

# 1. COMBUSTORI A BASSA EMISSIONE DI INQUINANTI

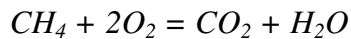
## 1.1. Introduzione

Nel seguente capitolo si introducono le problematiche relative all'uso delle turbine a gas per la produzione di energia elettrica, con particolare attenzione verso la produzione di agenti inquinanti. Si descrivono quindi le differenti tipologie di combustore, le relative caratteristiche e le misure che è possibile adottare per ridurre le emissioni di inquinanti. Si analizza infine quali interventi sono possibili per migliorare il comportamento del combustore anche al fine di prevenire rotture e guasti.

Particolare attenzione è stata dedicata all'analisi dei metodi di controllo attivo delle instabilità di combustione ed alla descrizione del metodo attualmente allo studio presso i laboratori ENEL.

## 1.2. La combustione

La combustione richiede la presenza di un combustibile e di un comburente. Per i casi di interesse, il combustibile è costituito da idrocarburi ed il comburente è l'ossigeno presente nell'aria. I prodotti della combustione sono anidride carbonica ( $CO_2$ ) ed acqua ( $H_2O$ ). Per il metano, ad esempio, l'equazione di reazione è:



Per la reazione stechiometrica, noti i pesi atomici di  $C$ ,  $H$ , ed  $O$  e considerando che l'ossigeno costituisce il 23% in peso dell'aria, si ottiene un rapporto di diluizione  $\alpha$ , cioè il rapporto tra portata massica di aria comburente e di combustibile

$$\alpha = \frac{Q_a^{(m)}}{Q_f^{(m)}} = 17.39.$$

Oltre a  $CO_2$  ed  $H_2O$ , la combustione genera però altri composti, che danno luogo ad inquinamento atmosferico. Tali sostanze sono principalmente monossido di carbonio ( $CO$ ), ossidi di azoto ( $NO_x$ ), idrocarburi incombusti (Unburnt HydroCarbon) ( $UHC$ ), particolato ed ossidi di zolfo ( $SO_x$ ).

Sia per i motori aeronautici che per gli impianti civili, le normative antinquinamento impongono limiti alle sostanze inquinanti che possono essere liberate nell'atmosfera durante l'esercizio.

I livelli di concentrazione degli inquinanti negli scarichi di una turbina a gas dipendono principalmente dalla temperatura di fiamma, dal tempo di permanenza dei reagenti a tale temperatura, dal rapporto di diluizione e dall'uniformità della miscela aria - combustibile, variano quindi sia con il modello di combustore che con le condizioni operative.

Le concentrazioni di monossido di carbonio e di idrocarburi incombusti sono più elevate a bassa potenza e diminuiscono al crescere del carico, mentre ossidi di azoto e particolato sono massimi a potenza elevata, come mostrato in figura 1. Le immagini di questo capitolo riguardanti i combustori e le emissioni inquinanti sono tratte da [2] e da [1].

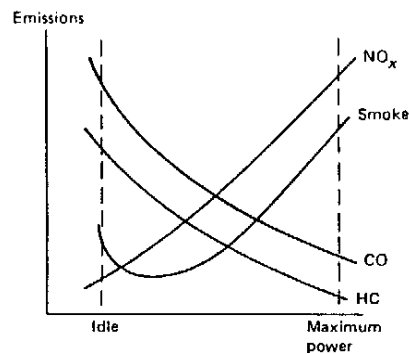


Figura 1: Emissione di inquinanti

- La formazione di monossido di carbonio può essere causata da una combustione con carenza di ossigeno o dalla miscelazione con un eccessivo flusso di raffreddamento delle pareti. In entrambi i casi si ha la non completa ossidazione a CO<sub>2</sub>. La produzione di monossido di carbonio aumenta anche quando la temperatura di fiamma è troppo elevata, a causa del fenomeno della dissociazione da CO<sub>2</sub> a CO.

Il monossido di carbonio dovuto a combustione con carenza di ossigeno, può essere ridotto aggiungendo aria a valle della zona primaria, in modo da completare la combustione. Una condizione favorevole per ridurre la produzione di CO è la pressione elevata in camera di combustione, che ostacola la dissociazione e favorisce l'ossidazione a CO<sub>2</sub>.

- La presenza di idrocarburi incombusti è in genere legata a scarsa atomizzazione del combustibile, velocità di combustione inadeguata o raffreddamento dovuto al film cooling che interrompe la combustione. Come per il CO, al crescere della potenza l'emissione di idrocarburi incombusti si riduce, principalmente per effetto della maggior pressione e temperatura dell'aria, che incrementano la velocità delle reazioni chimiche.
- Gli ossidi di zolfo dipendono dal tenore di zolfo presente nel combustibile impiegato e quindi possono essere ridotti soltanto migliorando la qualità di quest'ultimo.
- Gli ossidi di azoto NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>) sono prodotti principalmente dalla ossidazione dell'azoto atmosferico nelle regioni della fiamma ad alta temperatura. Il processo è endotermico, ed avviene a ritmo elevato solamente a temperature superiori a circa 1800 °K. Quindi, a differenza di CO e UHC, la produzione di NO<sub>x</sub> è maggiore in condizioni di piena potenza.

I meccanismi di formazione degli ossidi di azoto sono di diversa natura; il più importante è, come detto, la formazione degli NO<sub>x</sub> termici, generati dall'azoto presente nell'aria in condizioni di alta temperatura attraverso una reazione chimica detta meccanismo di Zeldovich. I parametri che lo influenzano sono la temperatura

ed il tempo di residenza dei composti reagenti nella zona caratterizzata da detta temperatura. Si ha inoltre la formazione di *Prompt NO<sub>x</sub>*, generati nella regione della fiamma dalla reazione tra l'azoto atmosferico e frammenti di idrocarburi CH, che danno luogo ad acido cianidrico (HCN) e, successivamente, ad NO. Si ha poi *Fuel NO<sub>x</sub>*, dovuto all'ossidazione dell'azoto organico eventualmente presente nel combustibile.

