

# FUNZIONAMENTO DEL VENTURI E DEGLI ORIFICI

## CAPITOLO 2

Tutti i sistemi di combustione industriale sono costituiti da tre parti principali:

- 1) Il miscelatore, parte del sistema che provvede a miscelare il gas combustibile con l'aria comburente nelle proporzioni desiderate e ad inviare la miscela al bruciatore ad una determinata pressione.
- 2) Il bruciatore, parte del sistema dove inizia la reazione di combustione.
- 3) I dispositivi di controllo e di sicurezza ed ogni altro accessorio manuale o automatico destinato a regolare la quantità di combustibile e di comburente che affluiscono al bruciatore

### PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN ORIFICIO

Le dimensioni e la forma di un miscelatore sono impostate sui principi fondamentali che regolano l'efflusso di un fluido attraverso un orificio.

Un orificio è una restrizione di sezione che provoca una perdita di carico (caduta di pressione), quando un fluido lo attraversa. Questa è una definizione piuttosto grossolana ma che tuttavia aiuterà meglio a comprendere certi fenomeni relativi alla dinamica dei fluidi.

La formula pratica che regola l'efflusso di un fluido gassoso attraverso un orificio, per pressioni sino a 3500 mm H<sub>2</sub>O è la seguente:

$$Q = K \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot h}{p}} \quad \text{Eq. 01}$$

ove

- Q = efflusso o portata dell'orificio (m<sup>3</sup>/s)
- K = coefficiente di scarico o rendimento dell'orificio
- S = sezione dell'orificio (m<sup>2</sup>)
- g = accelerazione gravitazionale (~9,81 m/s<sup>2</sup>)
- h = perdita di carico attraverso l'orificio (mm H<sub>2</sub>O)
- p = peso specifico del gas (kg/m<sup>3</sup>)

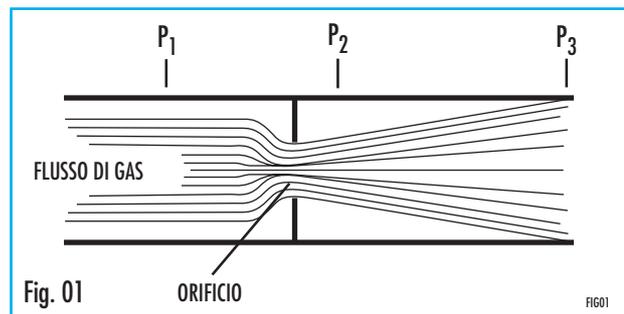
La perdita di carico attraverso un orificio è la differenza tra P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub> (vedi fig. 1).

Il coefficiente di scarico di un orificio indica il suo rendimento riferito a quello di un orificio ideale che non opponga alcun attrito al passaggio del fluido.

Detto valore può essere compreso tra 0,4 e 1,3 a seconda della forma e dell'angolo di svasatura della faccia esterna dell'orificio.

Orifici od ugelli ben progettati per bruciatori di tipo atmosferico hanno coefficienti di scarico compresi tra 0,8 e 0,85.

La quantità di gas che fluisce attraverso un orificio dipende dall'area dell'orificio stesso, dalla perdita di carico attraverso l'orificio e cioè dalla differenza tra P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub> nonché dal peso specifico del gas. È evi-



dente che quando il gas fluisce attraverso l'ugello, P<sub>3</sub> sarà sempre inferiore a P<sub>1</sub>. La pressione indicata con P<sub>2</sub> è quella corrispondente alla massima restrizione che il gas trova nel suo passaggio attraverso l'ugello. Quando vi sia passaggio di gas è evidente che P<sub>2</sub> sarà sempre inferiore a P<sub>1</sub> e P<sub>3</sub>.

Altri importanti relazioni dipendono dalla equazione relativa agli orifici:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}} \quad \text{Eq. 02}$$

La portata di un fluido attraverso un orificio di una determinata misura varia con il variare della radice quadrata della perdita di carico. Ciò vuol dire per esempio che una variazione da 625 mm a 25 mm H<sub>2</sub>O della pressione P<sub>1</sub> del fluido a monte dell'orificio comporterà una variazione di portata da 5 a 1.

Un rapporto di portata, o potenzialità termica, di un bruciatore da 10 a 1 richiede una variazione di pressione da 100 a 1. Una delle principali ragioni per cui a volte è difficile ottenere dei grandi rapporti di capacità in un bruciatore è spiegata da questa relazione, da cui risulta che per ottenere piccoli rapporti di portata sono necessari grandi rapporti di pressione.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad \text{Eq. 03}$$

La portata di un orificio, a perdita di carico costante, varia in proporzione diretta con il variare dell'area dell'orificio stesso.

