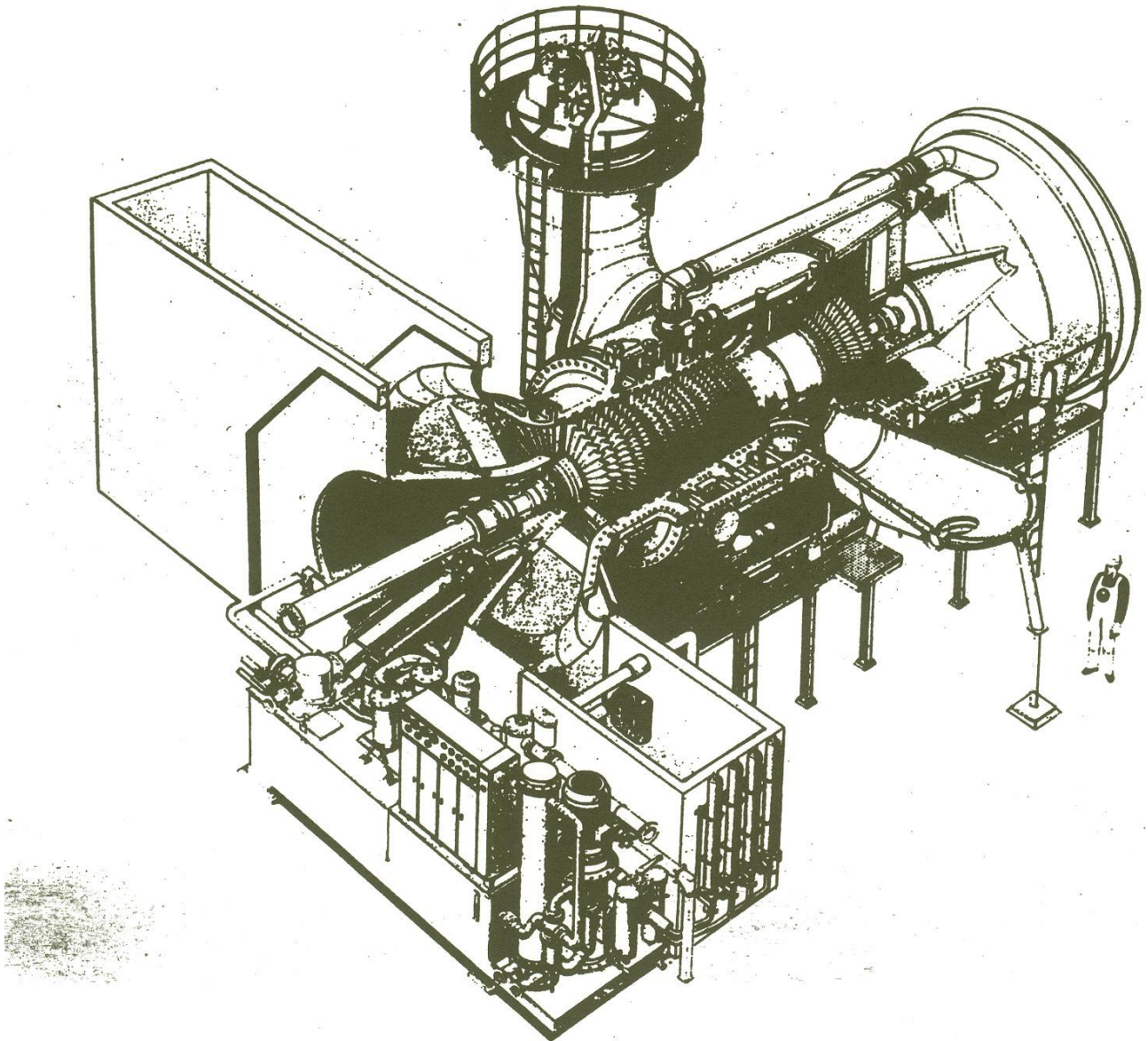


## DESCRIZIONE SISTEMA DI COMBUSTIONE TURBOGAS ROSEN

### 1 Turbina a gas Siemens modello V94.2

L'impianto Rosen di Rosignano è dotato di due turbine a gas Siemens V94.2, del tipo ad asse singolo, in grado di utilizzare sia gas naturale che gasolio.



---

---

*SIEMENS V94.2 GAS TURBINE*

I componenti principali, il compressore e la turbina, hanno il rotore in comune, supportato da due cuscinetti collocati al di fuori della zona pressurizzata dell'unità, e quindi non influenzati dalle condizioni di funzionamento.

Il rotore è costituito da tre sezioni di albero cavo, con dischi porta-palette tra loro accostati tenuti insieme da un tirante centrale.

L'involucro esterno di contenimento dei fluidi in pressione, comune al compressore e alla turbina, consiste in una cassa cilindrica alle cui estremità sono fissati sia il cuscinetto anteriore, lato compressore, che il cuscinetto posteriore lato scarico della turbina. L'alloggiamento del cuscinetto anteriore contiene anche il cuscinetto reggispinta.

All'interno della cassa si trovano i supporti per le palette di statore del compressore e di statore della turbina.

Ai lati dell'alloggiamento esterno sono sistemate le due camere di combustione verticali, ciascuna fornita di otto bruciatori.

Coassiale con turbina e compressore, si trova l'alternatore sincrono, con la doppia funzione di motore di lancio durante l'avviamento e di generatore durante il funzionamento normale.

Durante l'esercizio normale, il compressore fornisce l'aria compressa che viene inviata nelle camere di combustione dove si combina con il combustibile, generando calore nel processo di combustione. I gas caldi prodotti vengono convogliati in turbina dove la loro energia termodinamica si converte in lavoro meccanico. Il lavoro svolto viene assorbito in parte dal compressore e parte trasferito al generatore per la produzione di energia elettrica.

L'avviamento del gruppo turbogas è realizzato attraverso l'avviatore statico che, come già osservato, utilizza il generatore coassiale come motore primo.

## **2 Sistema "gas combustione"**

### **2.1 Descrizione generale**

Il sistema "Gas Combustibile" è composto principalmente da una valvola di regolazione principale della pressione del gas in ingresso, da un filtro e da una serie di linee e valvole di distribuzione.

Vedi allegato 1.

Il sistema espleta le seguenti funzioni:

- Fornire gas ai bruciatori;
- Regolare il flusso di gas per l'avviamento, il funzionamento a regime e l'arresto;
- Bruciare il gas nelle modalità previste;
- Chiudere immediatamente l'alimentazione del gas se la turbina va in "Trip".

