

La combustione senza fiamma: Aspetti teorici e applicazioni tecnologiche nell'impiantistica di processo

Flameless combustion: theoretical aspects and technological applications in the process industry

A. Pozzoli, G. Migliavacca*, E. Parodi*, M. Perini****

* Stazione Sperimentale per i Combustibili, viale A. De Gasperi 3, San Donato Milanese, 02-516041.; fax 02-514286.e-mail: Migliavacca@ssc.it

** ITAS Spa, via Metauro 5, Monza, +39-039.2733.1; fax +39-039.745077. e-mail: info@itas.com

Riassunto:

La combustione senza Fiamma (Flameless), sviluppata e applicata negli Usa sin dagli anni 80, rappresenta oggi una consolidata e diffusa tecnologia di combustione. Il principio cardine di ridurre le emissioni inquinanti rimuovendo la "discontinuità" generata da qualsivoglia tipologia di fiamma o bruciatore, ha avuto importanti ricadute tecnologiche, promosse in primis dalle sempre più stringenti normative ambientali in materia di emissioni inquinanti ed in misura maggiore dai benefici gestionali, funzionali ed economici conseguenti all'utilizzo delle tecnologie FTO (Flameless Thermal Oxidation) di seguito riportate.

In questo lavoro sono descritte alcune applicazioni industriali di recente acquisizione, allo scopo di fornire una panoramica non di certo esaustiva, ma chiarificatrice delle tecnologie esistenti ed impiegate, con particolare riferimento al trattamento delle emissioni inquinanti e delle sostanze organiche volatili (COV).

Parole chiave : Flameless, combustione, Post-Combustore Rigenerativo

Summary

Flameless combustion, developed and applied in the USA since the 80th, is nowadays a well established and diffuse technology. The key principle lies on the reduction of pollutant emissions by removing the discontinuity generated by any kind of flame and burner and it was widely applied in order to respect the more and more strict limits for the air pollution, but also to achieve economical and functional benefits in the plants' managing, thanks to the FTO (Flameless Thermal Oxidation) technologies. This work describes some recent industrial applications, in order to give a not comprehensive but clarifying overview of the existing technologies, with a particular attention devoted to the treatment of Volatile Organic Compounds (VOC).

Key words: Flameless, Combustion, Rigenerative Thermal Oxidator

1. Introduzione

L'attenzione crescente alla qualità dell'aria, intesa come fondamentale componente della qualità della vita, ha determinato profondi cambiamenti nel ruolo della tecnologia, chiamata ad operare non solo a valle del ciclo produttivo, con i sistemi di depurazione, ma anche in tutte le fasi del ciclo stesso per prevenire la formazione degli inquinanti destinati a disperdersi nell'atmosfera [1].

In questo senso i tentativi di ottimizzare i processi di combustione mediante interventi sul bruciatore (*Air/Fuel Staging, Swirl*), sulla miscela combustibile/comburente, sulla camera di combustione (*Burnout, Reburning*) e sui prodotti della combustione (*SNCR, SCR*), pur avendo conseguito soddisfacenti risultati in numerosi ambiti applicativi, hanno spinto per numerosi anni, i ricercatori e le aziende operanti nel settore, alla ricerca di un sistema di combustione promosso da una "fiamma ideale", che desse luogo ad una combustione pulita e facilmente controllabile [2].

La chiave di volta che ha permesso di sviluppare e commercializzare gli innovativi sistemi di combustione di seguito descritti è stata quella di indirizzare la ricerca dall'ottimizzazione dei bruciatori all'ottimizzazione dei processi in senso lato, fino alla scelta estrema di spegnere la fiamma stessa dei bruciatori in camera di combustione.

2. Aspetti teorici

L'ossidazione termica convenzionale, veicolata cioè da un bruciatore di qualsivoglia tipologia, è un processo influenzato e governato da 3 macro-variabili strettamente correlate tra loro in maniera non gerarchica: la *temperatura*, il *tempo* e la *turbolenza* [3]. Tra di esse vige una sorta di principio di indeterminazione dovuto all'incapacità sperimentale di fare chiarezza sulla loro intrinseca correlazione.

Inoltre, dal momento che i processi che avvengono all'interno di una camera di combustione sono il risultato di una serie di fenomeni interagenti di natura fluidodinamica, chimico-cinetica e di scambio termico radiativo e convettivo, è necessaria, anche a livello modellistico, la formulazione di differenti sotto-modelli che descrivano i vari fenomeni coinvolti e che, scambiando informazioni fra di loro, diano forma al modello globale.

Le differenti condizioni locali che vengono a crearsi nelle varie zone della fiamma e della camera di combustione sono per l'appunto l'effetto di questa sovrapposizione di fenomeni. Nel contempo la formazione di molti composti inquinanti è, per l'appunto, legata a tali condizioni locali (temperature troppo alte o troppo basse, composizioni troppo ricche o troppo povere).

L'impiego di tecniche che prevedono la diluizione della fiamma associata ad un elevato preriscaldamento dei flussi entranti è alla base della tecnologia denominata "*flameless*", che consente di alterare profondamente la struttura tipica di un sistema di combustione, raggiungendo uno stato di reattività diffusa ed estesa a tutto il volume della camera di combustione. I vantaggi di questa nuova tecnologia sono notevoli: sia in termini di riduzione delle emissioni inquinanti (NO_x , *soot* ed elementi in tracce) che in relazione al rendimento termico dell'impianto.

