

Principali Caratteristiche di un Combustore GT

Diversamente dei sistemi di combustione tradizionali i combustori per Turbine a Gas hanno la particolarità di operare con:

- elevate temperature in ingresso;
- alta pressione;
- flusso in ingresso (proveniente dal compressore) ad alta velocità;

Le principali caratteristiche di un combustore GT sono:

- Elevata efficienza di combustione
- Sistema di accensione affidabili
- Ampio limite di stabilità
- Basse perdite di carico
- Adeguato profilo di temperatura (*patern factor*) alla uscita della camera
- Basse emissioni

Multifuel design

Impianti per l'energia 2010-2011

La Combustione nelle Turbine a Gas

“Reazione fortemente esotermica tra un combustibile e un reagente”

- Combustibile —————→ Gassoso o Liquido (idrocarburo)
- Reagente —————→ Aria

Regimi di combustione:

- **Deflagrazione** (<1 m/s): è caratterizzata dalla presenza di una fiamma che propaga attraverso una miscela infiammabile.
- Detonazione (>1 km/s)

La fiamma può essere definita come rapida alterazione chimica che ha luogo in un sottile layer, evolvendo forte gradienti di temperatura e concentrazione.

Concetti base sulla combustione

- Stechiometria
- Potere calorifico
- Temperatura adiabatica di fiamma
- Efficienza di combustione
- Limiti di fiammabilità
- Fisica vs Chimica

Stabilità di fiamma in camera di combustione

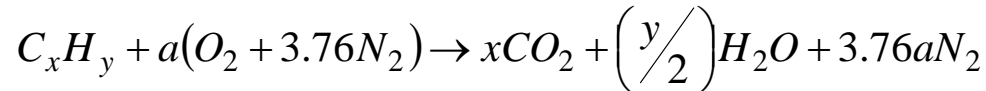
Auto Accensione

- Flashback
- Lean Blow Out

Stechiometria

“La quantità stechiometrica di ossidante è la strettamente necessaria per bruciare una determinata quantità di combustibile.”

Combustione di un idrocarburo generico (C_xH_y)



$$a = x + \frac{y}{4}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{st} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right) = \frac{4.76 \cdot a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}}$$

Aria-CH ₄ : $(A/F)_{st} = 17.11$

Rapporto di equivalenza

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{st}}{\left(\frac{A}{F}\right)}$$

$\Phi < 1 \rightarrow$ miscela magra

$\Phi = 1 \rightarrow$ miscela stechiometrica

$\Phi > 1 \rightarrow$ miscela ricca

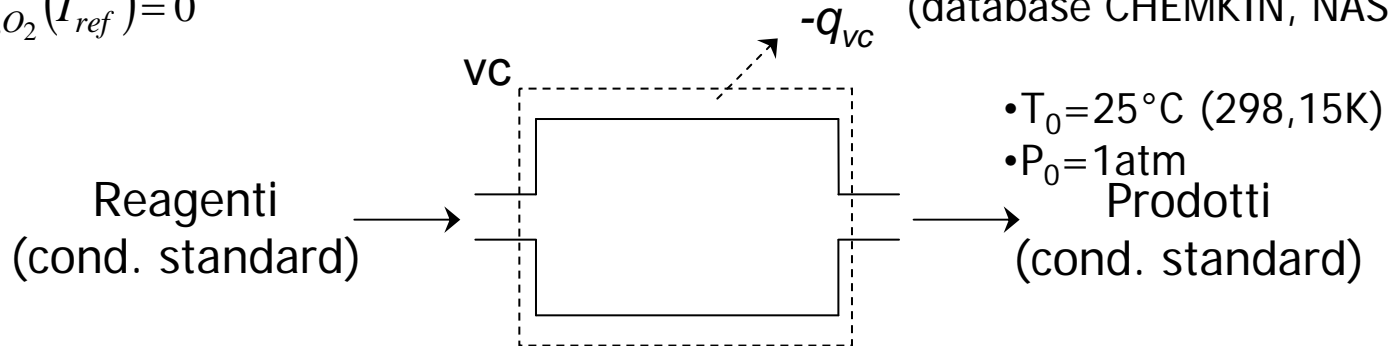
Potere Calorifico (PCI e PCS)

Entalpia assoluta

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta\bar{h}_{s,i}(T_{ref})$$

$$\bar{h}_{f,O_2}^0(T_{ref}) = 0$$

Condizione standard di riferimento
(database CHEMKIN, NASA)