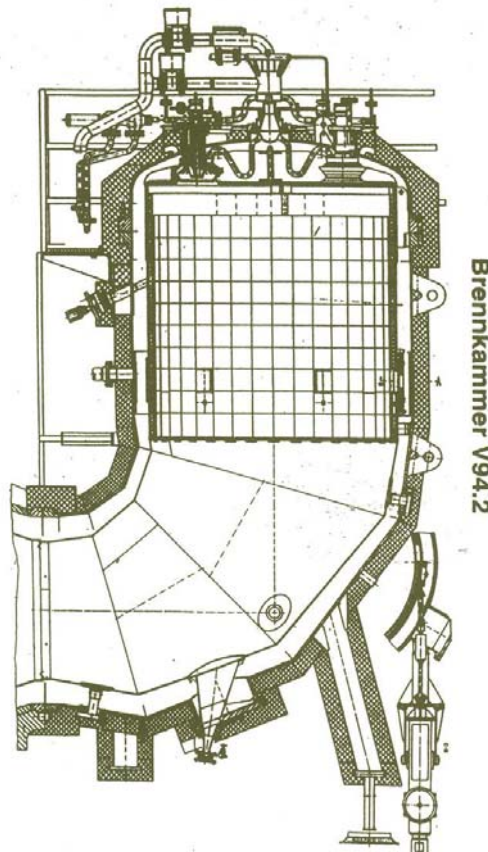
Il sistema è progettato per alimentare i bruciatori a gas metano con una portata di circa 9,7 Kg/sec. ad una pressione di alimentazione compresa fra 15 e 19 bar.

Sulla linea del gas alle camere di combustione, è ubicata una valvola di blocco di emergenza, cui fanno seguito due rami in parallelo. Un ramo, con la valvola principale di regolazione, alimenta i bruciatori l'altro ramo, con la un'altra valvola di regolazione alimenta i bruciatori pilota.

Per intercettare le distinte linee di alimentazione del gas, sulle camere di combustione sono montate delle valvole a sfera motorizzate che permettono di selezionare il tipo di combustione da utilizzare.

## 2.2 Camere di combustione

Le due camere di combustione sono provviste ciascuna di otto bruciatori sia per la combustione a gas e sia per la combustione a gasolio, con possibilità di funzionamento anche in regime di combustione mista solamente in fase di cambio combustibile, utilizzando l'aria comburente proveniente dal compressore.



I gas caldi vengono poi convogliati all'ingresso della turbina.

Per proteggerla dalle radiazioni termiche, la superficie interna delle camere di combustione è rivestita con piastrelle ceramiche fissate al rivestimento interno di lamiera metallica. L'aria compressa primaria proveniente dal compressore entra nelle camere di combustione attraverso lo spazio anulare esistente tra l'involucro in pressione ed il rivestimento interno, proteggendo in tal modo quest'ultimo dal calore proveniente dai gas di combustione.

Nella parte inferiore delle camere di combustione entra invece l'aria secondaria di integrazione, il cui flusso viene automaticamente incrementato al diminuire del carico .

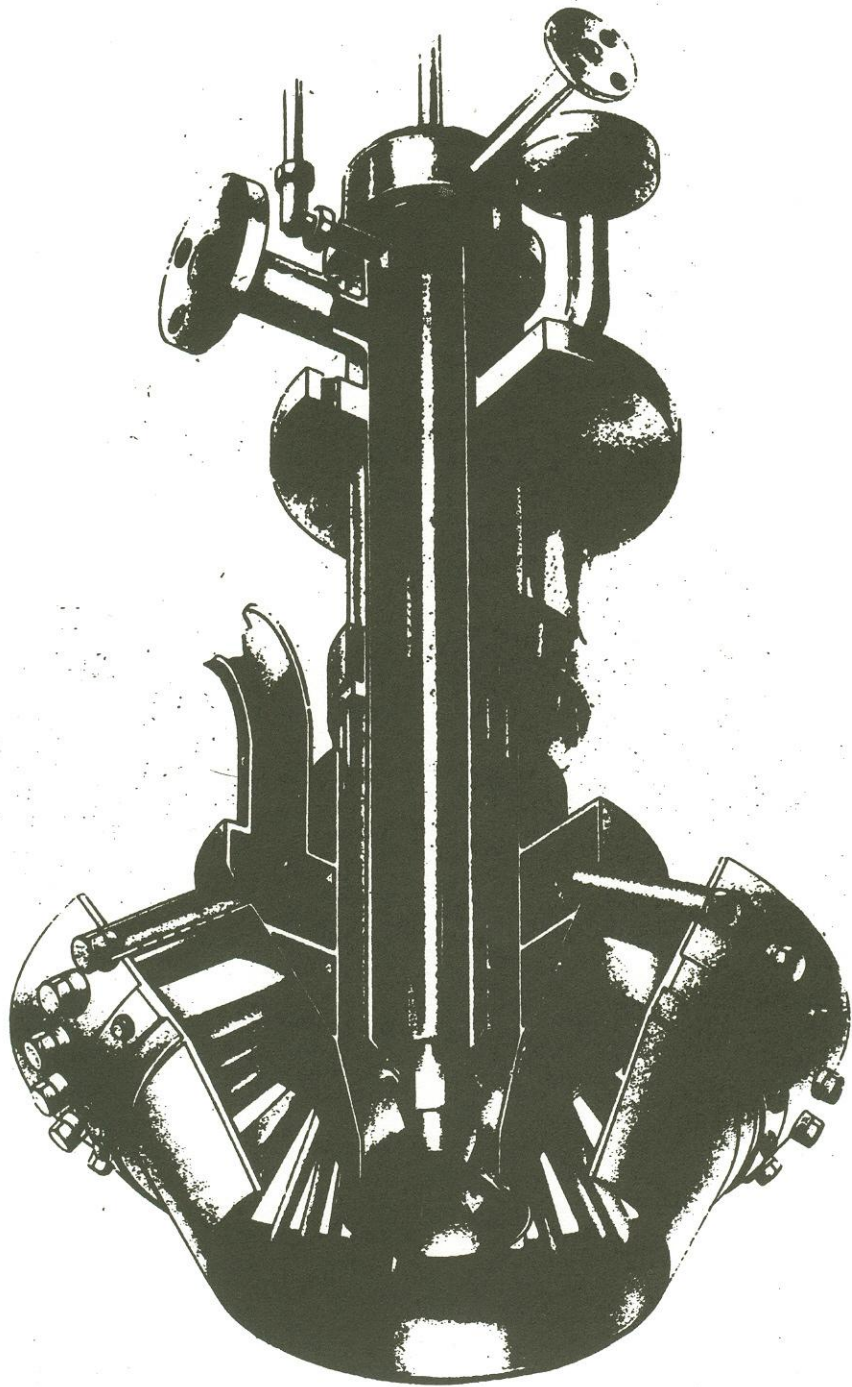
Il processo di combustione viene innescato dalla candela esistente nel bruciatore di accensione, che a sua volta provvede all'accensione dei bruciatori principali.

La maggior parte dell'aria primaria richiesta per la combustione è fornita attraverso il vorticolatore diagonale dove acquista turbolenza e attraverso un condotto anulare, viene avviata alla zona di combustione. L'aria passa quindi attraverso il vorticolatore assiale, per entrare in camera di combustione, dove si miscela con il combustibile introdotto attraverso i bruciatori.

Per il controllo della combustione, sono previsti due rivelatori fiamma per ogni camera di combustione, ubicati sull'involucro pressurizzato. Il loro intervento per mancanza fiamma, determina il blocco del combustibile e la messa fuori servizio del turbogas.