La diluizione della fiamma è stata una delle primarie strategie introdotte per evitare la formazione di NO_x e di particolato. La diluizione è generalmente ottenuta grazie all'impiego di miscele magre, di correnti ossidanti vizzate o per mezzo del ricircolo dei fumi di combustione [4].

Nei bruciatori convenzionali la presenza di un marcato gradiente termico è necessaria per consentire l'innescarsi di quella catena di reazioni radicaliche che sono alla base del fenomeno della combustione. Tale condizione è abitualmente raggiunta nella regione del fronte di fiamma che costituisce una sorta di iso-superficie che racchiude e separa il volume dei reagenti da quello dei prodotti. La stabilità di questo fronte, rispetto alle fluttuazioni di regime ed ai fenomeni di turbolenza, è un requisito essenziale per la funzionalità dei sistemi tradizionali di combustione e viene mantenuta grazie ad un equilibrio stabile fra velocità di fiamma e velocità di flusso. D'altro canto nel caso in cui i reagenti siano preriscaldati al di sopra della loro temperatura di

autoignizione, la presenza di un fronte di fiamma non risulta più necessaria in quanto l'intero volume di reazione viene a trovarsi in condizioni idonee all'innescarsi ed al sostentarsi delle reazioni di combustione. In tal modo non si ha la presenza di quei picchi di temperature e di quelle zone di combustione non stechiometrica che sono alla base della formazione degli ossidi di azoto e del particolato carbonioso. Inoltre lo scambio termico ed il controllo di molti processi all'interno del combustore possono risultare favoriti dalla maggior omogeneità all'interno della camera di combustione.

La possibilità di operare in condizioni *flameless* è dunque legata al raggiungimento di particolari condizioni che consentono il mantenimento dello stato stazionario voluto. In Figura 1 è riportato un diagramma che illustra i limiti dei vari regimi di combustione che possono essere raggiunti con un particolare tipo di bruciatore sia in presenza che in assenza di fiamma. Una condizione di regime di combustione stabile (A) è ottenibile per qualunque temperatura, a patto che la percentuale di ricircolazione dei fumi sia sufficientemente bassa o nulla; il regime *flameless* (C) è invece raggiungibile solo per temperature al di sopra della temperatura di autoignizione e per elevati livelli di ricircolazione dei fumi; uno stato intermedio di fiamma instabile è invece rappresentato dalla regione (B).

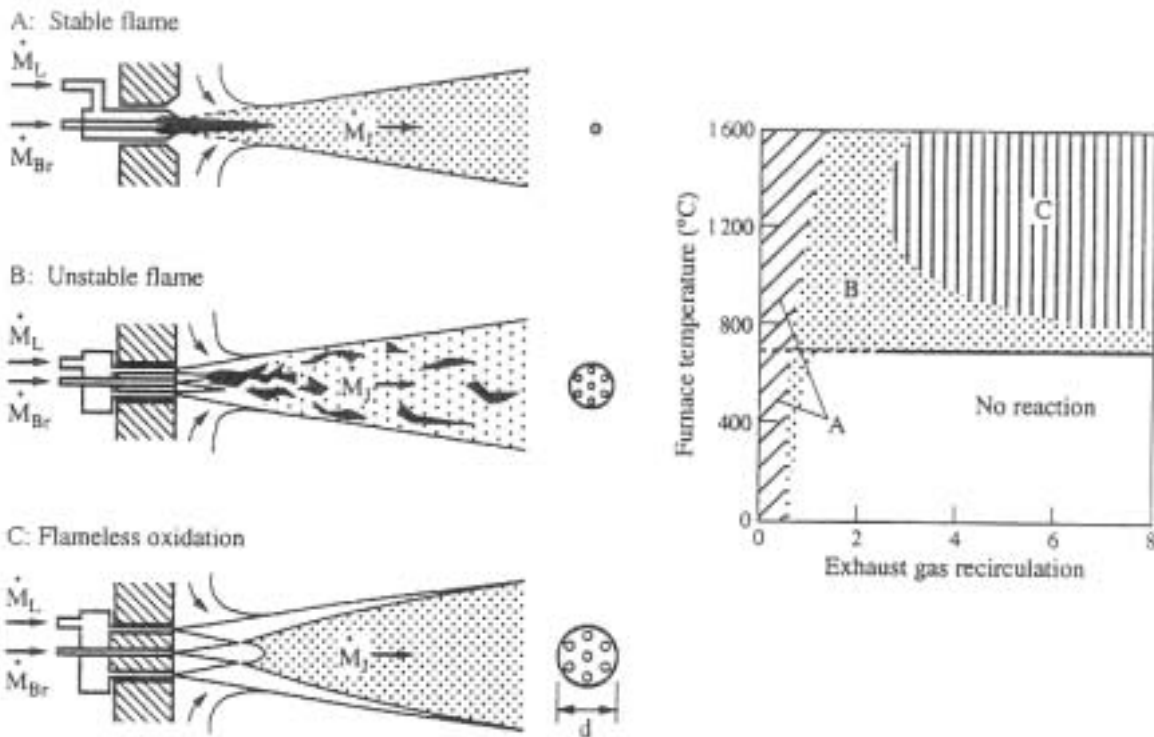


Figura 1: Regimi di Combustione per differenti tipologie di miscelazione combustibile-comburente [5].