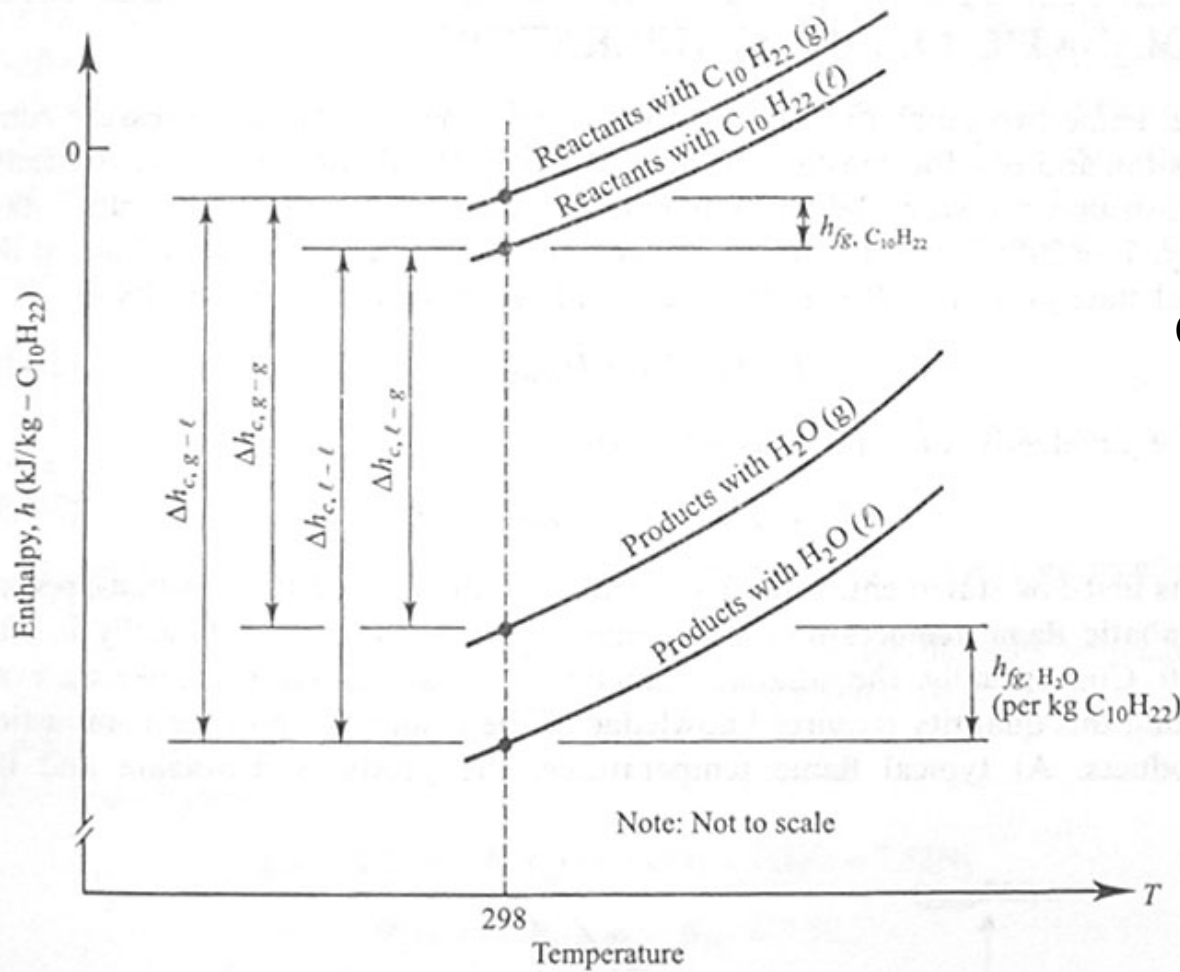
Entalpia di reazione

$$\Delta h_R \equiv q_{VC} = h_{prod} - h_{reag} \longrightarrow \text{Combustione completa: prodotti } \underline{\text{CO}_2} \text{ e } \underline{\text{H}_2\text{O}}$$

Potere calorifico = (-1) x Entalpia di reazione

- **PCI** – Potere Calorifico Inferiore: H_2O vapore
- **PCS** – Potere Calorifico Superiore: H_2O liquido

Potere Calorifico (PCI e PCS)