Per ridurre la produzione di ossidi di azoto, è necessario ridurre la temperatura di fiamma ed il tempo di residenza, ma questo ha anche l'effetto di aumentare la produzione di monossido di carbonio ed idrocarburi incombusti, è pertanto necessario adottare una soluzione di compromesso.

La temperatura di fiamma è legata al rapporto tra aria e combustibile, ed è massima in corrispondenza della miscela stechiometrica (figura 2).

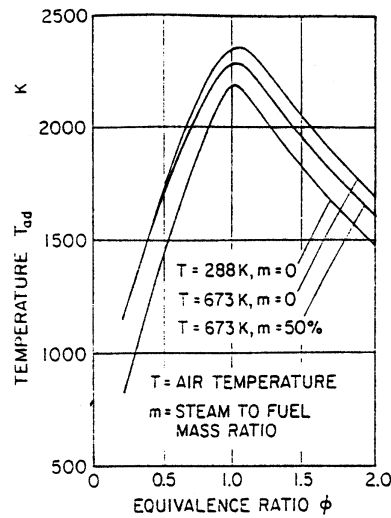


Figura 2: Temperatura di fiamma

dove  $\Phi$  è il rapporto di equivalenza:

$$\Phi = \frac{\alpha_{\text{stechiometrico}}}{\alpha}$$

Si cerca, quindi, di evitare il funzionamento del combustore con miscela stechiometrica, sia per quanto riguarda il rapporto di equivalenza medio, che per eventuali valori locali nel flusso, che darebbero luogo a picchi di temperatura responsabili dell'innalzamento del valore delle emissioni, come si può vedere in figura 3.

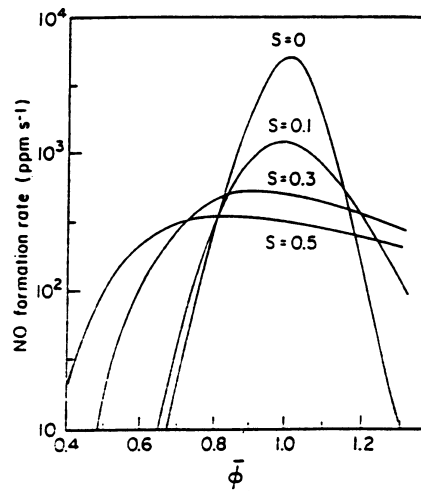


Figura 3: Formazione di NO

$S$  è il parametro di non uniformità della miscela aria - combustibile ( $S = 0$  denota un profilo perfettamente uniforme). Si nota che, per miscele stechiometriche, un profilo uniforme dà luogo ad una maggiore formazione di NO, mentre, per miscele lontane dal rapporto stechiometrico, la concentrazione di NO è maggiore per flussi con minore uniformità, perché in questi può localmente verificarsi la condizione  $\hat{O} = 1$ .

### 1.3. Caratteristiche dei combustori

Le turbine a gas devono soddisfare un elevato numero di requisiti, la cui importanza relativa dipende dal tipo di impiego. Le principali sono:

- Elevata efficienza
- Basse emissioni
- Ampio intervallo di stabilità
- Assenza di pulsazioni della pressione ed altri sintomi di instabilità della combustione
- Basse perdite di pressione
- Basso costo e facilità di manutenzione
- Accensione semplice ed affidabile
- Capacità di operare con combustibili diversi
- Lunga vita operativa
- Affidabilità

Le tipologie di combustore attualmente in uso sono due. La prima è quella a fiamma diffusiva, in cui aria e combustibile sono immessi separatamente nella camera di combustione, secondo lo schema classico delle turbomacchine, che è quello tuttora utilizzato per impieghi aeronautici. La seconda tipologia è quella detta DLN (Dry Low  $\text{NO}_x$ ) o LPP (Lean premixed prevaporized), in cui aria e combustibile vengono preventivamente miscelati; questo permette di ottenere un rapporto di miscela più

uniforme in camera di combustione. Poiché la produzione di inquinanti dipende non solo dal valore medio della temperatura, e quindi del rapporto di equivalenza, ma anche dalle sue variazioni locali, con tale soluzione si ottiene una combustione più pulita.

### 1.3.1. Combustori a fiamma diffusiva

È lo schema classico delle turbomacchine ed è quello tuttora utilizzato per impieghi aeronautici. Combustibile ed aria comburente vengono introdotti separatamente nella camera di combustione e si miscelano subito a ridosso del fronte di fiamma.

Il combustore può essere suddiviso in tre parti principali; la *zona primaria* ha la funzione di ancorare la fiamma e di ottenere la completa combustione con adeguati valori di temperatura, tempo di permanenza e turbolenza. Per ottenere questo, si crea nella zona primaria un flusso ricircolante mediante l'uso di swirler o getti contrapposti. Nella *zona intermedia* si introduce altra aria allo scopo di ottenere la completa combustione delle porzioni di miscela eccessivamente ricche dovute al non perfetto miscelamento. L'aria introdotta riduce inoltre la temperatura, diminuendo la quantità di CO dovuta alla dissociazione del CO<sub>2</sub>. Una parte dell'aria viene utilizzata per creare uno strato di aria più fredda che protegga le pareti della camera di combustione dalla fiamma.