### 2.3 Bruciatori

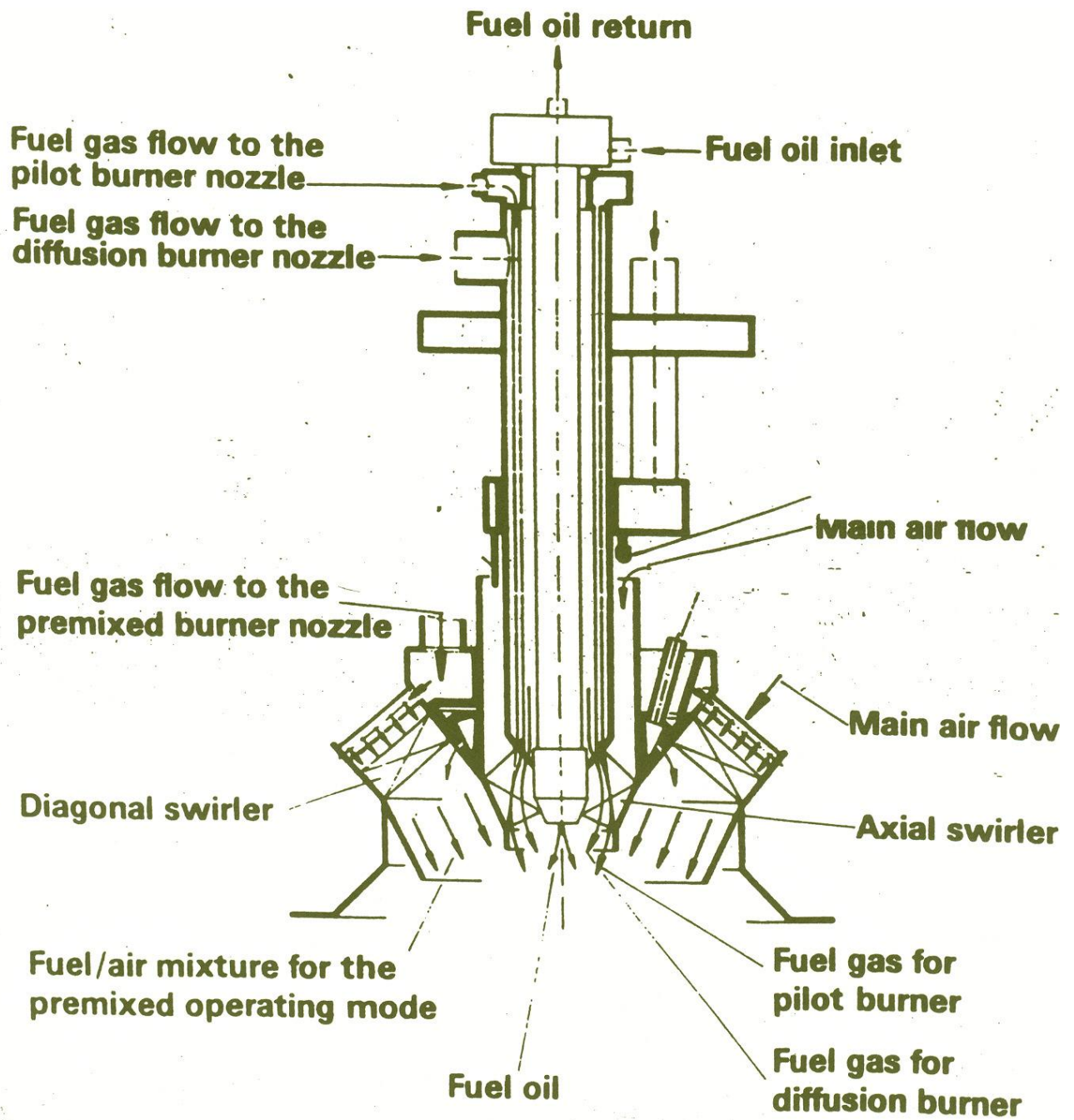
La turbina ha due camere di combustione e ogni camera di combustione ha 8 bruciatori identici. Il quantitativo di gas utilizzato viene distribuito uniformemente a tutti i bruciatori per realizzare un'entrata ottimale nello spazio di combustione e per permettere la completa combustione nelle camere. I bruciatori sono di tipo "Ibridi", cioè ogni corpo bruciatore consiste in un bruciatore a Diffusione, uno a Premiscelazione (Premix) e un bruciatore Pilota.



---

---

*SIEMENS - Hybrid Burner for low Nox and CO Emissions*




---

*SIEMENS – Hybrid Burner*

Le modalità di funzionamento sono le seguenti:

- DIFFUSIONE: in funzione la parte a Diffusione del bruciatore;
- PREMIX: in funzione la parte a Premix del bruciatore con il supporto della fiamma Pilota per stabilizzare la fiamma principale;
- TRANSITORIO: durante il passaggio da una modalità di funzionamento all'altra sono accese tutte e tre le fiamme; il transitorio ha una durata di circa 30 secondi.

La combustione del tipo a "diffusione", più stabile, viene utilizzata ai bassi carichi (inf. al 60%), mentre quella a "premiscelazione" viene preferita per i carichi elevati, essendo del tipo a bassi NO<sub>x</sub>.

Ogni bruciatore ha molti fori di fuoriuscita del gas. Il quantitativo del gas che esce dal bruciatore dipende dalla sezione (costante) dei fori e dalla differenza di pressione monte-valle: la pressione prima dei fori è funzione della posizione della valvola di regolazione del gas (che è funzione della velocità della turbina o della temperatura allo scarico della potenza generata), la pressione a valle dei fori è la stessa di quella della camera di combustione (che è funzione della velocità della turbina e della temperatura dei gas all'interno della camera di combustione).

#### 2.4 Fasi di avviamento e fermata

La turbina a gas viene avviata con il convertitore statico e quando raggiunge la velocità di circa 700 giri/min., inizia la sequenza automatica per l'accensione a gas.

Come prima operazione, si chiude la valvola di sfiato del gas, e si aprono le valvole a sfera sulle camere di combustione, relative alle linee a "diffusione".

Successivamente viene aperta la valvola di arresto di emergenza ed il gas inizia a fluire.

Dopo il parallelo elettrico, il controllore della turbina inizia ad aprire la valvola principale di regolazione della portata, per la successiva presa di carico.

Quando la temperatura corretta di uscita dei gas caldi supera i 530 °C (questo avviene quando il carico elettrico supera il 60% circa del nominale), si ha il passaggio automatico dalla combustione a "diffusione" a quella a "premiscelazione".

Partendo dal carico nominale e effettuando una riduzione del carico quando temperatura di uscita dei gas caldi diviene inferiore a i 517 °C, , avviene il cambio di combustione secondo l'ordine inverso.

In caso di funzionamento a Premix se avviene una delle seguenti cause:

- bassa pressione gas metano
- flusso aria secondaria squilibrato tra le due camere di combustione;
- avaria al sistema del bruciatore pilota
- "Load Rejection" (riduzione improvvisa del carico elettrico).

Il sistema automatico di controllo e protezione della turbina a gas effettua il cambiamento di modalità di combustione da Premix a Diffusione allo scopo di avere un maggior stabilità di fiamma ed evitare lo spegnimento della fiamma e il conseguente blocco della turbina.