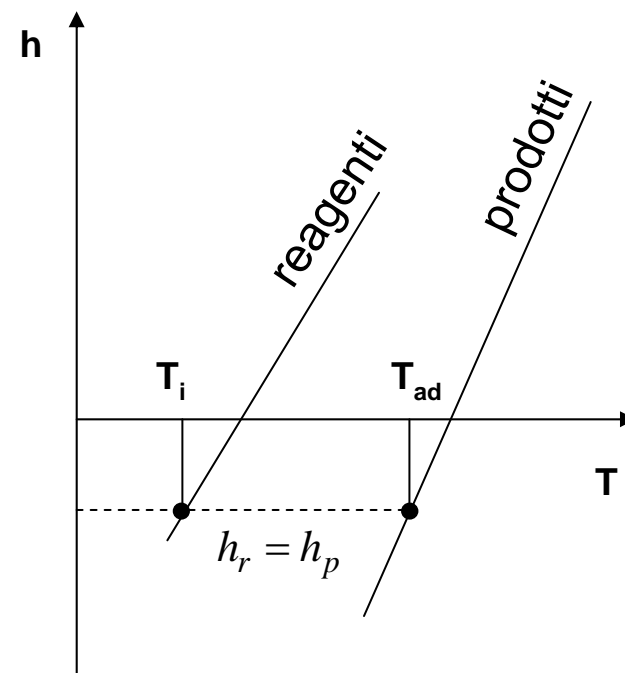
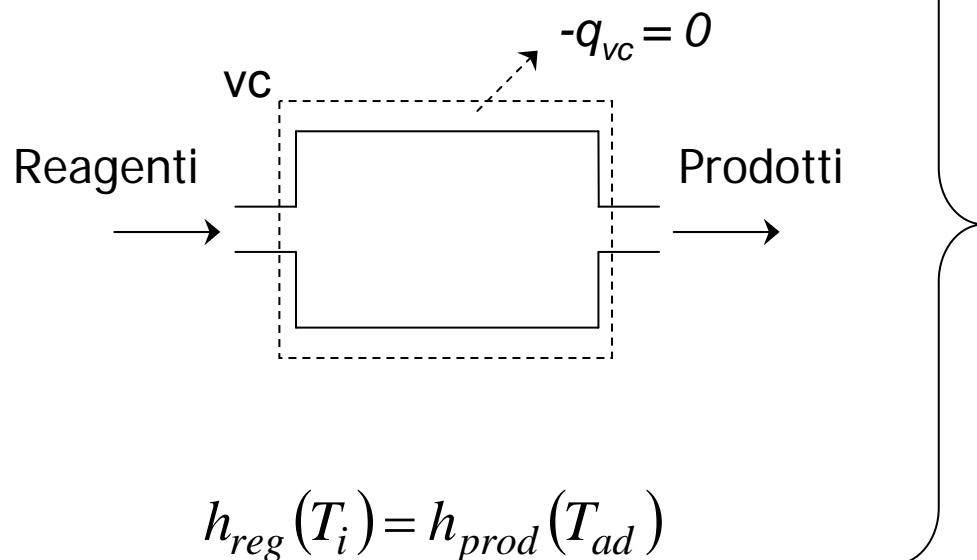
Combustione in aria di
 $C_{10}H_{22}$

PCI = 47,644 kJ/kg_f

PCS = 44,242 kJ/kg_f

Temperatura Adiabatica di Fiamma

- T_{ad} pressione costante (GT)
- T_{ad} volume costante (ciclo Otto)



Nell'ipotesi di un volume di controllo adiabatico e equilibrio chimico, la temperatura dei prodotti della combustione è pari alla temperatura adiabatica di fiamma (l'energia di reazione è totalmente convertita in calore sensibile).

Principali Fattori che Determinano la Temperatura Adiabatica di Fiamma

•Rapporto di equivalenza:

Aumento lineare fino a $\Phi = 0.8$ dovuto al aumento del c_p con la temperatura;

Diminuzione dovuta alle reazioni di dissociazione (fortemente endotermiche) ad alta temperatura e presenza di "inerti".

•Temperatura dell'aria in ingresso:

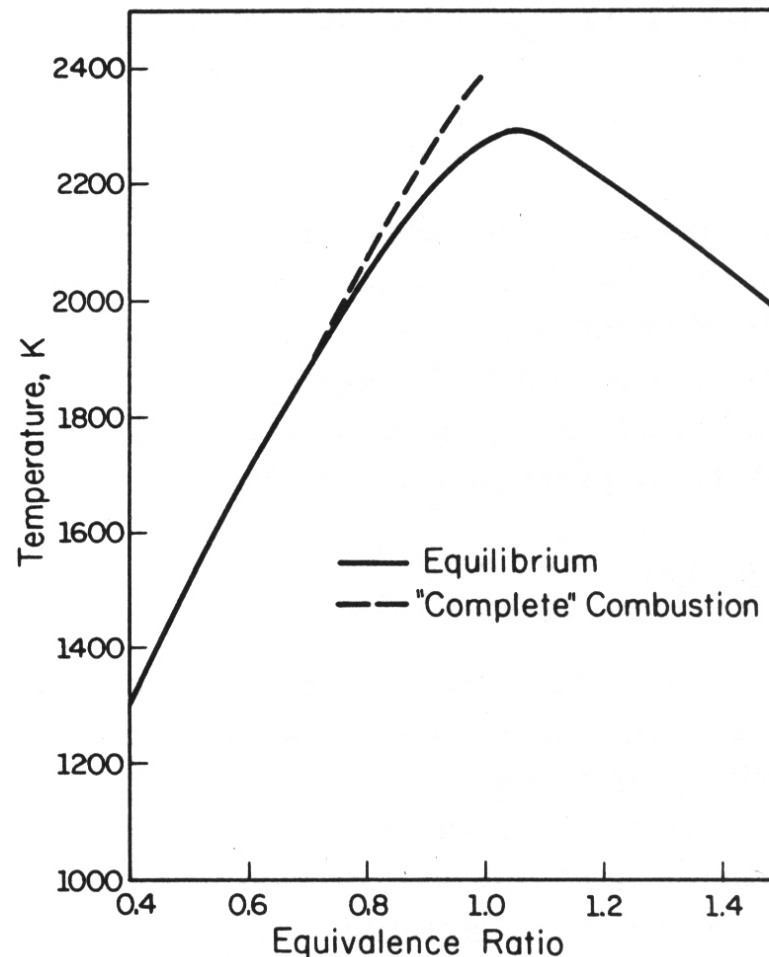
Un aumento della temperatura dell'aria in ingresso promuove un aumento della temperatura di fiamma;