Particolari bruciatori sono, ad esempio, stati recentemente sviluppati per poter operare alternativamente in condizioni di fiamma o *flameless* a seconda della velocità del getto d'uscita e della conseguente ricircolazione diretta dei gas combusti che vengono convogliati nella fiamma grazie al suo elevato momento, come illustrato sempre in Figura 1.

Le caratteristiche principali della combustione *flameless*, altresì indicata come *mild combustion*, sono da attribuirsi all'assenza di un fronte di fiamma ed alla presenza di un volume di reazione sostanzialmente omogeneo. Ciò consente, a livello modellistico, di schematizzare il processo

mediante l'analogia con un reattore a miscelazione completa WSR (*Well Stirred Reactor*). Tale analogia è ulteriormente rafforzata dai risultati di molti esperimenti che indicano una generale omogeneità della temperatura all'interno del reattore stesso. Alcuni studi teorici [6], condotti per l'appunto impiegando un modello di reattore adiabatico perfettamente miscelato, hanno messo in evidenza la presenza di stati stazionari multipli che rappresentano un possibile problema di stabilità del sistema.

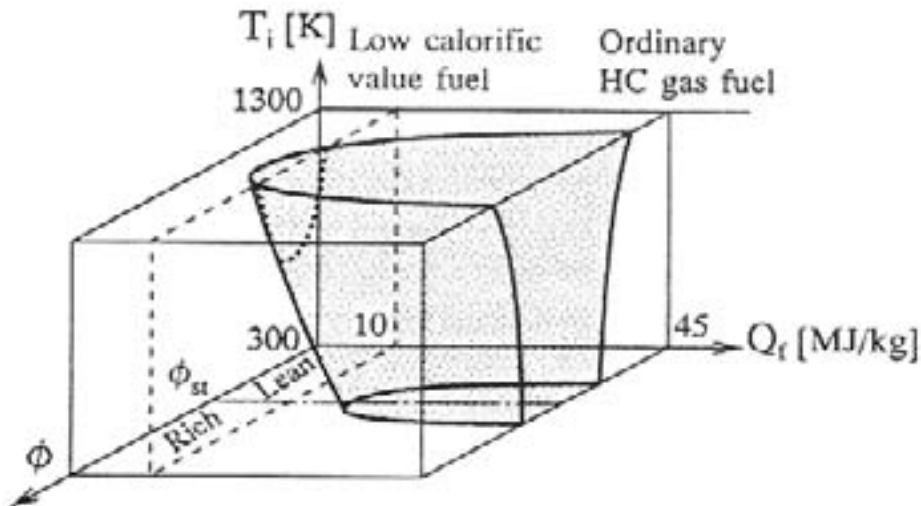
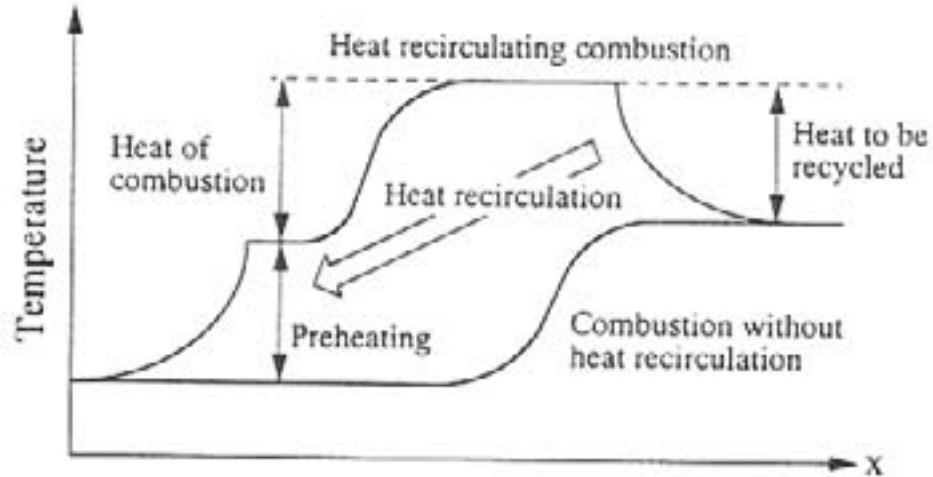


Figura 2: Piano e relativo spazio dei regimi di combustione [7].

Le condizioni di preriscaldamento possono essere ottenute non necessariamente mediante una ricircolazione diretta dei fumi, ma anche mediante la sola ricircolazione del calore, attraverso un sistema di trasferimento del calore stesso dai prodotti ai reagenti. Tale sistema consente non soltanto di impiegare miscele combustibili a basso potere calorifico, ma anche di conseguire notevoli risultati in termini di efficienza e risparmio energetico. La storia termica di un sistema adiabatico a combustione premiscelata, rappresentata schematicamente nel diagramma superiore di

Figura 2, sia in condizioni di assenza che di presenza di ricircolazione del calore, mostra come la massima temperatura raggiunta dipenda dalla quantità di calore riciclato e come quindi risulti indipendente sia dal potere calorifico del combustibile che dal rapporto stechiometrico con il comburente.