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

#### 3.1 Cause principali

Le cause principali della formazioni degli NO<sub>x</sub> sono le seguenti:

- alta temperatura di fiamma;
- tempo di permanenza delle molecole di combustione nella zona ad alta temperatura.

#### 3.2 Azioni per la riduzione degli NO<sub>x</sub>

Le azioni prese nel modello di turbina V94.2 per la riduzione degli NO<sub>x</sub> sono le seguenti:

- ridurre localmente la temperatura della fiamma;
- utilizzo di un corpo bruciatore multiplo (Ibrido);
- miscelazione del gas con l'aria prima che essi entrino nel fronte della fiamma;
- massima compressione dell'aria attraverso il bruciatore;
- riduzione del tempo di permanenza;
- progettazione di camere di combustione di dimensioni piccole e corte.

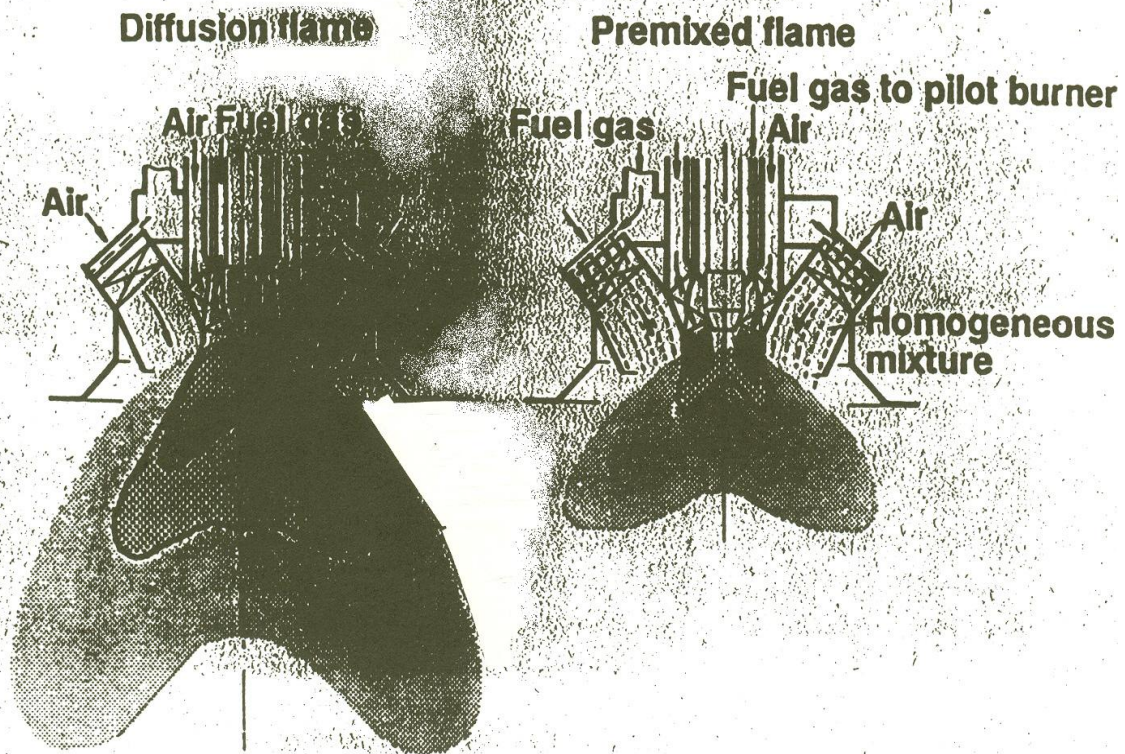
#### 3.3 Differenze tra Diffusione e Premix

Con la combustione a Premix si ottiene la riduzione degli NO<sub>x</sub> grazie principalmente alla premiscelazione tra gas e aria. Le caratteristiche principali dei due tipi di combustione sono i seguenti:

- **DIFFUSIONE:** i partecipanti alla reazione non sono premiscelati, miscelazione e combustione sono simultanee, il corso della combustione è determinato dalla processo di miscelazione, la fiamma è approssimativamente localizzata al contorno della miscela stechiometrica, la temperatura di fiamma è localmente elevata a causa delle condizioni stechiometriche, si ha un ampio range dei possibili rapporti stechiometrici;
- **PREMIX:** gas e aria sono premiscelati in modo omogeneo prima della combustione, il corso della combustione è determinato dalla reazione chimica, la fiamma è stabile in un ristretto range di rapporti stechiometrici. La stabilità della fiamma a Premix è garantita dalla fiamma pilota, che è una fiamma a diffusione e di conseguenza rappresenta la fonte maggiore di produzione di NO<sub>x</sub>.



## Operating modes






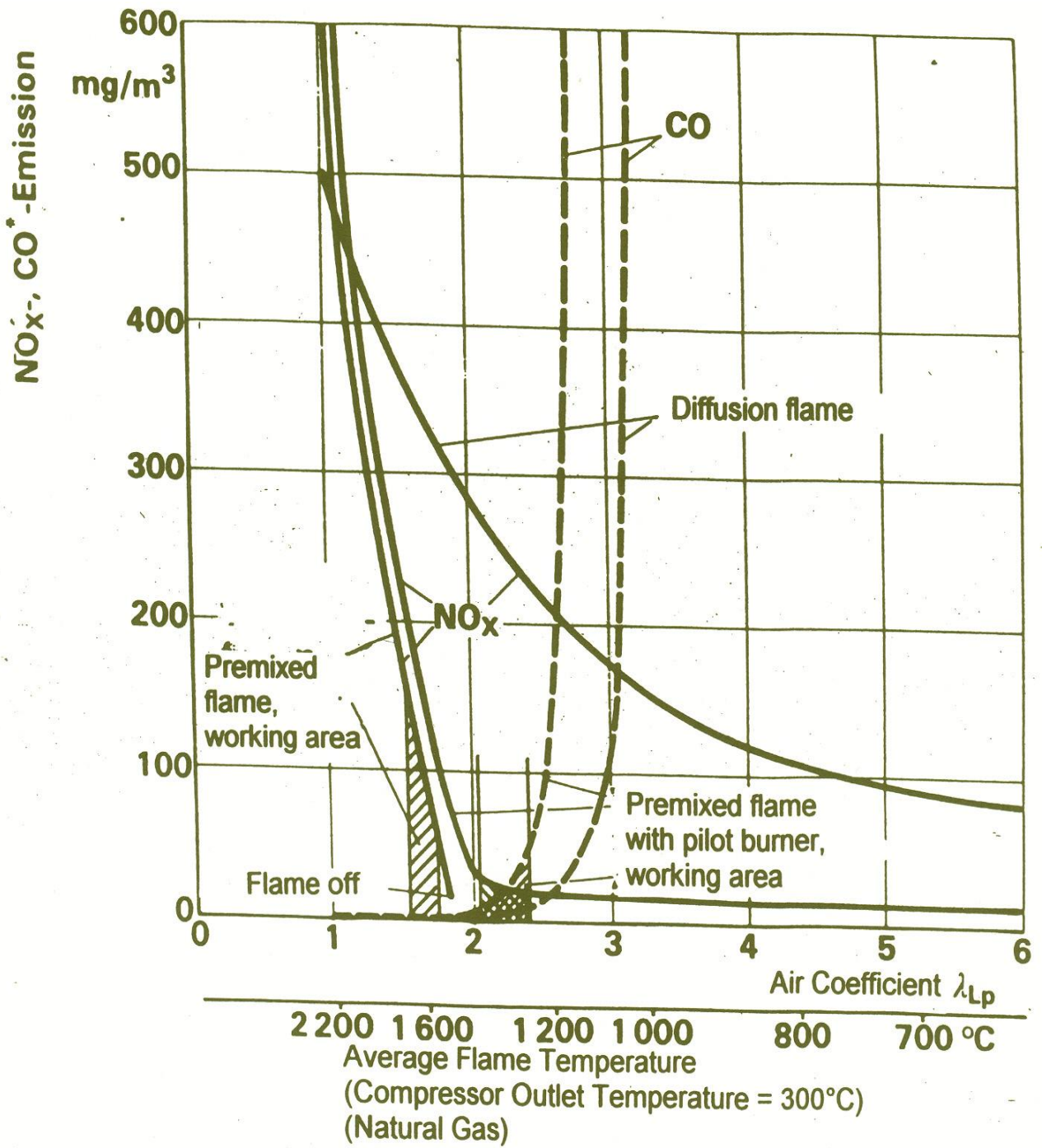
$$T_{\text{stoec.}} = 2100 \text{ }^{\circ}\text{C} (\lambda = 1.0)$$