Questo aumento diminuisce col aumentare della temperatura in ingresso;

Vicino alla stechiometria questo effetto è meno intenso.

•Pressione:

Un aumento della pressione induce un aumento della temperatura di fiamma, principalmente dovuto alla inibizione delle reazioni di dissociazione.



Efficienza di Combustione

“L’efficienza di combustione è usata come misure del grado di completezza della combustione e delle perdite di calore .”

L’efficienza di combustione è definita come il rapporto tra l’aumento dell’entalpia sensibile e il massimo aumento di entalpia, in condizione adiabatiche e di combustione completa (con $\Phi = \Phi_{\text{globale}}$).

$$\eta = \frac{(1 + A/F) \bar{h}_p - A/F \bar{h}_r}{PC}$$

Tipicamente, nei combustori per GT, η eccede il 98%.

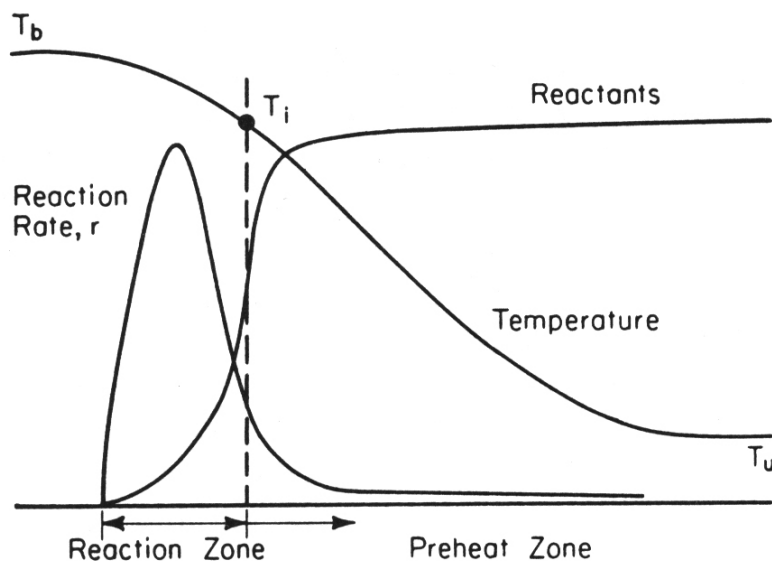
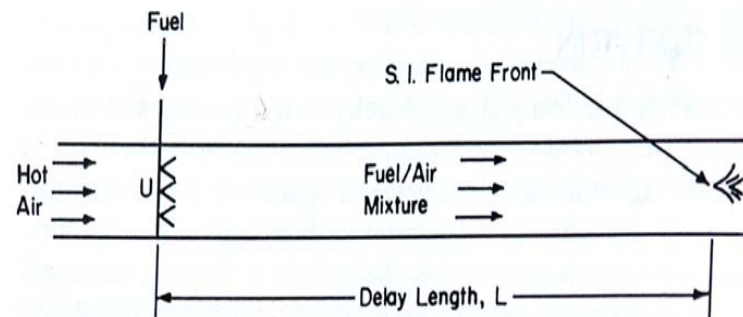
Nelle condizioni di equilibrio non si verifica mai il caso di combustione completa. In particolare, ad alta temperatura le reazioni di dissociazione (fortemente endotermiche) hanno un peso significativo nella riduzione della temperatura di fiamma.

Classificazione delle Fiamme: Fiamma Premiscelata

Fiamma Premiscelata

Ossidante e combustibile formano una miscela omogenea.

La fiamma si propaga attraverso la miscela ad una velocità pari a S_L nel caso laminare e S_T nel caso turbolento.