A temperatura ambiente un combustibile presenta un intervallo di infiammabilità più o meno esteso e centrato intorno alla composizione della miscela stechiometrica, i limiti di tale intervallo si ampliano al crescere della temperatura, come mostrato nel secondo diagramma di Figura 2. Per un combustibile a basso potere calorifico il dominio di combustione può addirittura essere nullo a temperatura ambiente e comparire soltanto al di sopra di una certa temperatura di soglia. Per questa ragione la tecnica del preriscaldamento diviene essenziale quando si trattano miscele particolarmente magre o povere, che possono ad esempio provenire dall'industria di processo.

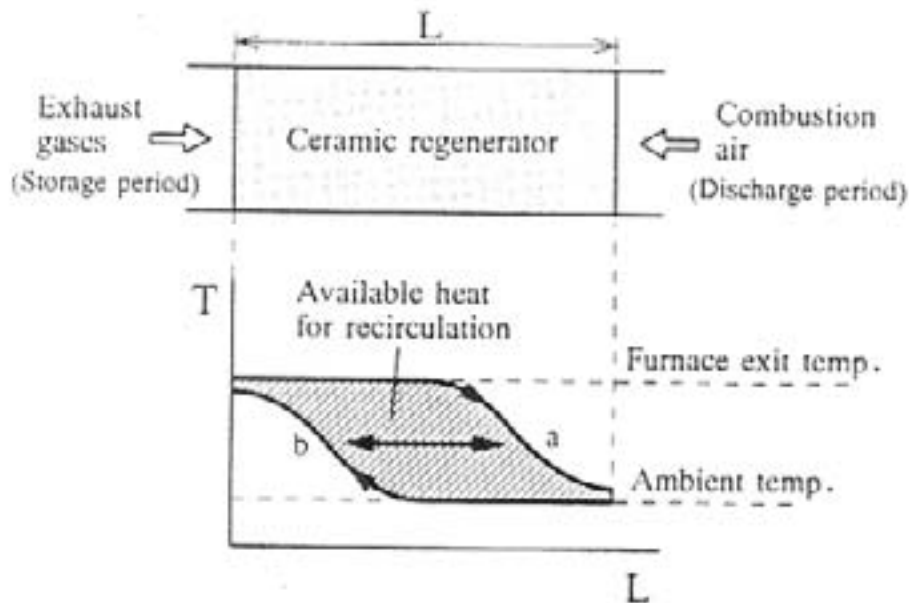


Figura 3: Gradienti termici "tipo,, di un letto ceramico [7].

In queste applicazioni il preriscaldamento rappresenta un punto chiave. A tale scopo gli scambiatori di calore installati negli inceneritori di ultima generazione appartengono alla famiglia degli scambiatori *rigenerativi* i quali costituiscono un sistema molto efficiente di recupero del calore (Figura 3). L'impiego di materiali ceramici innovativi mediante letti in mattoni (Honeycombs) o selle (Saddles) consente di raggiungere una temperatura di preriscaldamento delle correnti superiore ai 1000 °C. Al di là dei sistemi più tradizionali, basati sull'impiego di almeno due letti ceramici attraverso i quali fluiscono, a fasi alternate, le correnti inquinate da una parte e l'aria depurata dall'altra, nuovi prototipi impiantistici integrano oggi le varie torri all'interno di unità più compatte e provviste di $(2n+1)$ letti ceramici percorsi alternativamente dalle correnti inquinate secondo specifiche sequenze temporali. In aggiunta, laddove possibile, supportando sulle stesse ceramiche descritte catalizzatori compatibili con gli HAPs (Hazardous Air Pollutants) da abbattere, è possibile conseguire il duplice effetto di ridurre le temperature di esercizio in camera di combustione e di aumentare l'efficienza globale di abbattimento (DRE: Destruction and Removal Efficiency) del sistema.

In Figura 4 è riportata una panoramica relativa ad una configurazione standard a 3 letti ceramici di questa tipologia di impianti più nota con il termine di RTO (Rigenerative Thermal Oxidizer - Ossidatori Termici Rigenerativi).



Figura 4: RTO con letti ceramici per il trattamento emissioni HAP (Hazardous Air Pollutant) dell'industria serigrafica.

3. Applicazioni Tecnologiche

Nell'impiantistica industriale la combustione senza fiamma ha trovato diverse applicazioni in svariati settori quali l'industria farmaceutica e petrolchimica, l'industria della stampa e della carta, l'industria della verniciatura e, in generale, in qualsiasi realtà produttiva nella quale si rende necessario il trattamento termico (incenerimento) degli sfidi di processo o di correnti inquinate.

Un forte impulso all'innovazione e al miglioramento è derivato dalla necessità di ridurre non solo i costi di investimento per la messa in opera degli impianti, ma anche i costi di esercizio e di manutenzione degli stessi. In questo senso il sistema di combustione senza fiamma si configura come un accorgimento tecnico, applicabile ai sistemi di combustione, che permette di migliorarne la resa energetica in particolari condizioni operative [1].