La funzione della *zona di diluizione* è quella di introdurre l'aria rimanente in modo da ottenere un flusso con temperatura media e distribuzione di temperatura tali da non danneggiare la turbina. Se i gas caldi passassero direttamente nella zona di diluizione, dove vengono rapidamente raffreddati da un massiccio afflusso di aria, la composizione del gas verrebbe "congelata", ed il CO arriverebbe allo scarico senza venir ossidato a CO<sub>2</sub>.

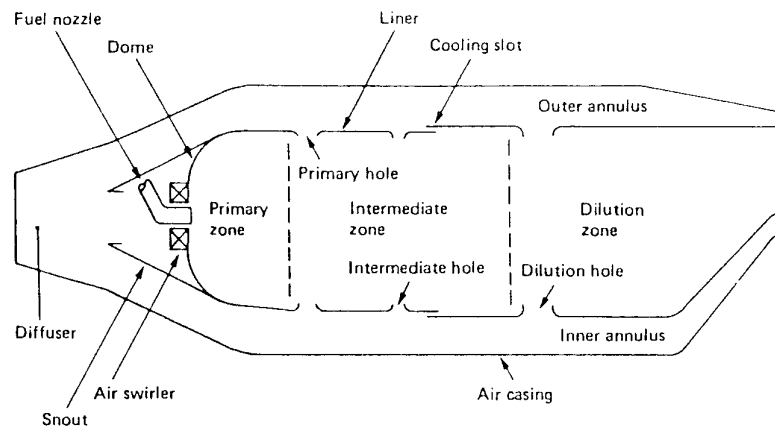


Figura 4: Schema di combustore a fiamma diffusiva

I vantaggi di questo tipo di combustione sono la stabilità della fiamma anche ad alte quote di volo e la separazione tra l'aria ed il combustibile a monte della fiamma, per cui non si verifica il fenomeno del flashback, in cui la fiamma risale il flusso fino agli

iniettori. Tali caratteristiche lo rendono particolarmente adatto per le turbine da aviazione.

Tuttavia, in questo modo, si crea una miscela fortemente disomogenea, che dà luogo ad una elevata produzione di inquinanti. Per abbattere le emissioni sono stati impiegati catalizzatori De-NO<sub>x</sub> con iniezione di ammoniaca o, in alternativa, l'iniezione di acqua distillata o vapore acqueo per abbassare la temperatura di fiamma.

Recentemente sono stati sviluppati i combustori RQL (Rich-burn, Quick-quench, Lean-burn), in cui la combustione procede per stadi successivi: nel primo stadio (rich zone) la combustione avviene con miscele più ricche di quella stechiometrica, in modo da evitare il raggiungimento di elevate temperature responsabili della produzione degli NO<sub>x</sub> termici. Gli idrocarburi incombusti ed il CO generati nella zona ricca si ossidano in condizioni di miscela povera e bassa temperatura nel terzo stadio del combustore (lean zone), per cui è richiesto un tempo di residenza sufficiente. La transizione da miscela ricca a povera è ottenuta tramite una rapida diluizione con aria nel secondo stadio del combustore (quench zone), dove il flusso viene accelerato per limitare il tempo di residenza nelle regioni stechiometriche [3].

Per ottenere una combustione più pulita, è necessario ottenere un migliore miscelazione di aria e combustibile. Partendo da questo principio sono stati sviluppati i combustori DLN [4].

### 1.3.2. Combustori DLN (Dry Low NO<sub>x</sub>)

Nei combustori DLN aria e combustibile vengono miscelati prima di essere immessi in camera di combustione; questo consente di mantenere il rapporto di equivalenza il più possibile vicino a quello ideale. In questo modo si ottiene una fiamma con temperatura uniforme e, utilizzando una miscela magra, si riduce notevolmente la produzione di inquinanti (figura 5).

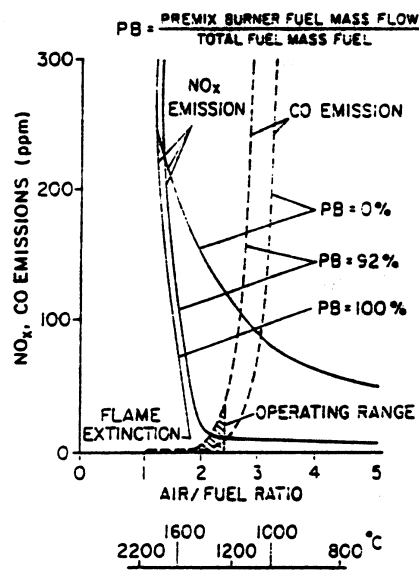


Figura 5: Dipendenza dell'emissione di NO<sub>x</sub> dalla temperatura di fiamma

Sia il limite inferiore che quello superiore di infiammabilità delle miscele si hanno quando la temperatura di fiamma raggiunge il valore limite, che per la miscela aria - metano è di circa 1400 °K, a fronte di un valore di circa 2200 °K con miscela stechiometrica [2].

Operando con miscele magre al limite di estinzione della fiamma, si osservano problemi di instabilità di combustione, di cui parleremo più ampiamente nel §1.4. Altri problemi connessi con l'uso di questo tipo di combustori sono l'autoaccensione e il flashback, in cui la fiamma risale il flusso di aria e combustibile fino agli organi del bruciatore con effetti dannosi. Perché questo non avvenga, è necessario che, al variare delle condizioni di funzionamento della macchina, il flusso premiscelato abbia sempre una velocità superiore a quella di propagazione della fiamma. Per far sì che la fiamma possa ancorarsi senza essere soffiata via con conseguente spegnimento del combustore, è necessario predisporre una zona con velocità uguale od inferiore a quella di propagazione (per una fiamma in flusso turbolento tale velocità è dell'ordine di 5-10 m/s).

