} + n_B \cdot \frac{21}{100} = \frac{y}{100} \cdot (n_A + n_B) \Rightarrow \frac{n_B}{n_A} = \frac{y-x}{21-y} \quad (7.2)$$

$$n_A \cdot \frac{ppm_x}{10^6} + n_B \cdot 0 = \frac{ppm_y}{10^6} \cdot (n_A + n_B) \Rightarrow ppm_x = \left(1 + \frac{n_B}{n_A}\right) \cdot ppm_y \quad (7.3)$$

dalla 7.2 e 7.3 si ottiene facilmente:

$$ppm_y = ppm_x \cdot \frac{21-y}{21-x} \quad (7.4)$$

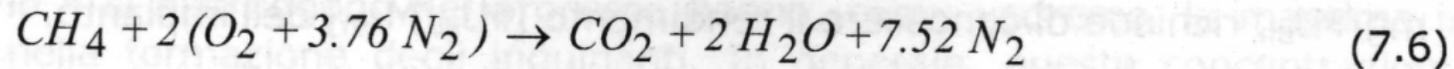
Ad esempio 60 ppmvd al 15% di O₂ corrispondono a 150 al 6%, a 180 al 3% e a 210 a 0%, indipendentemente dal tipo di inquinante.



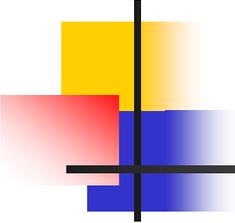
Unità di misura delle emissioni

$$1 \text{ ppmvd} = 1 \text{ ppmv} \cdot \frac{\text{moli totali}}{\text{moli totali} - \text{moli } H_2O} \quad (7.5)$$

Ad esempio, per la combustione stechiometrica di metano si ha la reazione:



dove 3.76 è il rapporto tra O_2 e N_2 nell'aria, nell'ipotesi semplificata che la loro concentrazione sia 21% e 79%. Questa reazione produce 10.52 moli di fumi, di cui 2 sono di vapore acqueo: il rapporto tra fumi totali e fumi secchi vale pertanto $10.52/8.52 = 1.235$. Quindi, se misuriamo ad esempio 60 ppmv nei fumi totali, avremo un'emissione di 74 ppmvd nei fumi secchi.

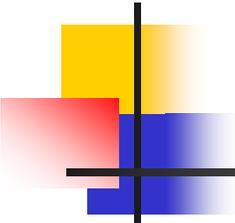


Unità di misura delle emissioni

Oltre alla concentrazione volumetrica, è altrettanto naturale riferirsi a una **concentrazione massica**, che potrebbe essere espressa in kg (o mg) di inquinante rispetto ai kg di fumi secchi. E' tuttavia più frequente il riferimento al Normal metro cubo (Nm^3), che è la quantità di un certo gas (kmoli o kg) contenuta in un metro cubo dello stesso gas a $p_0 = 101325$ Pa (pressione atmosferica) e $T_0 = 0^\circ C$ (lo standard metro cubo si riferisce invece a $15^\circ C$). In queste condizioni il volume molare normale vale:

$$v_{mol} = \frac{R \cdot T_0}{p_0} = 22.413 \frac{Nm^3}{kmol}$$

$$1 \text{ kmole} = 22.413 \text{ Nm}^3 \quad ; \quad 1 \text{ kg} = \frac{22.413}{MM} \text{ Nm}^3 \quad (7.7)$$



Unità di misura delle emissioni

Quindi, per un gas avente una certa massa molecolare, il rapporto tra Nm^3 e kg è costante e pertanto il Nm^3 è da considerarsi alla stregua di un'unità di massa. Il riferimento al Nm^3 invece che al kg è comodo perché permette di convertire le concentrazioni volumetriche in massiche senza bisogno di conoscere la massa molecolare del gas combusto, la cui determinazione non è immediata. E' però necessario introdurre la massa molecolare dell'inquinante: infatti, riferendosi per esempio al monossido di carbonio con $MM=28$ e ricordando la (7.7), si ottiene:

$$1 \text{ ppmvd}_{CO} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}_{CO}}{1 \text{ kmol fumi secchi}} = \frac{28 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_{CO}}{22.413 \text{ Nm}^3} = 1.249 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad (7.8)$$

Con la stessa formulazione, se ci si riferisce a NO_2 ($MM=46$) 1 ppm equivale a 2.052 mg/Nm^3 , per SO_2 ($MM=64$) lo stesso numero diventa 2.855 e così via. E' da notare che la concentrazione in massa dipende ancora dalla diluizione con aria o vapore dei fumi: per effettuare le conversioni a diversi tenori di O_2 e ai fumi secchi si usino sempre la (7.4) e la (7.5), con mg/Nm^3 invece che ppmv.