Esso infatti viene impiegato quando la concentrazione degli inquinanti combustibili negli effluenti da trattare non è sufficiente per il raggiungimento della condizione di autosostentamento (condizione altresì detta di "autotermicità") delle camere di combustione. In altri casi, si impiega questa tecnologia di fronte a specifiche esigenze di processo, quali il recupero dell'energia chimica residua degli effluenti o l'imposizione di limitare ed abolire l'utilizzo di fiamme libere in zone antideflagranti, ma la si applica anche quando si renda necessario l'utilizzo di altri sistemi di apporto e/o recupero entalpico.

In tutti i dispositivi di trattamento delle emissioni o degli effluenti (inceneritori, torce, combustori e post-combustori) per ottenere, in camera di combustione, la temperatura richiesta dal processo, solitamente compresa nell'intervallo 750÷1200 °C, diventa necessaria la messa in funzione dei bruciatori installati. Ciò comporta l'adduzione di aria dall'esterno per la combustione del combustibile di supporto (generalmente gas naturale, propano o gpl e in misura minore gasolio),

penalizzando dal punto di vista energetico il funzionamento dell'impianto. Va inoltre ricordato che l'esercizio di un bruciatore o di un banco-bruciatori implica un oneroso sistema di automazione e di controllo degli stessi il quale è soggetto a controlli, guasti ed opere di manutenzione.

Per superare queste difficoltà tecniche ed economiche si sono sviluppati mezzi per ottenere indirettamente il raggiungimento della condizione di autotermicità dei forni, incrementandone la concentrazione in prodotti combustibili mediante inserimento diretto, dall'esterno, di gas combustibile nel flusso in ingresso. L'ossigeno necessario per la combustione del gas aggiunto è infatti generalmente già disponibile negli effluenti da trattare e nel caso in cui non lo fosse lo si può recuperare da correnti aeriformi sicuramente presenti in stabilimento (aria fresca).

In pratica, una volta portato a regime l'impianto mediante l'utilizzo dei bruciatori o delle termoresistenze nella fase di avviamento, dopo aver iniziato a convogliare gli effluenti da trattare nella camera, il bruciatore (o la termoresistenza) impiegato per il preriscaldamento viene spento e viene avviato il regime *flameless*.

Esso permette di inserire un flusso di gas combustibile direttamente nella corrente degli effluenti, con una portata controllata da una valvola di regolazione, come rappresentato schematicamente nel P&I di un impianto di ossidazione termica rigenerativa a 3 torri nella Figura 5. La valvola di regolazione a sua volta è modulata da un controllo di temperatura che tende a mantenere costante la temperatura nella camera di combustione al valore stabilito dal processo.

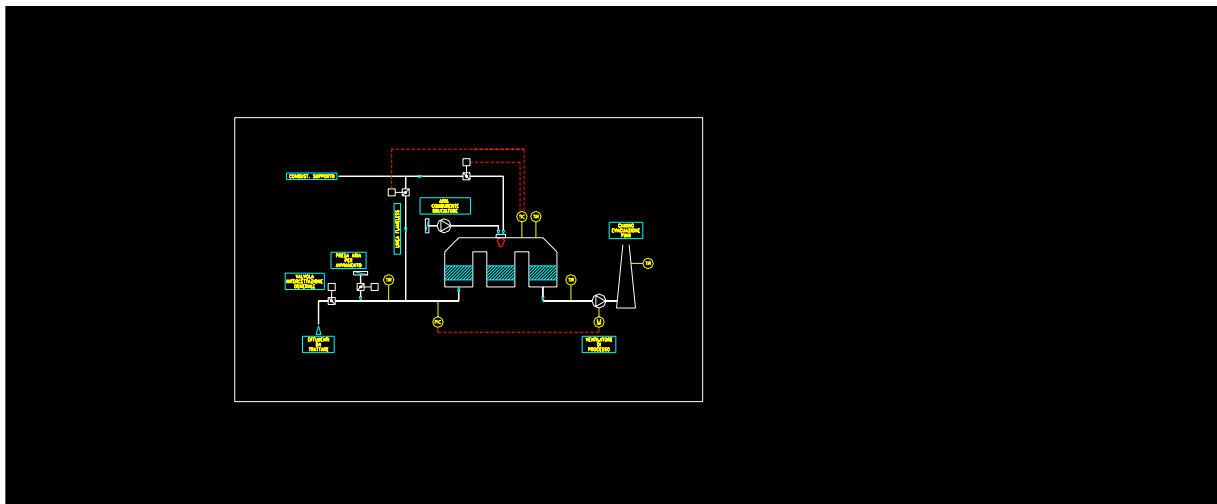


Fig. 5: P&I Impianto Rigenerativo a 3 torri.