$$\lambda_{\text{mean}} = 2.1$$

$$T_{\text{mean}} = 1390 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

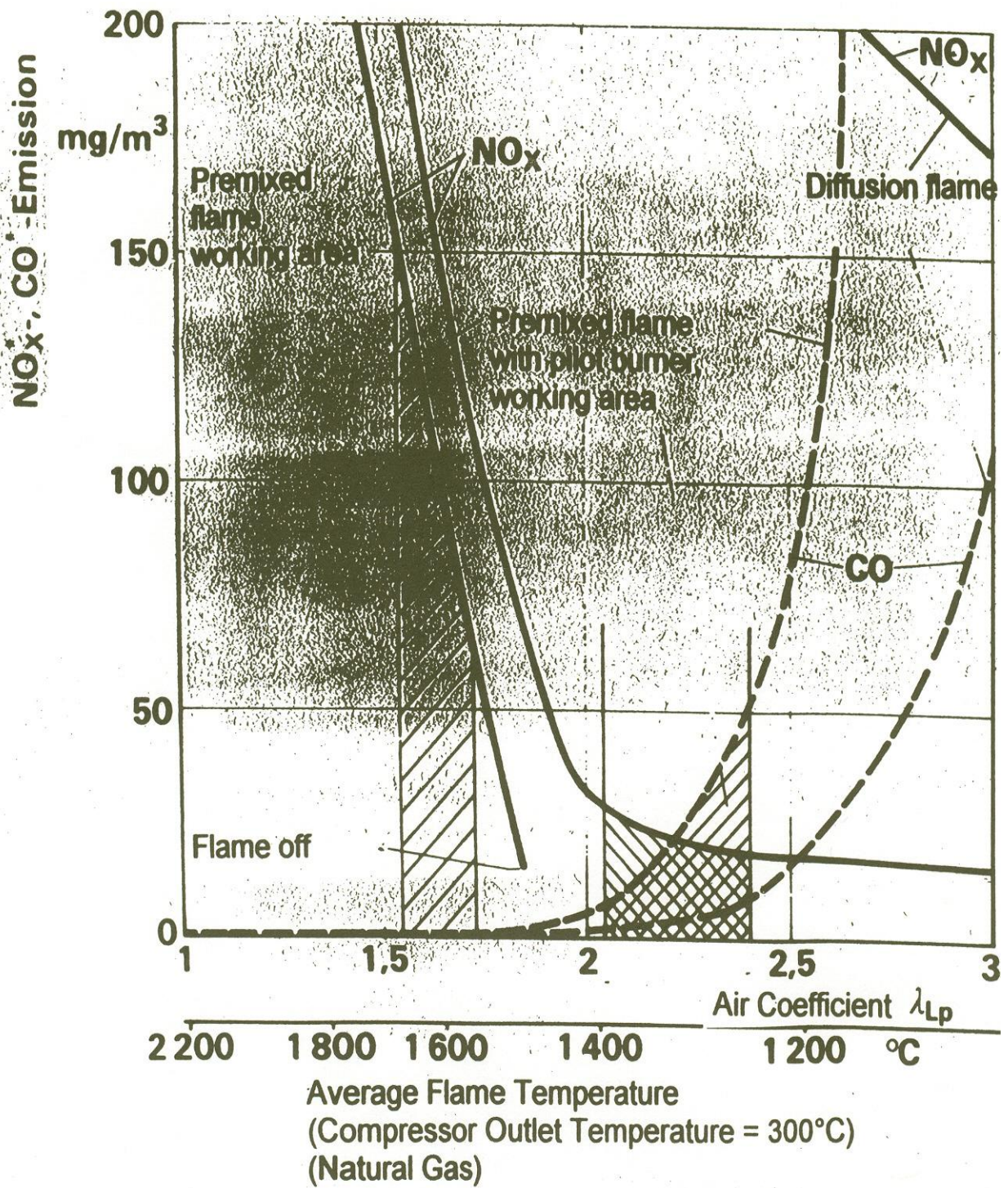
### Reaction areas with different air/fuel ratio

$\lambda < 0.8$	
$0.8 < \lambda < 1.6$	
$\lambda > 1.6$	



\* in dry exhaust gas (15 Vol.-%  $\text{O}_2$ )

SIEMENS – Emissions of GT – Burners operating with natural gas



\* in dry exhaust gas (15 Vol.-% O<sub>2</sub>)

SIEMENS – Emissions of GT – Burners operating with natural gas

### 3. 4 Bruciatori ibridi modello HR3

Le turbine della Rosen hanno installati i bruciatori ibridi di ultima generazione modello HR3.

Rispetto al precedente modello, questo nuovo tipo di bruciatori si caratterizza per i seguenti aspetti:

- nuova geometria del profilo e delle palette finali;
- nuova linea di distribuzione del gas interna alle palette finali.