Unità di misura delle emissioni

Problema: combustione di metano puro (CH_4) con $\text{LHV}=50 \text{ MJ/kg}$. E' data un'emissione di 50 mg di CO per Nm^3 di fumi secchi con il $3\% \text{ O}_2$. Esprimerla in mg/Nm^3_f e in mg/MJ_{th} .

Soluzione: conviene anzitutto riportare il valore assegnato alla combustione stechiometrica del metano (eq.7.6), cioè a 0% di O_2 nei fumi:

$$50 \left(\frac{\text{mg CO}}{\text{Nm}^3_g} \right)_{3\% \text{ O}_2} = 50 \cdot \frac{21}{21-3} = 58.3 \left(\frac{\text{mg CO}}{\text{Nm}^3_g} \right)_{0\% \text{ O}_2}$$

dove il pedice "g" è riferito ai fumi. Dalla reazione di combustione (7.6) si producono 8.52 moli di fumi secchi per mole di metano (pedice "f", fuel). Si avrà:

$$58.3 \frac{\text{mg CO}}{\text{Nm}^3_g} \cdot 8.52 \frac{\text{Nm}^3_g}{\text{Nm}^3_f} = 497 \frac{\text{mg CO}}{\text{Nm}^3_f}$$

che risponde al 1° quesito. Quindi, avendo il metano una massa molecolare MM pari a 16.03 , un Nm^3 pesa $16.03/22.413 = 0.725 \text{ kg}$ (eq.7.7); essendo il suo potere calorifico inferiore pari a 50 MJ/kg , per rispondere al 2° quesito si avrà:

$$\frac{497 \text{ mg CO} / \text{Nm}^3_f}{0.725 \text{ kg f.s.} / \text{Nm}^3_f} = 685 \frac{\text{mg CO}}{\text{kg f}} ; \quad \frac{685 \text{ mg CO} / \text{kg f}}{50 \text{ MJ}_{th} / \text{kg f}} = 13.7 \frac{\text{mg CO}}{\text{MJ}_{th}}$$

CO e NO

[Lozza]

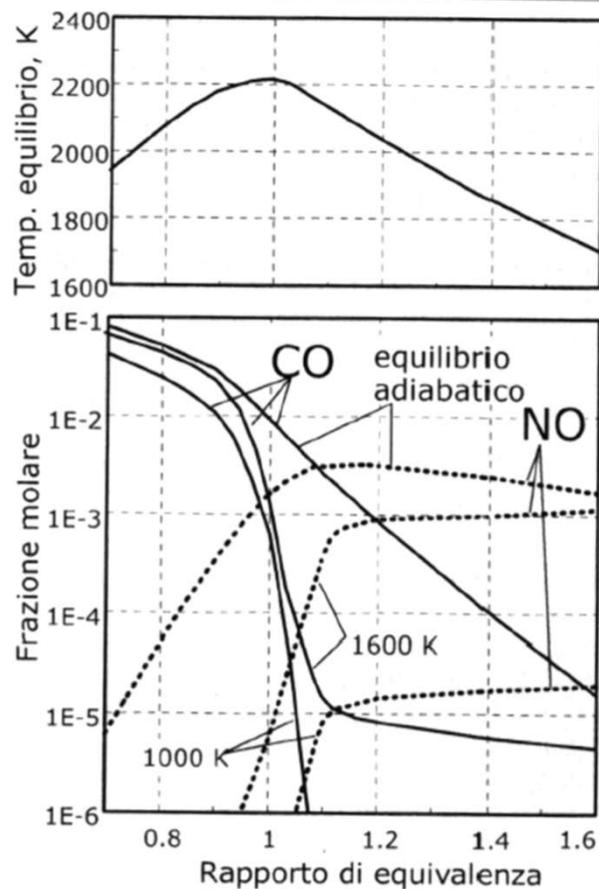


Fig.7. 2: Produzione di CO (linee continue) e di NO (linee tratteggiate), all'equilibrio chimico, in una fiamma premiscelata di metano e aria a 25°C con diversi λ , alla temperatura di equilibrio della fiamma adiabatica (il cui valore è riportato nel grafico in alto) e dopo raffreddamento a 1600 e 1000 K.

$$[OH]_{eq} = K(T) \cdot [H_2O]^{1/2} \cdot [O_2]^{1/4}$$

$$-\frac{d[CO]}{dt} = k [CO] [OH]_{eq} = k \cdot K(T) \cdot [CO] \cdot [H_2O]^{1/2} \cdot [O_2]^{1/4}$$

Rapporto eq. $\Lambda = (a/f)/(a/f)_s$
 a = massa aria
 f = massa combustibile
 s = condizioni stechiometriche