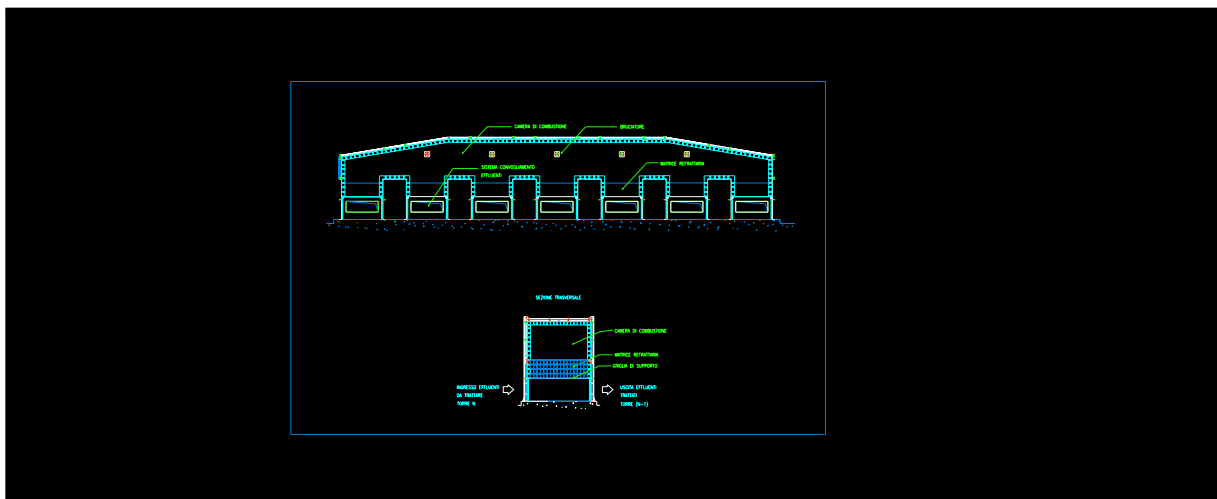




Figura 6: Assieme standard della camera di combustione e relativa panoramica impiantistica di un RTO da 250.000 Nm³/h con torri rigenerative in linea ad elevato DRE (Destruction and Removal Efficiency).

In tal modo il consumo del combustibile ausiliario è strettamente correlato e limitato al *deficit* energetico rispetto alla condizione autotermica degli effluenti da trattare. Inoltre la quantità di effluenti trattati e la portata di fumi al camino restano grosso modo costanti, data l'influenza minima della quantità di gas aggiunta, ottenendo così un funzionamento più equilibrato dell'impianto.

È evidente quindi la convenienza dell'impiego del sistema *flameless* soprattutto quando la condizione di insufficiente concentrazione di specie combustibili negli effluenti è preponderante, come durata nel tempo, rispetto ad una condizione di autotermicità.

Un applicazione estremamente chiarificatrice del sistema di combustione descritto e dei concetti sopra esposti è rappresentata dai Post-Combustori di tipo rigenerativo. Senza entrare nei dettagli del funzionamento di questi impianti, per il quale si rimanda alla letteratura specifica [8], la condizione di autotermicità del reattore (sistema torri di preriscaldamento, recupero, rigenerazione e camera di combustione) è determinabile in prima approssimazione mediante le relazioni:

$$\text{-----} \quad (1)$$

$$C_{Aut} = \frac{(T_{out} - T_{in}) \cdot Cp_m}{PCI_{VOC}} \quad (2)$$

$$q_{VOC} = V_N \cdot C_{VOC} \cdot PCI_{VOC} \quad (3)$$

dove:

- μ = Efficienza termica del sistema di rigenerazione
- T_{comb} = Temperatura in camera di combustione
- T_{in} = Temperatura della corrente aeriforme alimentata all'inceneritore
- T_{out} = Temperatura della corrente aeriforme fuoriuscente dall'inceneritore
- C_{aut} = Concentrazione VOC in condizione autotermica
- C_{p_m} = Calore specifico dell'aeriforme alla temperatura media $(T_{\text{in}}+T_{\text{out}})/2$
- PCI_{VOC} = Potere calorifico inferiore delle sostanze organiche volatili presenti
- q_{VOC} = Apporto entalpico attribuibile alla completa combustione delle sostanze organiche volatili presenti nell'aeriforme alimentato all'impianto
- V_N = Portata aeriforme alimentato all'impianto
- C_{VOC} = Concentrazione VOC

Al disotto della condizione di autotermicità propria del sistema C_{Aut} , il bilancio entalpico delle torri e il raggiungimento della temperatura di combustione in camera viene realizzato mediante l'intervento dei bruciatori ausiliari; nella condizione opposta l'entalpia in eccesso conseguente al *surplus* energetico (q_{VOC}) fornito dalle sostanze organiche volatili alimentate si disperde *in toto*, sotto forma di calore sensibile, nei fumi convogliati al camino.

Il risparmio energetico viene calcolato come differenza fra la quantità combustibile alimentata col sistema *flameless* per raggiungere la condizione di autotermicità e quella consumata con l'impiego del bruciatore in camera di combustione per mantenere le condizioni operative richieste dal processo di ossidazione. Va infine citato il risparmio energetico sul consumo del ventilatore dell'aria comburente per il bruciatore e quello dovuto al fatto che l'aumento di portata dei fumi si riflette inevitabilmente sul funzionamento del ventilatore di processo (incremento dei volumi in gioco e delle perdite di carico del sistema).

Supponendo per esempio di lavorare nelle condizioni riassunte in Tabella 1, calcolando come sopra riportato i consumi di energia termica (espressi in termini di Nm^3/h di combustibile di supporto alimentato, nel caso specifico gas naturale con un potere calorifico inferiore ipotetico di $8200 \text{ kcal}/\text{Nm}^3$) in funzione del carico organico di VOC potenzialmente combustibile, si ottiene l'andamento riportato in Figura 7.