Mantenendo costante la pressione  $P_1$  del gas e raddoppiando l'area di un orificio si ottiene esattamente una capacità doppia di quella d'origine. Variazioni più ampie nella portata termica di un bruciatore possono essere più facilmente ottenute variando l'area dell'orificio che non variando la perdita di carico attraverso esso; però ciò comporta problemi meccanici non indifferenti.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} \quad \text{Eq. 04}$$

Mantenendo costanti l'area di un orificio e la perdita di carico attraverso questo ultimo, si potrà avere una variazione nella portata dell'orificio variando la densità del gas.

La portata varia in proporzione inversa alla radice quadrata della variazione di densità. Un orificio avente una capacità di  $2,8 \text{ m}^3$  di gas naturale porterà soltanto  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  di propano, mantenendo costante la perdita di carico attraverso lo stesso orificio.

Le tabelle per la scelta della misura di un orificio, in funzione della perdita di carico e della portata desiderata, sono basate su un coefficiente di scarico  $K = 0,85$ . Le stesse tabelle si riferiscono ad un gas avente una densità di  $0,56$ . Di solito vengono forniti dei fattori di correzione per gas aventi densità differenti. Quando due delle tre variabili relative alla portata di un orificio sono conosciute, è cosa semplice e veloce determinare la terza dimensione dalla tabella delle portate dell'orificio.

## RAPPORTO ARIA-GAS

Uno dei criteri principali che regolano il dimensionamento dei sistemi di combustione industriali è quello per cui è necessario mantenere un rapporto costante tra volumi di aria e di gas nella miscela all'uscita del miscelatore in qualsiasi condizione di portata della miscela. Il rapporto aria-gas è normalmente indicato come percentuale della quantità teorica di aria necessaria per bruciare tutto il gas.

Una miscela al 100% di gas naturale e di aria ha in sé circa  $10 \text{ m}^3$  di aria per ogni metro cubo di gas. Similmente una miscela al 100% di propano e aria contiene  $25 \text{ m}^3$  di aria per ogni metro cubo di propano.

Tutti i miscelatori progettati per l'impiego in impianti di combustione

industriali sono realizzati in modo tale da mantenere costante il rapporto tra aria e gas nell'intero campo di portata degli impianti.

Un sistema di combustione regolato in modo tale da avere 80% di areazione sulla posizione di alto fuoco, manterrà la stessa areazione anche quando la sua portata venga ridotta sino alla posizione di basso fuoco. Se il sistema di combustione non fosse in grado di mantenere costante il rapporto volumetrico dei componenti della miscela in tutto il suo campo di portata, necessariamente accadrebbe che le caratteristiche della fiamma si modificano con il variare della portata. Tali circostanze sono assolutamente da evitare, salvo rarissime eccezioni.

## FLANGE TARATE PER LA REGOLAZIONE DELLA PORTATA

Dato che la portata di un orificio avente una determinata area dipende dalla perdita di carico attraverso l'orificio stesso è facile dedurre che regolando la pressione  $P_1$  (v. Fig. 1) si potrà regolare anche la portata dell'orificio.

Tutti i sistemi di combustione con funzionamento soddisfacente hanno un minimo di tre orifici, ed esattamente: uno per regolare la portata del flusso di aria, uno per regolare la portata del flusso di gas ed uno infine per regolare la portata della miscela dei due.

La fig. 2 mostra due orifici separati, ciascuno avente una differente portata ed una differente perdita di carico (o  $\Delta P$ ). Il collegamento tra i due è indicato schematicamente per semplificare le considerazioni sul principio di funzionamento dei miscelatori.

Le superfici dei due orifici sono calcolate in modo da ottenere le portate e le perdite di carico indicate. Il collegamento tra i due orifici ha la funzione di mettere in relazione la perdita di carico dell'orificio del

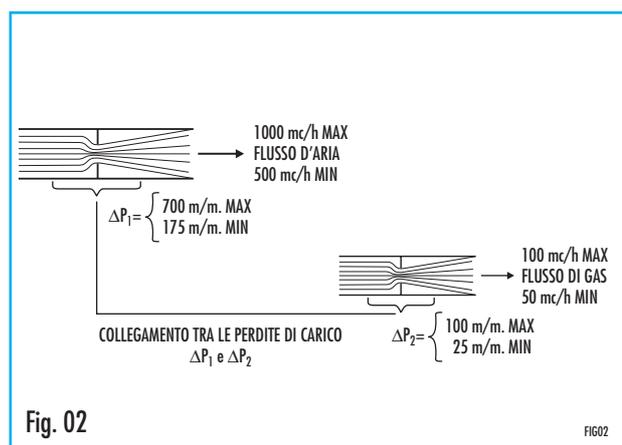


Fig. 02

FIG02

gas ( $\Delta P_2$ ) con la perdita di carico dell'orificio dell'aria ( $\Delta P_1$ ), di modo che le variazioni di pressione dell'uno comportino variazioni

proporzionali nella pressione del secondo.