I metodi classici per stabilizzare la fiamma sono: la scia di un corpo tozzo (bluff body), la zona di ricircolo generata mediante flussi fortemente swirlati o l'utilizzo di una fiamma pilota generata per diffusione.

Il funzionamento dei corpi tozzi si basa sull'utilizzo della scia turbolenta che detti corpi creano. Il funzionamento dei corpi tozzi è però poco efficiente, perché causano una elevata caduta di pressione e, per la vicinanza della fiamma, sono soggetti a bruciature, con conseguente necessità di frequenti interventi di manutenzione.

Un metodo diffuso per ancorare la fiamma è quello di imprimere al flusso una velocità tangenziale mediante una palettatura (swirler). Quando la componente tangenziale è sufficientemente elevata, si crea una zona di bassa pressione centrale in cui la velocità assiale del flusso si inverte. In questo modo si crea una zona di ancoraggio della fiamma, in cui si ha anche ricircolo di calore e specie chimiche provenienti dalla zona interessata dalla combustione.

Un terzo metodo è l'utilizzo di una fiamma diffusiva pilota, che crea una fiamma stabile a cui si ancora la fiamma dovuta al flusso premiscelato.

Poiché la fiamma diffusiva è responsabile di una parte rilevante delle emissioni nocive, viene ridotta il più possibile la percentuale di miscela che transita per essa. Solitamente, a pieno carico, soltanto il 10% dell'aria totale è destinata a mantenere la fiamma pilota, mentre quando la turbomacchina lavora a carichi bassi è necessario aumentare tale valore per mantenere stabile la fiamma. Nella fase di accensione tale valore raggiunge il 100%, si ha cioè la sola fiamma diffusiva (figura 6).

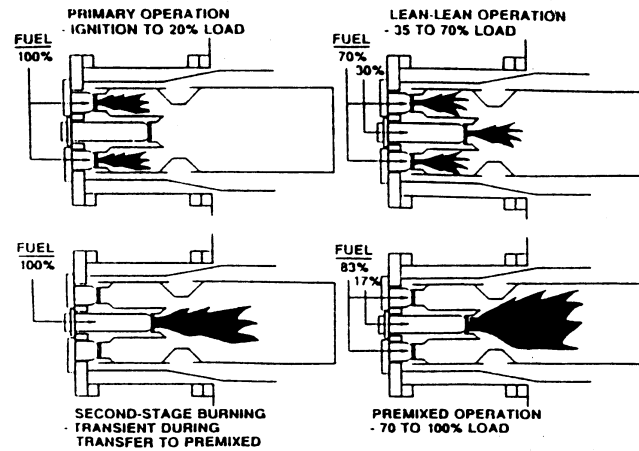


Figura 6: Possibili modi operativi di un combustore DLN con fiamma pilota

Il combustore in esame è il FIAT-701F, della potenza di 240 MW, utilizzato nell'impianto ENEL di La Spezia. Tale modello ha mostrato delle instabilità di combustione durante l'esercizio.

In figura 7 è mostrato il montaggio di un combustore DLN analogo a quello in esame; si notano le lance combustibile principale e pilota, il raccordo con il primo stadio di turbina e la valvola di bypass, necessaria a regolare la portata d'aria che passa nel bruciatore nelle varie condizioni di funzionamento della macchina.

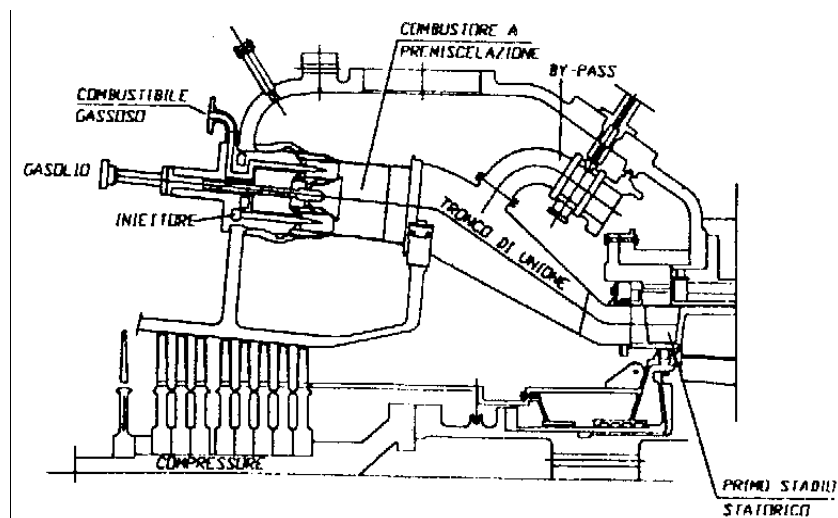


Figura 7: Installazione di un combustore DLN

Il combustore è composto da 8 ugelli principali che circondano l'ugello pilota che, come detto, ha il compito di creare un fronte di fiamma stabile al quale si ancorano le fiamme generate dai getti principali circostanti.