Tabella 1: Dati di progetto Post-Combustore rigenerativo

DATI di PROGETTO RTO		
Portata Nominale	(Nm^3/h)	20.000
Efficienza Termica	(%)	94,0
T ingresso fumi	($^{\circ}\text{C}$)	50
T camera combustione	($^{\circ}\text{C}$)	800
PCI_{VOC}	(Kcal/Kg)	10.000

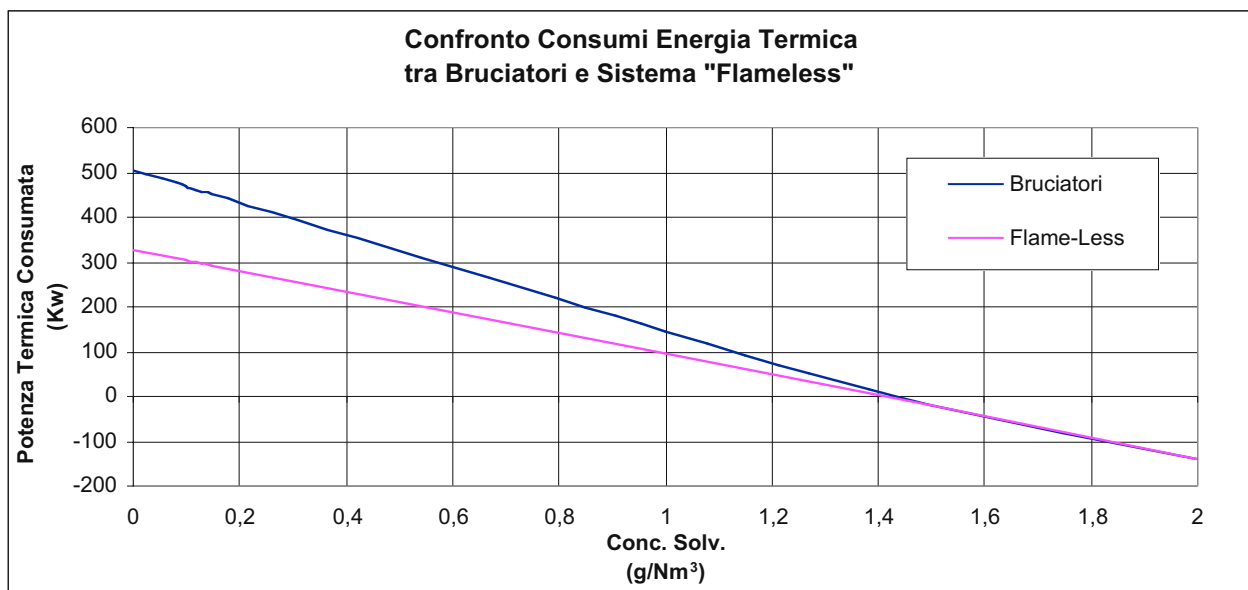


Figura 7: Rappresentazione grafica dei consumi termici di un impianto RTO da 20.000 Nm³/h operante alternativamente con bruciatori o in regime *flameless*.

La Tabella 2 quantifica quanto illustrato graficamente.

Tabella 2: Consumi Termici di un impianto RTO da 20000 Nm³/h operante alternativamente con bruciatori o in regime *flameless*.

VOC	Consumi Termici		Risparmio		Note
	Bruciatori	FlameLess			
<i>g/Nm³</i>	<i>kW</i>	<i>kW</i>	<i>KW</i>	<i>%</i>	
0	502,08	324,42	177,66	35,39	Deficit Entalpico
0,2	430,10	277,91	152,19	35,39	Deficit Entalpico
0,4	358,12	231,40	126,72	35,39	Deficit Entalpico
0,6	286,13	184,88	101,25	35,39	Deficit Entalpico
0,8	214,15	138,37	75,78	35,39	Deficit Entalpico
1	142,17	91,86	50,31	35,39	Deficit Entalpico
1,2	70,18	45,35	24,83	35,39	Deficit Entalpico
1,395	0,00	0,00			Condizione Autotermica
1,4	-1,16	-1,16			Surplus Entalpico
1,6	-47,67	-47,67			Surplus Entalpico
1,8	-94,19	-94,19			Surplus Entalpico

Come si nota, escluse le zone oltre la condizione di autotermicità (kW termici nulli) rappresentata dalla concentrazione $C_{Aut} = 1,395 \text{ g/Nm}^3$, le linee interpolanti rappresentanti i consumi termici ottenuti mediante utilizzo diretto dei bruciatori e alternativamente di gas combustibile direttamente negli effluenti hanno pendenze ed andamenti differenti. Questo a dimostrazione del fatto che in tutto lo spettro dei parametri di esercizio dell'impianto l'utilizzo di combustibile di supporto (*fuel gas*) alimentato direttamente nella corrente aeriforme da trattare, e la conseguente

disabilitazione dei bruciatori, consente di risparmiare quote significative di energia ausiliaria necessaria per il funzionamento dell'impianto ed il raggiungimento delle prestazioni attese.

Il risparmio conseguito è tanto più rilevante quanto maggiore è la capacità volumetrica dell'impianto, ma se ne apprezza la convenienza già a partire da dimensioni limitate quale quella illustrata e rappresentativa delle potenzialità installate di norma da parte delle MPI (Medie Piccole Imprese) italiane.