Velocità di Fiamma Laminare:

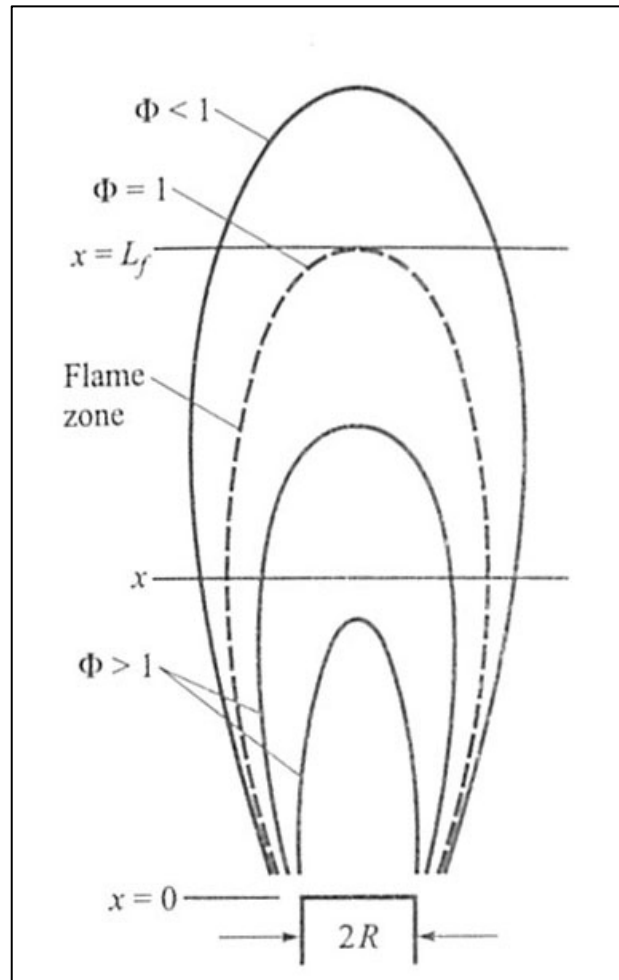
$$S_L \approx (\text{diffusività termica} \times \text{velocità di reazione})$$

Velocità di Fiamma Turbolenta:

$$S_T \approx 3.5(v'_{rms}/S_L), \quad (v'_{rms}/S_L) \gg 1$$

Nel caso turbolento la velocità di fiamma aumenta significativamente.

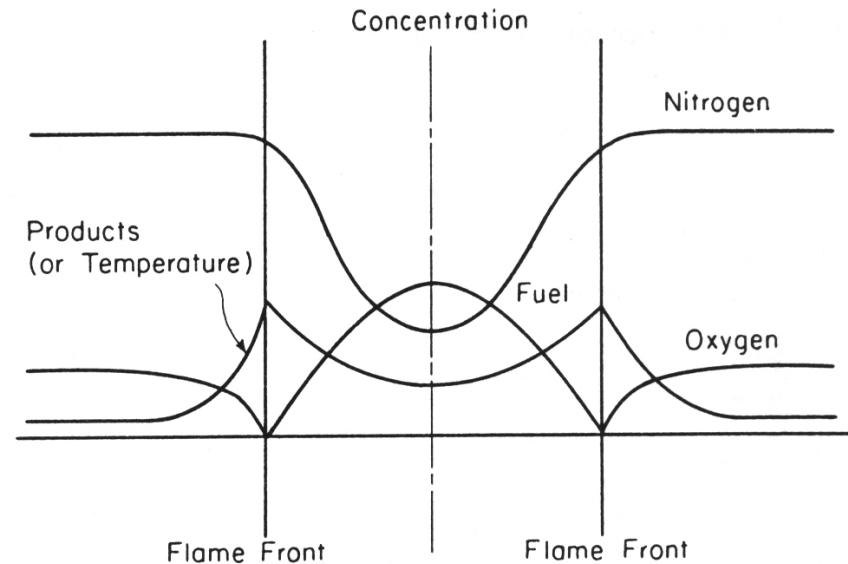
Classificazione delle Fiamme: Fiamma Diffusione



Fiamma Diffusione

Ossidante e combustibile sono separati prima della combustione.

La combustione avviene in condizioni stechiometriche, anche se il $\Phi \neq 1$.



Limiti di Fiammabilità

“Determina il range del rapporto di equivalenza in cui la miscela è infiammabile.”

- Limite magro: $\Phi \approx 0.5$
- Limite ricco: $\Phi \approx 3$

Un aumento della pressione o della temperatura tende ad aumentare il range di infiammabilità (in particolare per le miscele idrocarburi-aria).

Nel range 10kPa – 5MPa (0.1-50bar) il limite magro dipende poco dalla pressione.

La temperatura ha meno influenza sul limite di fiammabilità che la pressione.