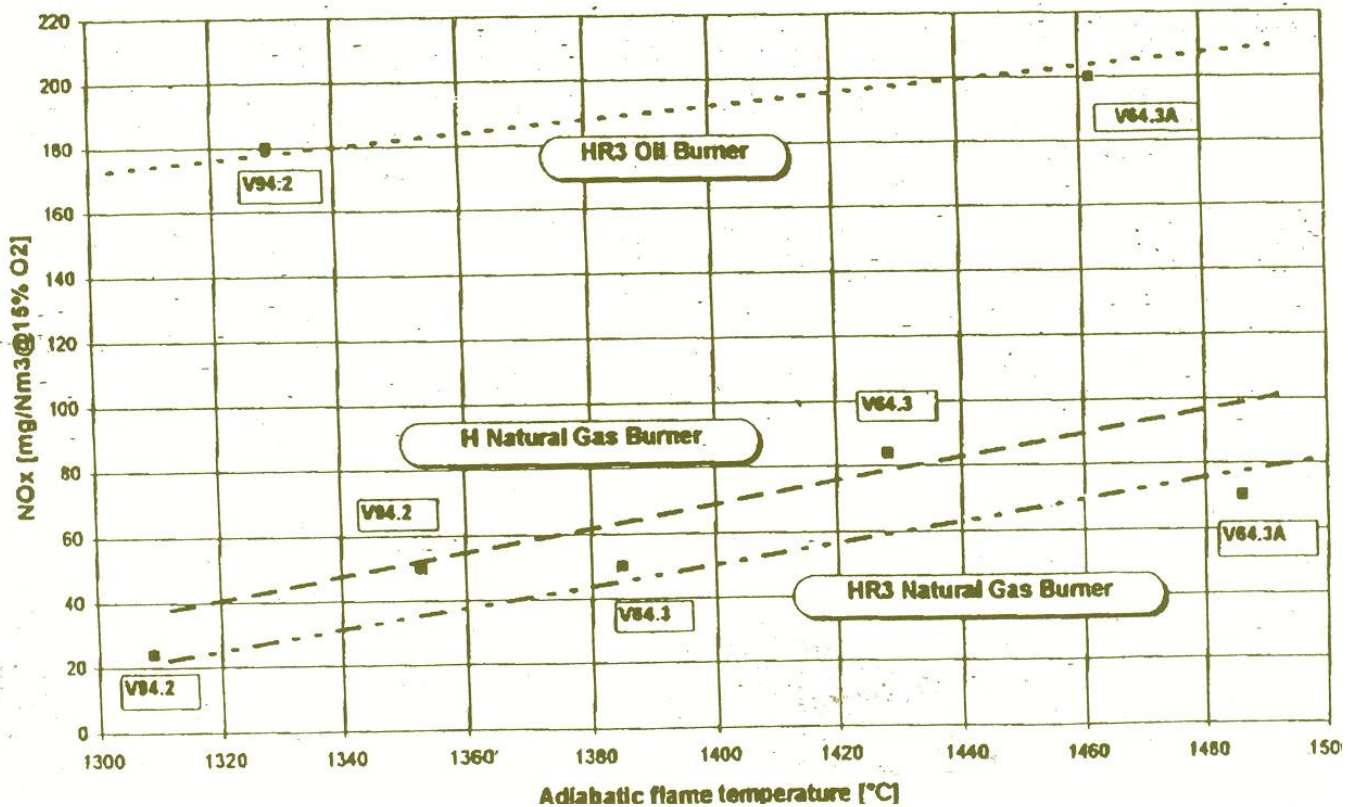
Queste due modifiche al corpo bruciatore hanno avuto i seguenti effetti:

- incremento della velocità dell'aria con minor rischio di ritorno di fiamma (flash back);
- decremento del tempo di permanenza nella zona ad alta temperatura;
- nessuna separazione dei flussi.

Il risultato finale è un'ulteriore riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub> di circa il 25 % rispetto al vecchio modello H.

**ANSALDO**

**Ansaldo Gas Turbine NO<sub>x</sub> emissions performance (premixed mode combustion)**



### 3.5 Teoria della premiscelazione

#### 3.5.1 La fiamma premiscelata

I processi principali che hanno luogo in una fiamma premiscelata sono rappresentati schematicamente in Fig. 2.1.

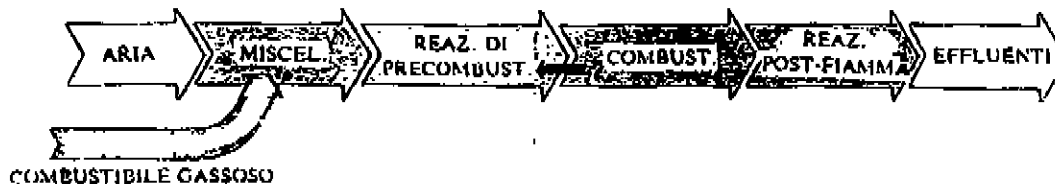


Fig. 2.1

L'aria e il combustibile gassoso vengono miscelati intimamente a livello molecolare. Non necessariamente tale processo garantisce l'omogeneità, nel senso che il grado di ricchezza o di magrezza della miscela può variare da punto a punto e istante dopo istante. La miscela subisce una serie di reazioni chimiche, di cui le prime precedono la combustione vera e propria. Indi si instaura quest'ultima, con il corrispondente rilascio di energia termica. Infine hanno luogo le reazioni post-fiamma, cioè quelle che hanno luogo nei gas combusti. Dopo di che gli effluenti vengono scaricati nell'atmosfera.

Come già detto, un semplice becco Bunsen approssima una combustione premiscelata, così come si può osservare in Fig. 2.2. La combustione ha luogo nella zona di fiamma e i prodotti della combustione si miscelano con l'aria circostante. Tornando un attimo alla Fig. 2.1 è da osservare che quando la miscela si approssima alla zona di combustione ad elevata temperatura si instaurano due importanti processi di trasporto: nella zona ad alta temperatura vengono

trasportati verso monte, cioè verso la miscela da bruciare, sia calore che specie chimiche (indicati in Fig.2.1 con una piccola freccia in neretto. Il flusso di calore in controcorrente avviene a causa di diffusione convettiva e di trasporto radiante, e ha come effetto il riscaldamento della miscela.

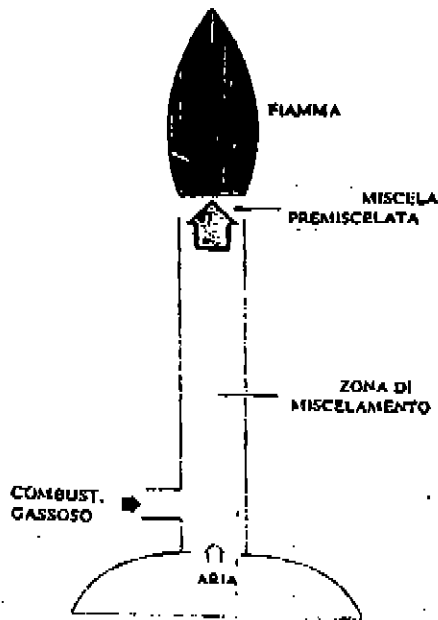


Fig. 2.2

Ciò, assieme al trasporto (sempre in controcorrente) di specie chimiche reattive ed energetiche, induce l'instaurarsi di reazioni chimiche nella miscela (reazioni dette di pre-combustione).

Quanto detto può venire sintetizzato nel concetto che le zone di pre-combustione e di combustione sono termicamente e diffusionalmente accoppiate. Il risultato di tale accoppiamento è che le reazioni di combustione vera e propria sono fortemente influenzate dalle reazioni che hanno già avuto luogo a monte, nella zona di precombustione. Ma anche il contrario è vero. La natura delle reazioni di precombustione è fortemente influenzata dalle reazioni di combustione poiché sono le specie chimiche altamente energetiche prodotte nella zona di combustione e diffuse a monte che iniziano le reazioni di precombustione. Non è possibile alterare il processo in una

zona senza alterarlo in un'altra. E' proprio questo un carattere distintivo delle fiamme rispetto ad altri tipi di reazioni in fase omogenea gassosa che si sviluppano ad alte temperature.