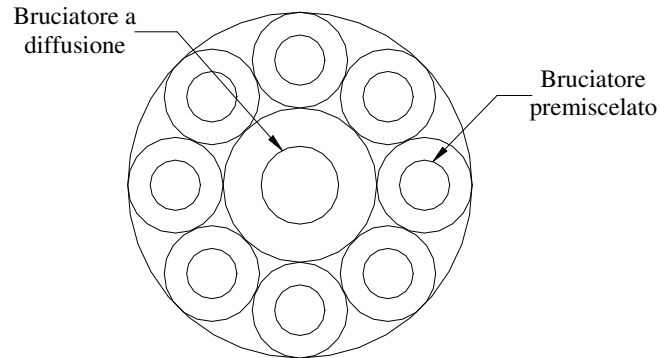


Figura 8: Disposizione dei bruciatori

Tutti gli ugelli, sia quelli principali che quello pilota, sono dotati di un vorticatore assiale. Quelli principali hanno il compito di rendere omogenea la miscela aria-combustibile, mentre quello del pilota deve anche generare una zona di ricircolo centrale stabile, adatta all'ancoraggio della fiamma (figura 8). Un impianto turbogas è composto da più combustori singoli disposti radialmente attorno all'asse.

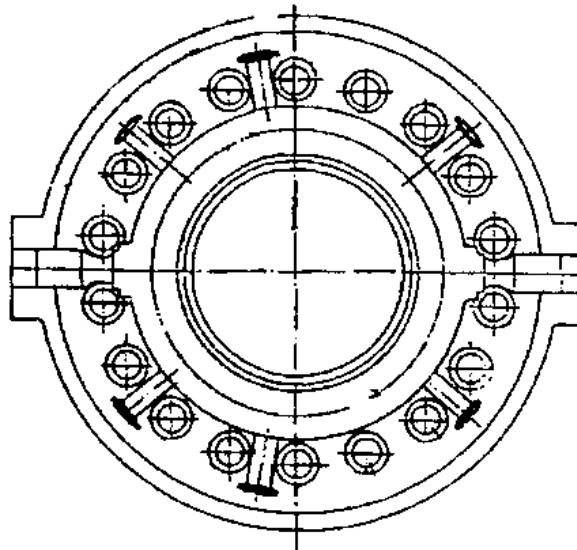


Figura 9: Disposizione dei combustori

In figura 10 è mostrata la sezione di un combustore DLN

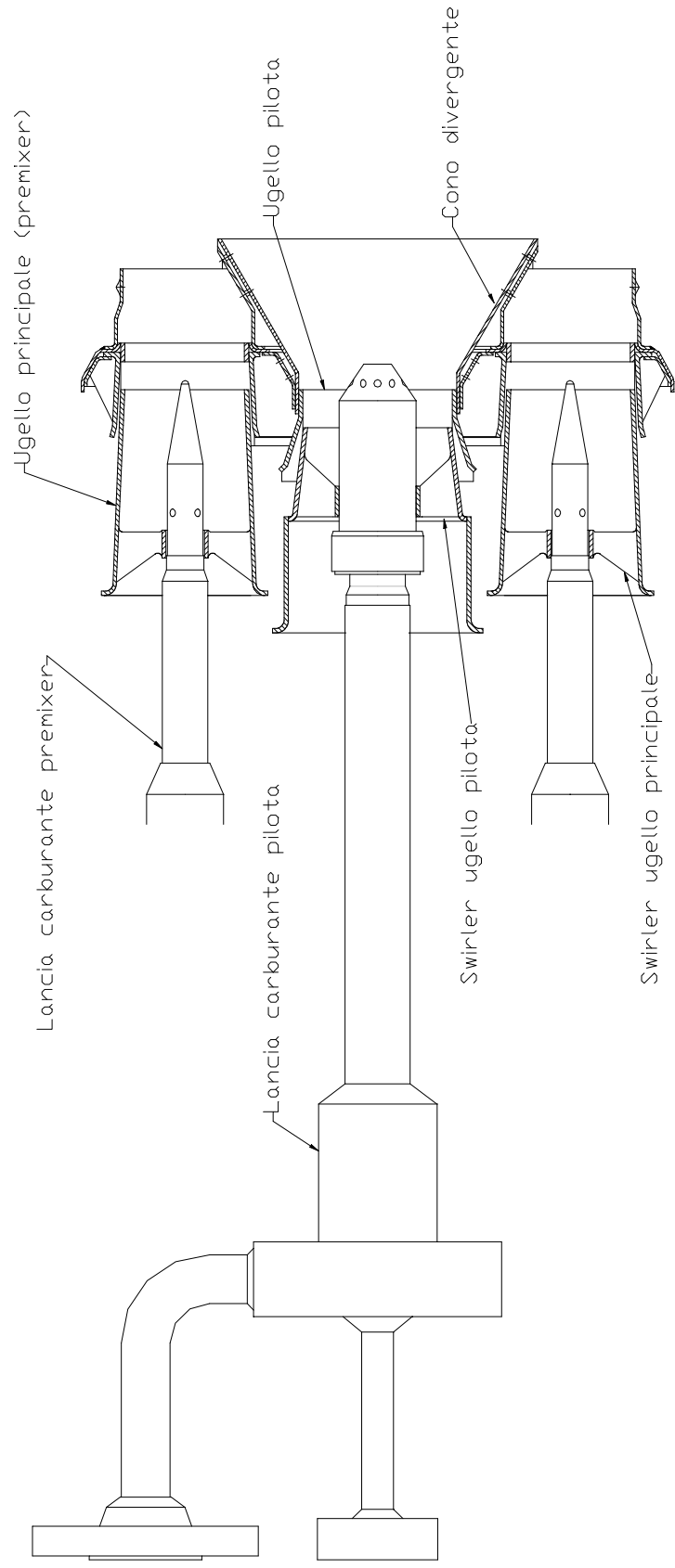


Figura 10: Sezione di un combustore DLN

## 1.4. Problemi connessi con l'uso dei combustori DLN

Come detto in precedenza, i combustori DLN possono presentare problemi di instabilità di combustione, in particolare per rapporti di dosatura aria-combustibile vicini al limite di infiammabilità delle miscele magre. Tale fenomeno consiste nella formazione di oscillazioni delle variabili termo-fluidodinamiche del sistema.