Fisica vs Chimica

In un processo di combustione vengono coinvolti dei fenomeni di carattere fisico e di carattere chimico.

Nel presente contesto, la fisica include il trasferimento di calore, il trasferimento di massa, la termodinamica e la fluidodinamica. Nel caso dei combustori per GT, sono i fenomeni fisici a limitare il processo di combustione.

La liberazione di energia attraverso la reazione chimica è ovviamente cruciale nella globale della combustione, però questa avviene in tempi così brevi che può essere trascurata in confronto ad alti processi.

Invece, nella valutazione delle emissioni di un combustore i processi chimici sono di estrema importanza.

Per esempio, nel caso delle fiamme di diffusione, la aerodinamica del sistema, la quale include l'intensità di turbolenza e la diffusione dei reagenti e prodotti, determina quasi in esclusivo la dimensione e stabilità della fiamma.



Auto Ignition (Auto Accensione)

“Accensione spontanea di una miscela comburente-combustibile (premiscelata).

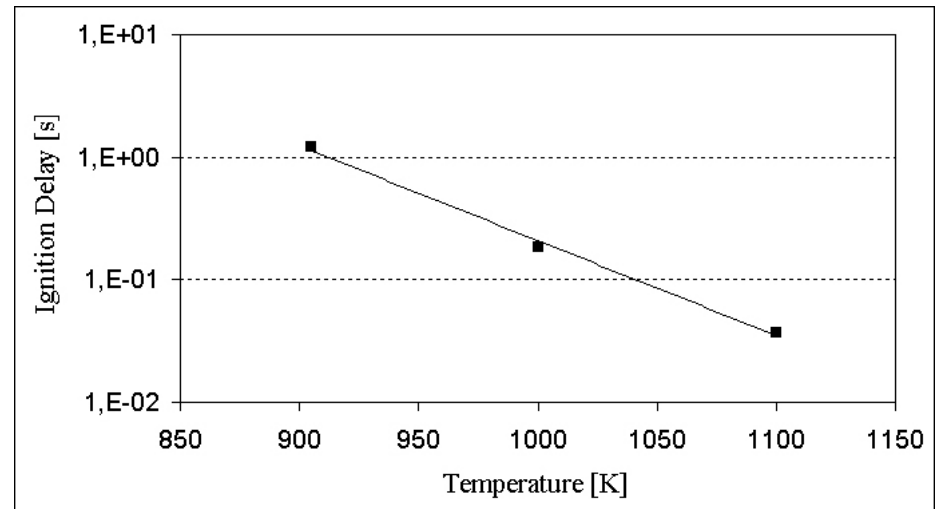
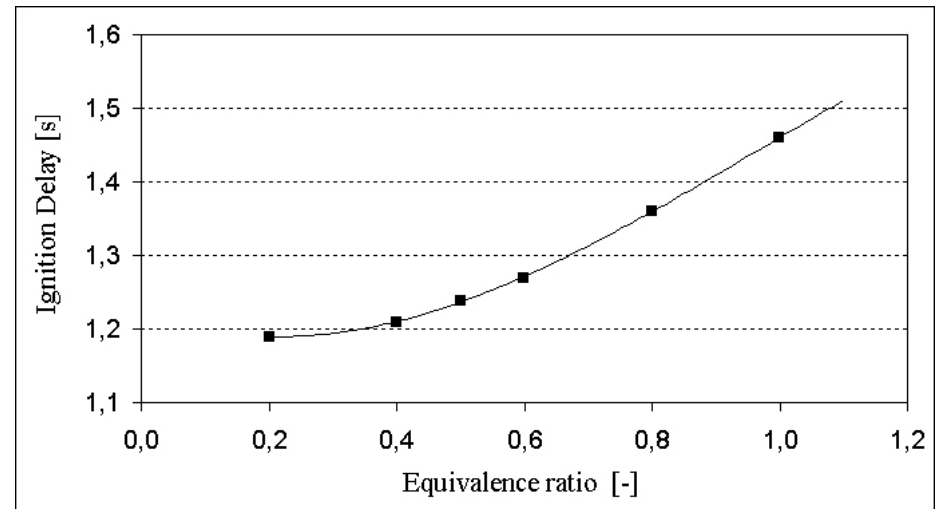
Avviene quando il tempo di residenza della miscela è superiore al ritardo all'accensione”

Nelle GT, si verifica una competizione di tempi caratteristici:

- Ritardo all'accensione della miscela;
- Tempo di residenza nel bruciatore

Il ritardo all'accensione è fortemente dipendente dalla temperatura. Ad aumento di 100K, il ritardo all'accensione si riduce di un ordine di grandezza.

Il ritardo all'accensione è poco dipendente dal rapporto di equivalenza.