La gran parte dell'energia sviluppata dalla reazione del combustibile e dell'ossidante è rilasciata nella zona di combustione. Questo rapido rilascio energetico è accompagnato da un rapido, pressoché discontinuo, incremento di temperatura ed un simultaneo cambiamento nella composizione del gas reagente. L'alta temperatura causa una diffusa rottura di legami chimici e la formazione di ioni, radicali liberi e specie molecolari semplici diatomiche e triatomiche.

E' usuale associare la zona di una fiamma che è visibile o luminosa alla zona di combustione. Ciò non è interamente corretto poiché la luminosità può ben persistere nella zona di reazione post-fiamma e, in certe condizioni, anche le reazioni di precombustione di alcuni combustibili come l'idrogeno non producono radiazione che sia visibile in condizioni ordinarie. I gas caldi uscenti dalla zona di combustione contengono specie chimiche che continuano a reagire mentre questi gas si raffreddano. Tali reazioni post-fiamma giocano un ruolo determinante nel condizionare la composizione chimica degli effluenti.

### 3.5.2 Le reazioni di precombustione

Il termine pre-combustione denota quelle reazioni che avvengono prima (nel tempo) o a monte (nello spazio) dell'ignizione e della combustione di una miscela aria-aria-combustibile. Una notazione sintetica per una molecola di idrocarburo è RH ove R denota un gruppo complesso, che può spaziare dal più semplice  $\text{CH}_3$  (gruppo metilico) a gruppi ben più complessi, genericamente espressi come  $\text{C}_x\text{H}_y$ . L'H in RH rappresenta un qualunque atomo di idrogeno presente nella

## 3.6 Fiamma a diffusione

### 3.6.1 Introduzione

Gran parte dei sistemi combustivi industriali prevedono il combustibile e l'aria non preventivamente miscelati a livello molecolare, bensì separati sino al momento che essi vengono portati ad intimo contatto nelle immediate vicinanze della fiamma. In quest'ultima, allora, accade una serie complessa di processi, includenti miscelazione, precombustione, combustione e reazioni post-fiamma, nonché vaporizzazione quando il combustibile è liquido o volatilizzazione quando è solido.

Ci sono molti tipi di fiamme a diffusione. Forse la più familiare è quella che ha luogo nei fornelli da cucina. Un tipo ben differente è la combustione in un motore diesel, ove fiamme a diffusione si vanno localmente a sviluppare attorno ad ogni singola goccia di combustibile. Altre combustioni caratterizzate da fiamme a diffusione si instaurano nelle turbine a gas ovvero nelle camere di combustione delle caldaie.

### 3.6.2 Fondamenti concettuali

Vi è una serie di differenze fondamentali tra le fiamme a diffusione e le fiamme premiscelate. La sequenza dei processi in una fiamma a diffusione è rappresentata in fig. 3.1.

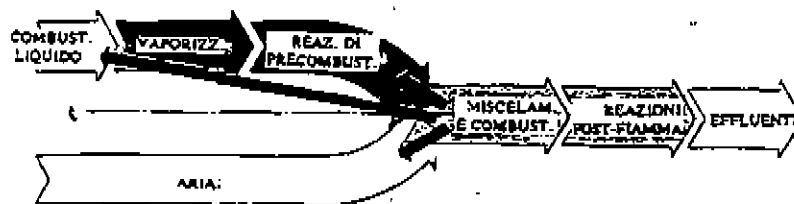


Fig. 3.1



Una delle differenze fondamentali è che in una fiamma a diffusione le reazioni di precombustione accadono prima del miscelamento di combustibile ad aria. In tal modo, qui, la zona di precombustione non contiene specie ossidanti ( $O^*$ ,  $OH$ ,  $O_2$ , ecc.) e reazioni analoghe alle (2.3.1)-(2.3.8). Dato che adesso la zona di precombustione contiene solo molecole di combustibile o loro frammenti, l'ambiente per le reazioni che vi avranno luogo sarà riducente. Ecco perchè le reazioni di precombustione nelle fiamme a diffusione sono di tipo pirolitico, simili a quelle viste in (2.8.7)-(2.8.13). La causa di tali reazioni va ricercata nel trasporto in controcorrente di energia termica e specie attive dalla zona di combustione a quella di precombustione, come indicato dalla freccia superiore in fig. 3.1.

Dato che le reazioni di precombustione sono di tipo pirolitico, i prodotti di reazione includono specie insature come olefine ed acetilenici e nuclei particolati risultanti da reazioni di polimerizzazione o addizione tra tali specie insature. La presenza di specie particolate incrementa l'accoppiamento termico tra le zone di combustione e di precombustione. Quando le particelle passano attraverso la fiamma, irradiano come un corpo nero. Ciò è responsabile non solo della caratteristica luminosità delle fiamme a diffusione, ma anche del trasferimento di energia radiante ai nuclei particolati che si formano nella zona di precombustione, i quali sono sia buoni assorbitori che buoni emettitori di irraggiamento. Una parte di tale energia da essi assorbita è trasferita per conduzione alle specie gassose nella zona di precombustione, il che a sua volta aumenta la loro temperatura e promuove le reazioni pirolitiche della fase gassosa, le quali sono di natura endotermica. Invece, nelle fiamme premiscelate, le reazioni precombustive erano ossidative ed esotermiche e potevano condurre all'autoignizione della miscela in assenza della fiamma.

Vi è un'altra differenza fondamentale tra le fiamme premiscelate e le fiamme a diffusione. Nel primo caso, l'autosostentamento dell'accensione ha luogo quando il livello di energia termica sviluppata dalle reazioni ossidative precombustive è sufficiente a superare le perdite di calore verso l'esterno della miscela reagente così da riuscire a portare quest'ultima all'ignizione. Nel caso di una fiamma a diffusione, l'ossidazione del combustibile, in quanto separato dall'ossidante, non può avvenire, per quanto alta sia la sua temperatura, prima che il miscelamento dell'aria non abbia prodotto una miscela combustibile. Perciò l'ignizione è controllata dai processi fisici che influenzano il miscelamento, come la turbolenza e la geometria del sistema.

Poiché l'ossidazione non può avvenire prima che combustibile ed ossidante si siano miscelati, le reazioni pirolitiche precombustive continueranno sino a che avviene il miscelamento. Se tale miscelamento con l'aria risulta imperfetto, le reazioni pirolitiche possono produrre relativamente grandi quantità di materiale particolato ad altre specie di prodotti di pirolisi. Ecco quindi l'importanza che qui assume il processo di miscelamento, ed ecco anche evidenziata la propensione delle fiamme a diffusione a produrre grandi quantità di materiale carbonico particolato quando il miscelamento sia inefficiente.