Il risparmio energetico, variabile dal 30 al 40 %, dipende della potenzialità termica installata in assenza di *flameless*, ha una incidenza rilevante sia in termini di costi di esercizio sia di installazione, in quanto consente di installare utenze (bruciatori e ventilatori) di dimensioni e potenzialità inferiori, ai quali viene richiesto di assolvere alla loro funzione solo nella fase di avviamento.

Nella fattispecie, ipotizzando di esemplificare il calcolo della potenza elettrica richiesta per il funzionamento del ventilatore principale di processo e dei ventilatori ausiliari di combustione dei bruciatori mediante espressioni del tipo:

$$kW_e = \frac{V_N \cdot \left(\frac{T + 273.15}{273.15} \right) \cdot P_T}{102 \cdot \eta_e \cdot \eta_m} \quad (3)$$

dove:

kW_e = Potenza elettrica assorbita

T = Temperatura corrente aeriforme (in °C)

P_T = Pressione/Depressione Totale alla bocca della soffiante

η_e = Rendimento elettrico motore elettrico accoppiato alla soffiante

η_m = Rendimento meccanico soffiante

e assumendo nel calcolo delle perdite di carico del sistema espressioni classiche di tipo quadratico per il moto all'interno di condotte, correlazioni empiriche per le perdite di carico all'interno dei letti ceramici di Honeycombs e correlazioni quadratiche tradizionali per i letti ceramici di Saddles, si ottengono i risultati riportati in Tabella 3.

Tabella 3: Consumi Elettrici di un impianto RTO di potenzialità nominale di 20.000 Nm³/h operante alternativamente con bruciatori o in regime *flameless* in differenti condizioni di portata.

Portata	Ceramiche	Totale	Bruciatori	FlameLess	%
Nm ³ /h	mmH ₂ O	mmH ₂ O	kWe	kWe	
5000	42,6	58,2	1,686	1,634	3,10
7500	63,9	86,5	3,760	3,643	3,10
10000	85,2	117,7	6,817	6,605	3,10
12000	102,2	144,6	10,052	9,741	3,10
15000	127,8	188,4	16,369	15,862	3,10
17500	149,1	228,0	23,109	22,393	3,10
20000	170,4	270,4	31,322	30,350	3,10
24000	204,4	344,0	47,828	46,345	3,10

Il risparmio medio dei consumi elettrici, poco sensibile dal punto di vista numerico ma rilevante dal punto di vista energetico, unitamente a quanto risparmiato in termini di potenzialità termica, consente di asserire che l'esercizio in condizioni di autotermicità e regime *flameless* di impianti di incenerimento rigenerativi permette ammortamenti degli investimenti estremamente redditizi unitamente a capacità di abbattimento [1] delle emissioni in atmosfera ottimali. Si può quindi rilevare che l'esercizio della camera di combustione, agevolato dalla combustione in massa dell'intera volumetria disponibile e l'utilizzo di opportuni ricircoli interni di aria all'impianto, consentono di porre tali applicazioni ai vertici delle tecnologie BATNEEC (Best Available Technologies Not Entailing Excessive Costs) incentivate e promosse dalle legislazioni comunitarie in vigore [1].

Conclusioni

La continua ricerca nel campo della riduzione degli inquinanti ha permesso lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche che hanno rivoluzionato la struttura degli impianti nella totalità dei settori industriali. I sistemi di combustione basati sulla tecnologia *flameless* rappresentano, senza dubbio, una delle più interessanti e promettenti alternative che già attualmente trovano ampia applicazione industriale e che prospettano un notevole sviluppo sia qualitativo che quantitativo. Il concetto stesso di eliminazione della fiamma ed il raggiungimento di un regime di funzionamento completamente differente da quello convenzionale, impensabile fino ad alcuni anni fa, dimostra l'esistenza di aspetti inesplorati anche nell'ambito di quei fenomeni e di quelle tecnologie che possono apparire ormai completamente noti.

Bibliografia

- [1], A. CAPRIA, A. L. DE CESARIS, M. DUBINI e M. GIUGLIANO, Controllo delle emissioni in atmosfera da impianti industriali, ISTITUTO PER L'AMBIENTE, 1992
- [2] R. K. AGRAWAL, S. C. WOOD, Innovative Solutions for Cost-effective NOx Control, Pollution Engineering, June 2002
- [3], E. PARODI, A. ROLLA, Impianti di combustione per la termodistruzione delle sostanze organiche volatili, La Rivista dei Combustibili, (1998), 52, 81-92
- [4] A. MILANI, A. SAPONARO, tecnologie di combustione senza fiamma, La Termotecnica, (2000), gennaio/febbraio, 87-94
- [5] J. A. WUNNING, J. G. WUNNING, Prog. Energy Combust. Sci. (1997), Vol. 23, pp. 81-94
- [6] A. CAVALIERE, M. DE JOANNON, Italian Flames Days, Roma (1999), pp. 337-344
- [7] M. Katsuki, T. Hasegawa, 27TH International Symposium (Int.) on Combustion (1998), pp. 3135-3146
- [8] T. BOGER, Performance and design of RTO/RCO with Ceramic Honeycombs – Influence of Unequal Mass Flow and Auto-Ignition, Personal Communication