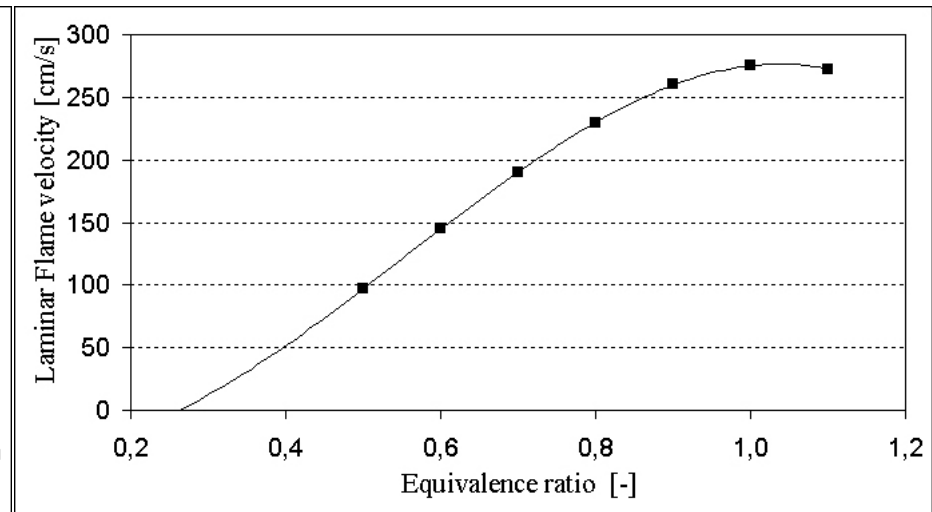
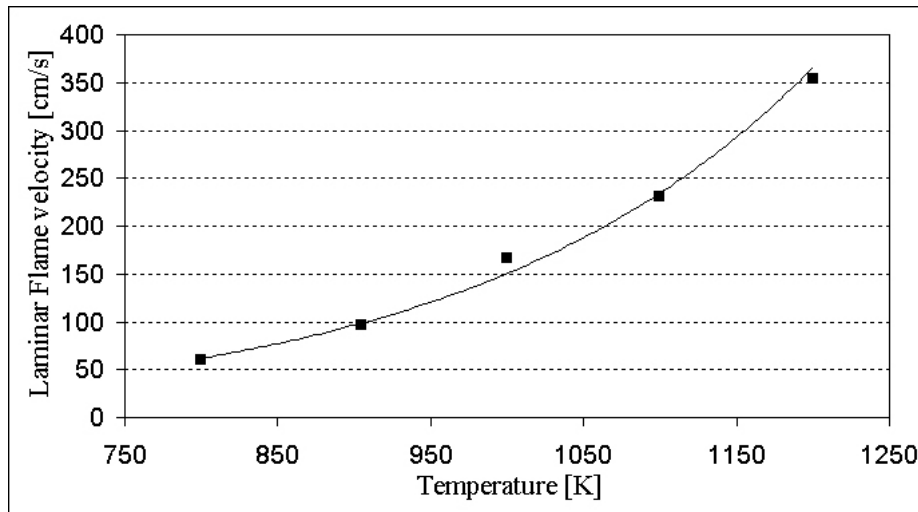
Flashback (Ritorno di Fiamma)

“Nei combustori delle GT, per flashback si intende il ritorno di fiamma, in una miscela premiscelata, verso il sistema di iniezione combustibile (al interno del bruciatore).”

Il fenomeno di flashback può essere indotto da uno dei seguenti meccanismi:

1. Propagazione della fiamma sullo strato limite;
2. Propagazione turbolenta lungo il core flow;
3. Violente instabilità di combustione;
4. Vortex breakdown indotto dalla combustione;

$$\frac{u_{avg}}{D} \cdot \frac{\alpha}{S_L^2} > 1/8$$



Propagazione della Fiamma sullo Strato Limite

$$S_T = S_L \cdot \left[3.5 \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{0.7} \right]$$