L'instabilità della combustione è dovuta all'interazione tra oscillazioni acustiche e processo di combustione e produce rilasci termici fluttuanti che a loro volta mantengono ed amplificano le oscillazioni acustiche stesse. Affinché la perturbazione si amplifichi nel tempo, il rilascio termico fluttuante deve fornire al modo acustico una quantità di energia superiore a quella che esso dissipa o trasmette all'esterno attraverso il contorno del combustore. Queste condizioni sono state espresse in termini matematici da Lord Raileigh:

$$\int_V \int_T p'(x,t) Q'(x,t) dt dV \geq \int_V \int_T L_i(x,t) dt dV$$

dove

$p'(x,t)$  fluttuazione di pressione

$Q'(x,t)$  rilascio termico fluttuante

$L_i(x,t)$  tasso di energia dissipata dall' $i$ -esimo meccanismo di dissipazione

$V$  volume del combustore

$T$  periodo di oscillazione

$t$  tempo

$x$  variabile spaziale

Il termine al primo membro rappresenta la quantità di energia trasferita in un periodo dal processo di combustione al modo acustico, il termine a secondo membro rappresenta l'energia dissipata nel ciclo. Quando la disuguaglianza è soddisfatta il combustore è instabile, quindi si innesca una dinamica oscillatoria divergente, che si stabilizza successivamente su un ciclo limite.

Il meccanismo di formazione delle instabilità nei combustori per turbogas può essere descritto dallo schema seguente [1]:

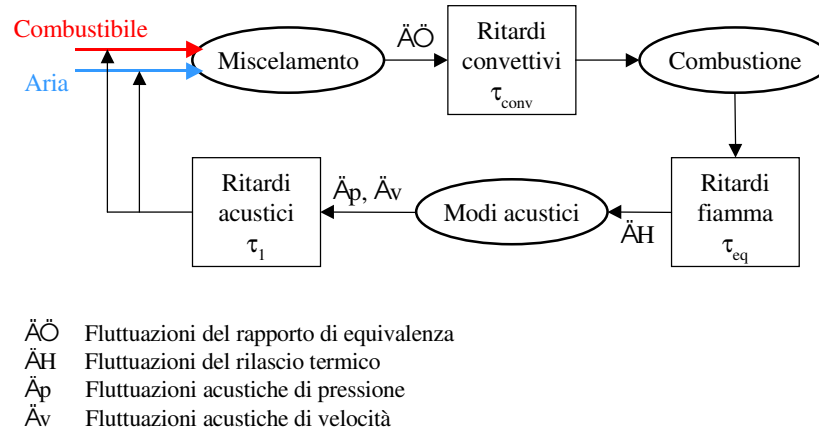


Figura 11: Meccanismo di formazione delle instabilità

Un rilascio termico fluttuante sostiene le oscillazioni di pressione di un modo acustico; le oscillazioni di pressione generate nella camera di combustione si propagano a monte nel condotto di alimentazione, raggiungono il punto dove si miscelano aria e combustibile e generano una oscillazione del rapporto di equivalenza  $\Phi$ . In questo modo si formano dei pacchetti di reagenti con rapporti  $\Phi$  variabili che, raggiunta la zona di combustione, danno luogo a rilasci termici oscillanti.

Affinché avvenga il passaggio di energia alla base dell'instabilità, è necessario che le due oscillazioni siano in fase, cioè il calore deve essere rilasciato nel momento di massima compressione; se la pressione ed il rilascio di calore sono in controfase, le oscillazioni vengono attenuate.

La frequenza tipica di questi fenomeni è di alcune centinaia di Hz, e possono causare bruciature, aumento della produzione di inquinanti ed, in casi limite, portare alla rottura del combustore.

## 1.5. Metodi di controllo delle instabilità di combustione

Per evitare gli effetti dannosi evidenziati nel paragrafo precedente, è necessario utilizzare delle tecniche di controllo. Le misure prese a questo scopo possono essere suddivise in due gruppi: passive ed attive.

### *Metodi di controllo passivi*

Si definiscono metodi passivi quelli che non utilizzano un controllo in ciclo chiuso, cioè non controllano le oscillazioni che si originano in un combustore a seconda delle variazioni misurate nei parametri caratteristici del sistema.

Possono risultare efficaci tutti gli interventi passivi che riescono a modificare i ritardi, il periodo delle oscillazioni instabili ed i meccanismi di dissipazione presenti all'interno del combustore. Alcuni esempi di metodi passivi, con i relativi modi di azione, vantaggi e svantaggi, sono elencati di seguito.

- Elementi smorzanti e silenziatori. Dissipano l'energia acustica in calore. Non sono in grado di evitare le oscillazioni ma possono ridurre l'ampiezza delle oscillazioni di pressione. Possono essere realizzati con componenti di basso costo ma spesso sono ingombranti e causano perdite di pressione aggiuntive.
- Risonatori di Helmholtz. Disturbano il campo di suono risonante e quindi lo sviluppo di instabilità di combustione. L'efficacia è limitata a particolari frequenze e, per basse frequenze, sono necessari volumi elevati.
- Baffles. Disturbano la propagazione delle onde sonore. Sono di semplice costruzione ma soggetti a bruciature, talvolta sono dannosi per la combustione stessa e causano perdite di pressione aggiuntive.
- Detuning. Modifiche geometriche effettuate allo scopo di modificare le frequenze proprie del combustore o sfasare i due modi oscillanti. Non hanno particolari svantaggi per la combustione, ma sono costose e complesse. L'efficacia è limitata a particolari frequenze, per cui c'è il rischio che le oscillazioni si spostino semplicemente ad altre frequenze.