La figura 3.2 riporta lo schema di una fiamma a diffusione. Il combustibile e l'ossidante sono separati e la fiamma ha luogo in una zona interfacciale dove essi si incontrano e si miscelano. Energia radiante trasferita dalla fiamma

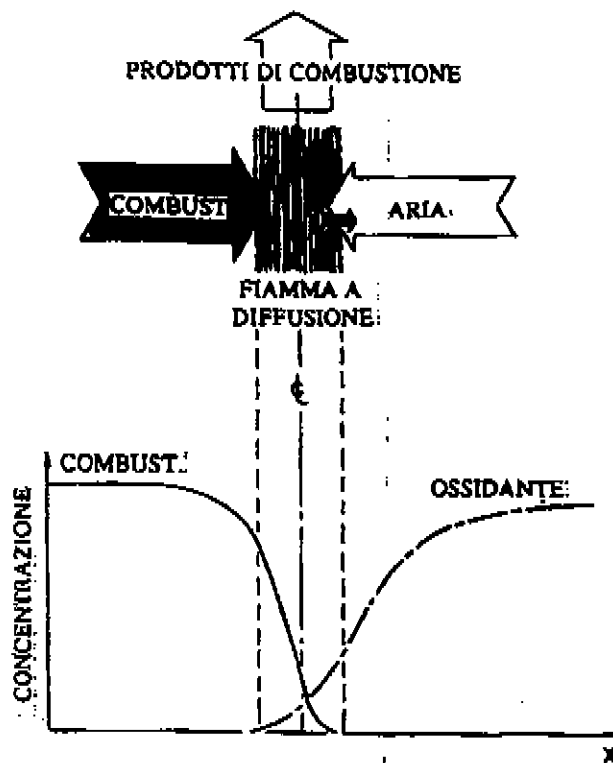


Fig. 3.2

preriscalda l'aria e innesca il meccanismo che promuove le reazioni pirolitiche precombustive nel combustibile che si avvicina alla fiamma. La zona di precombustione non è specificamente identificata in tale figura. Nella parte inferiore della figura è rappresentata la relazione tra combustibile ed ossidante, prima, entro e dopo, la fiamma a diffusione. La fiamma in sé ha confini ben definiti. Alla sua sinistra il rapporto combustibile/ossidante è troppo elevato perchè la combustione si autosostenga. Perciò il confine sinistro della zona di fiamma in fig. 3.2 è analogo al limite "ricco" di infiammabilità, discusso in fig. 2.17. Analogamente il confine destro corrisponde al limite "magro" di infiammabilità. L'ampiezza della zona di combustione dipenderà da una serie di fattori, tra cui la natura del processo di miscelamento che porta combustibile ed ossidante sino a intimo contatto molecolare.

All'interno della zona di combustione il rapporto combustibi-

le/ossidante può venire pensato come continuamente variabile tra il limite ricco ed il limite magro, nel senso che combustibile ed aria non reagiscono ad un prefissato  $\phi$  ma ad un rapporto continuamente variabile. Ciò ha due implicazioni importanti. Primo, non è possibile esercitare controllo sulla combustione scegliendo un particolare  $\phi$  che sia ad esempio vantaggioso rispetto ai prodotti di reazione desiderati, così come era possibile per le fiamme premiscelate.

Secondo, una fiamma a diffusione è intrinsecamente più stabile di una premiscelata: infatti in quest'ultimo caso se  $\phi$  è al di fuori dei limiti di infiammabilità la combustione cessa, mentre nel caso della fiamma a diffusione una zona di miscela combustibile esisterà sempre in qualche punto tra il combustibile e l'aria. In tal modo, perturbazioni transitorie nel flusso non potranno facilmente produrre estinzioni della fiamma.

Tutte le classi di combustibili, gassosi, liquidi e solidi possono venire bruciati in una fiamma a diffusione. La fig. 3.3 illustra la combustione di un combustibile gassoso in una fiamma a diffusione. Tale figura è analoga a quella relativa ad un becco Bunsen (fig. 2.2) per la combustione del medesimo gas. Però, si noti in fig. 3.3 che adesso il combustibile è mostrato reagire con l'aria in un sottile "involuppo di reazione", che è in senso stretto la fiamma. Le reazioni di precombustione hanno luogo nella regione all'interno di tale involucro mentre il combustibile passa dal "collo" del getto sino all'involuppo reattivo. L'aria è indotta verso la base della fiamma grazie al moto convettivo verso l'alto dei prodotti caldi della combustione, il quale induce un effetto di risucchio a partire dalla base.

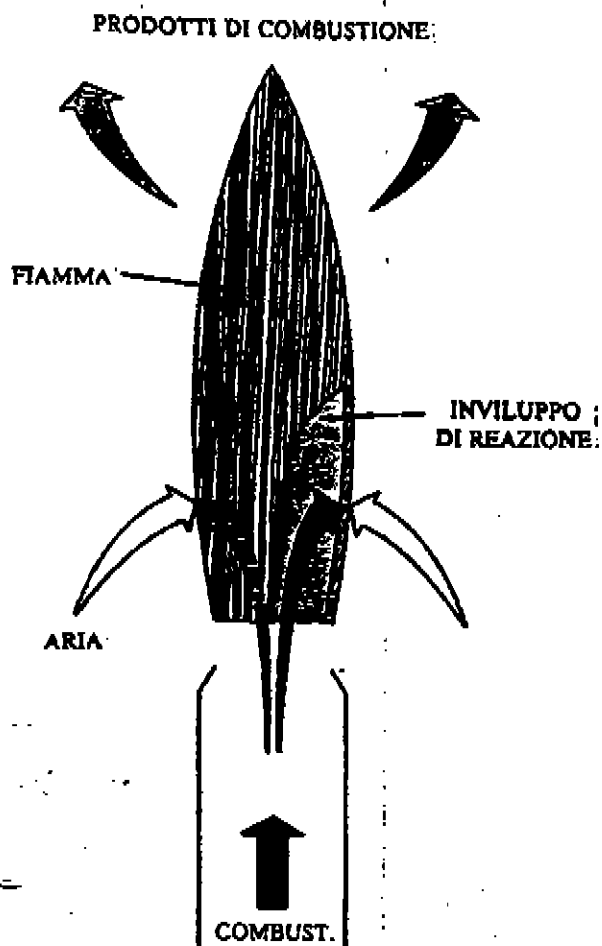


Fig. 3.3

La fiamma a diffusione di fig. 3.3 è intrinsecamente più stabile di quella di fig. 2.2. In quest'ultimo caso, la velocità dei reagenti premiscelati, uscenti dalla gola del Bunsen, doveva venire aggiustata così da risultare ragionevolmente vicina alla velocità di combustione della miscela, in modo da avere una fiamma stazionaria. Se ciò non accade e, nella gola del Bunsen, la velocità dei reagenti è troppo elevata, la fiamma viene soffiata via ("blow off"), mentre, se è troppo bassa, la fiamma viene risucchiata ("flash back") entro la camera di miscelamento. Nel caso di fiamma a diffusione il flash back è assolutamente impossibile poichè non vi è aria nell'alimentazione del combustibile, e, quando la velocità del gas aumenta, la lunghezza della zona di reazione può variare, adeguandosi in modo da rendere improbabile anche il blow off.