Velocità di fiamma turbolenta

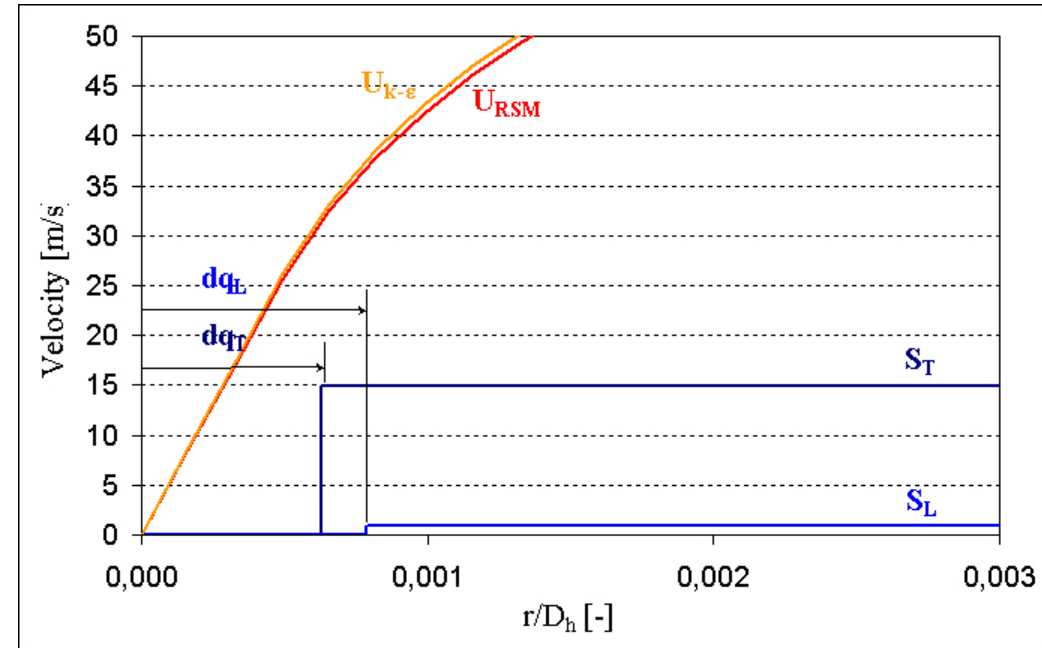
$$d_{q,L} = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot \frac{\alpha}{S_L}$$

Distanza di quenching laminare

$$d_{q,T} = 10 \cdot \frac{\alpha}{S_T - 0.63 \cdot u'}$$

Distanza di quenching turbolenta

Competizione tra la velocità di fiamma e velocità del flusso nello strato limite.



Stabilità di Fiamma (Lean Blow Out)

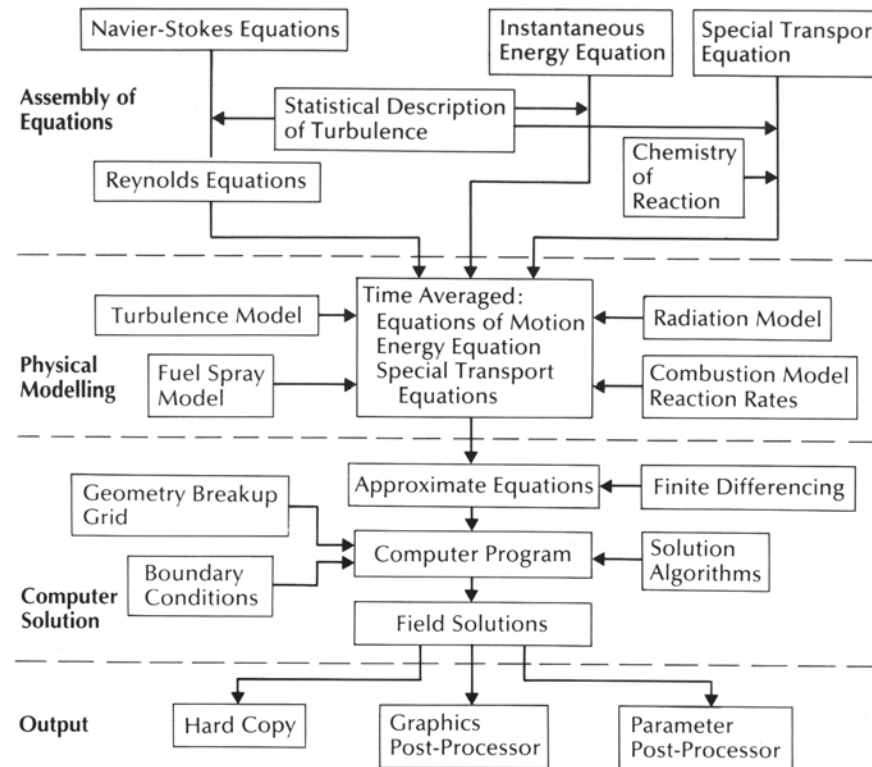
Stesso principio fisico del ritorno di fiamma, in questo caso si ha una competizione tra la velocità di fiamma e la velocità media dei reagenti.

Quando la velocità media dei reagenti è troppo elevata, la fiamma non riesce a stabilizzarsi. Si dice che la fiamma “vola via”.

$$\frac{u_{avg}}{D} \cdot \frac{\alpha}{S_L^2} > 1/8$$

- diametro caratteristico pari al diametro della camera
- temperatura intermedia tra quella di ingresso e quella adiabatica di fiamma
- velocità è quella media di attraversamento della camera

Processo di Calcolo per la Combustione in GT



I meccanismi di combustione ridotti (es. CH₄-aria):