A causa di questi inconvenienti, i metodi di controllo attivo costituiscono una interessante alternativa, in particolare per quegli impianti che debbano lavorare in condizioni operative variabili.

### ***Metodi di controllo attivi***

I sistemi di controllo attivo delle instabilità di combustione agiscono sul sistema modulando opportune variabili in modo da impedire la nascita di oscillazioni. Il presupposto è quello di disporre di un *osservatore*, cioè di un blocco funzionale che acquisisca informazioni da un certo numero di sensori e le elabori al fine di conoscere lo stato attuale del sistema, e di un *attuatore*, in grado di influire sullo stato del sistema stesso. In un sistema di controllo, i parametri che caratterizzano il sistema misurati dall'osservatore vengono inseriti in un anello di retroazione. Il *controllore*, a seconda del segnale di ingresso, agisce sull'attuatore in modo da impedire la nascita di oscillazioni.

E' possibile intervenire sul campo acustico generando onde di pressione addizionali mediante un altoparlante, oppure intervenire sulla combustione, modulando la portata del combustibile.

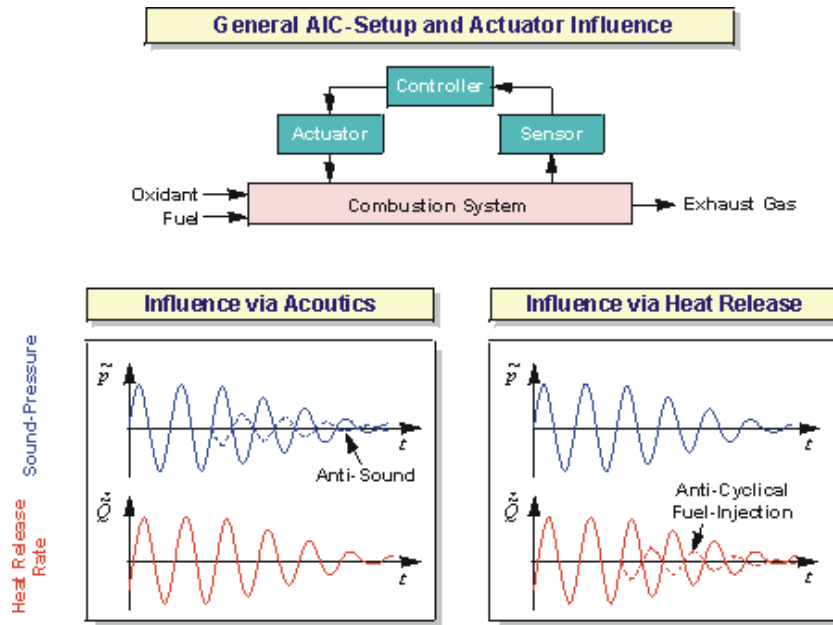


Figura 12: Meccanismi di azione dei sistemi di controllo attivo

Il primo metodo, illustrato in figura 13, è basato sulla generazione di onde di pressione in contropase rispetto a quelle presenti nel campo acustico (misurate tramite un sensore).

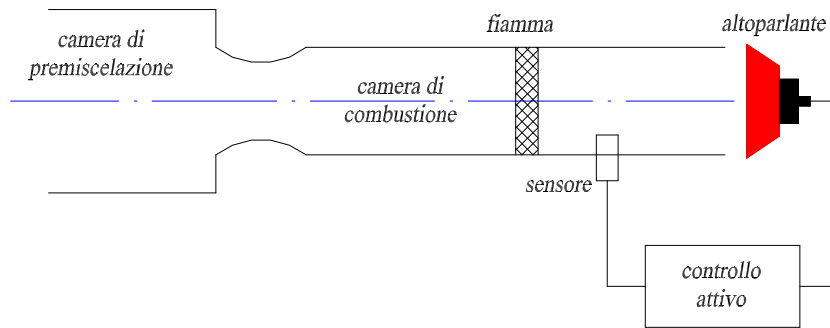


Figura 13: Schema di controllo attivo basato sulla modifica del campo acustico

Tale metodo ha mostrato la sua efficacia in numerosi studi di laboratorio (Ffowcs-Williams 1984, Dine, Heckl 1985, ecc), ma non è applicabile ai sistemi di combustione reali, che hanno una densità di energia associata all'oscillazione troppo elevata rispetto a quella generabile con un attuatori acustico.

Il secondo metodo, mostrato in figura 14, è basato sulla modulazione delle sorgenti di energia, ottenuta intervenendo sulla portata di combustibile.

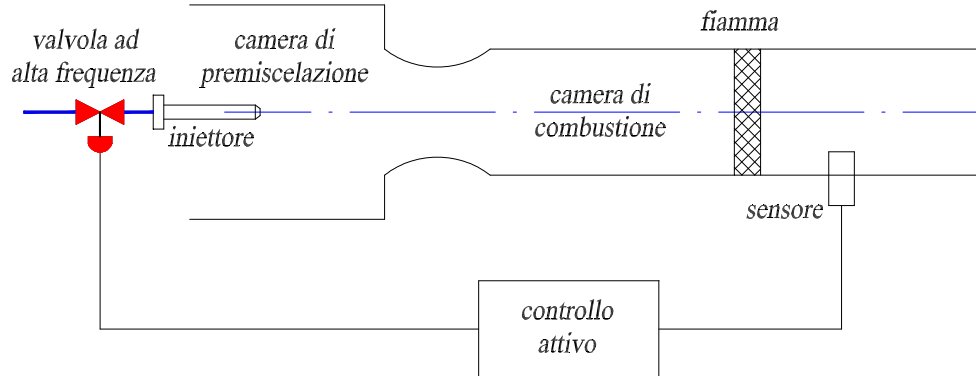


Figura 14: Schema di controllo attivo basato sulla modulazione del combustibile

Un sensore misura lo stato del sistema; in funzione del segnale ricevuto, un sistema di controllo in ciclo chiuso modula la portata di combustibile in modo da generare un rilascio termico oscillante in controfase rispetto alle oscillazioni di pressione. Poiché i fenomeni di instabilità termoacustica dipendono da rilasci termici fluttuanti di piccolo ordine di grandezza rispetto alla potenza termica complessiva, è sufficiente che la valvola sia in grado di modulare una certa frazione dell'intera portata. Sarà quindi possibile modulare la portata principale o sovrapporre a questa (costante) una fornitura secondaria controllata di combustibile.

I sensori tipicamente impiegati al fine di valutare lo stato del sistema, sono il trasduttore di pressione ed il fotosensore. Il primo permette di misurare l'oscillazione di pressione, mentre il secondo ottiene una misura del rilascio di calore attraverso la luce emessa dai radicali liberi durante la combustione.

L'applicazione di un sistema di controllo attivo non necessita di modifiche al combustore, non ha effetti dannosi sulla combustione e non genera perdite aggiuntive. Per gli impianti turbogas, un sistema di controllo adeguato potrebbe essere utilizzato per estendere il campo di funzionamento verso configurazioni con minori emissioni.

Il metodo descritto è applicabile ai combustori reali ed è stato sperimentato con successo anche in ENEL sul combustore TG50, ottenendo una riduzione delle oscillazioni di pressione e rilascio termico [1].

## 1.6. Condotto di adduzione del combustibile

Per realizzare il controllo attivo su combustori di grandi dimensioni la portata di combustibile è stata modulata mediante una valvola ad alta frequenza. Non essendo possibile controllare l'intera portata di combustibile con le valvole disponibili, si è scelto di agire sul bruciatore pilota che, pur elaborando circa il 10% della portata totale di combustibile, sembra controllare bene il rilascio termico della fiamma principale [1].

Una dettagliata descrizione della valvola scelta è inserita nella descrizione della strumentazione utilizzata per le prove (§ 3.1.1).

Come abbiamo visto, il combustibile viene iniettato in camera di combustione mediante la lancia pilota e quelle premixer. Il condotto dal serbatoio del gas alla lancia è dotato di valvole per il controllo della portata (figura 15).

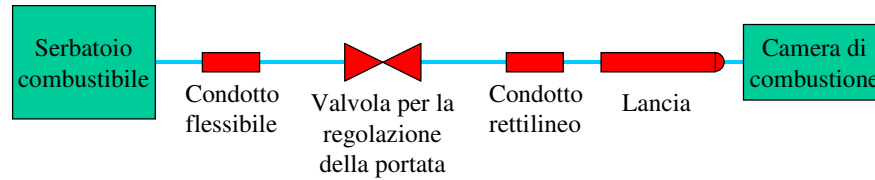


Figura 15: Condotto di adduzione del combustibile

Per poter effettuare il controllo attivo delle instabilità di combustione è necessario modulare la portata di combustibile con frequenza pari a quella delle instabilità; per questo si introduce nel condotto una valvola ad alta frequenza che, adeguatamente pilotata, generi una portata di combustibile in controfase rispetto al rilascio termico fluttuante in modo da annullare o comunque diminuire le fluttuazioni di pressione e di rilascio del calore.

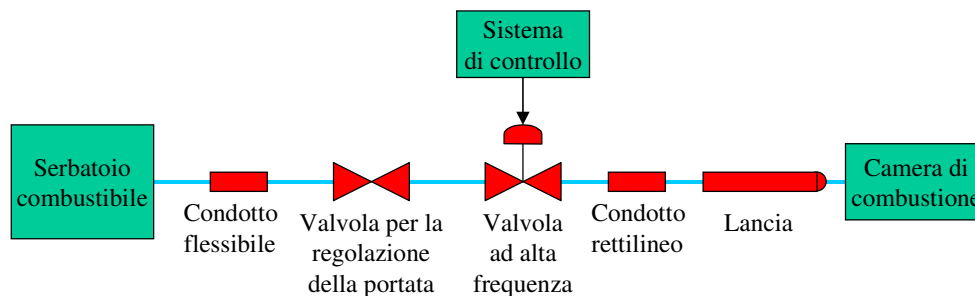


Figura 16: Condotto di adduzione del combustibile con valvola per la modulazione della portata

## 1.7. Scopo della ricerca

Per poter effettuare proficuamente il controllo attivo, è necessario conoscere non solo la dinamica della combustione, ma anche la dinamica del sistema di attuazione. Come verrà evidenziato nei successivi capitoli del presente lavoro, l'ampiezza e la fase della modulazione della portata variano con la frequenza, sia per effetto delle caratteristiche dinamiche della valvola che per l'effetto del condotto, che crea un ritardo di fase ed amplifica la modulazione della portata per alcune frequenze.

Scopo della tesi è quello di ottenere un modello del sistema di adduzione del combustibile, formato da attuatore, condotto e lancia del combustibile. Questo, assieme ad un modello della combustione, permette la costruzione di un sistema di controllo adeguato, in cui sia i ritardi che l'ampiezza delle azioni di controllo (modulazione della portata di combustibile) siano scelti correttamente.