Una riduzione della perdita di carico ( $\Delta P_1$ ) da 700 mm H<sub>2</sub>O a 175 mm H<sub>2</sub>O (cioè una variazione della pressione da 4 a 1) comporterà una variazione della portata di aria esattamente del 50%. Il collegamento tra i due orifici fa sì che la perdita di carico attraverso l'orificio del gas ( $\Delta P_2$ ) vari parallelamente da 100 mm a 25 mm H<sub>2</sub>O. Ciò comporta una variazione della portata del gas esattamente del 50%. Il campo di variazione nel quale il collegamento tra i due orifici riesce a mantenere costante questa proporzionalità, determina i limiti di portata del sistema di miscelazione detto di tipo proporzionale. Se il sistema è ben proporzionato e ben dimensionato il rapporto tra le portate massime e quelle minime può anche essere superiore a 20/1.

Grazie a questo collegamento tra un orificio e l'altro è possibile mantenere costante il rapporto aria-gas in tutto il campo di potenzialità del sistema di combustione. Questo collegamento è facilmente rever-

sibile in modo da ottenere lo stesso risultato regolando la pressione del gas e di conseguenza quella dell'aria.

I miscelatori di gas e aria di tipo industriale operano esattamente su questo principio e cioè con due orifici tra loro collegati, per mantenere costante il rapporto aria e gas ad ogni valore di portata termica. È evidente che un sistema di combustione può essere costruito in modo tale da variare, sempre con lo stesso meccanismo di collegamento, la sezione dei due orifici mantenendo costanti le perdite di carico attraverso questi ultimi. Con questo sistema si otterrebbero esattamente gli stessi risultati sopra descritti, in accordo con l'equazione 3.

Molti sistemi industriali di miscelazione gas-aria utilizzano quest'ultimo principio, ma dobbiamo far rilevare che regolare la perdita di carico attraverso gli orifici è più facile che non variare le aree degli stessi.

## PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEL VENTURI

L'esigenza del perfetto collegamento tra due orifici (come sopra descritto), forma la base di calcolo dei miscelatori gas-aria. Questo collegamento è in pratica fisso ma per comodità di dimostrazione è qui indicato come se fosse una parte mobile del miscelatore. In realtà esso fa parte del corpo del miscelatore ed è situato nell'interno di quest'ultimo.

Il flusso di gas attraverso l'orificio in fig. 1 è approssimativamente indicato dalle linee sottili. Per ridurre le turbolenze nel punto in cui il gas si avvicina all'orificio e nel punto in cui esso se ne distacca, la forma interna dell'orificio è di solito studiata e realizzata in modo da seguire lo stesso andamento del fluido che passa in esso. Ciò permette di ottenere condizioni di funzionamento decisamente soddisfacenti.

Il principio di funzionamento di un miscelatore venturi è valido sia per i sistemi di combustione ad aria aspirata (o atmosferici), dove il gas passa attraverso l'orificio nel punto A (fig. 4) trascinandosi l'a-

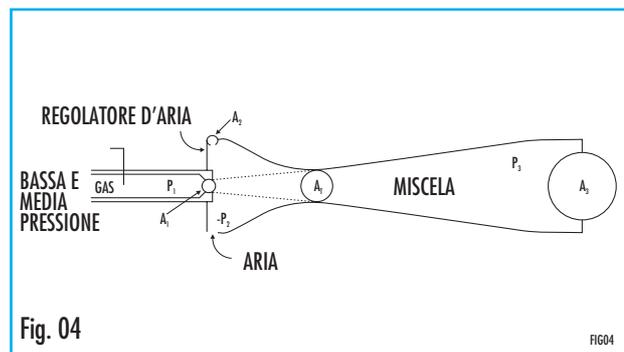


Fig. 04

FIG04

ria, sia per quelli ad aria ventilata (o forzata) in cui l'aria in pressione fluisce attraverso l'orificio e si trascina il gas. Il principio di funzionamento del venturi è più facilmente spiegabile facendo riferimento alle principali pressioni in gioco:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  (fig. 3).

Come abbiamo precedentemente detto, al passaggio di gas attraverso l'orificio  $A_1$ , si verifica una perdita di carico attraverso lo stesso in modo che  $P_1$  risulta maggiore di  $P_3$ , mentre  $P_2$  risulta sempre inferiore a questi due. Il valore  $P_2$  è determinato dalla forma del venturi e dal valore della perdita di carico da  $P_1$  a  $P_3$ . I comuni miscelatori gas-aria che operano su questo principio sono calcolati in modo tale da ottenere un  $P_2$  sempre negativo, cioè avente un valore inferiore a quello della pressione atmosferica. Il funzionamento del miscelatore è governato dalla variazione dei valori delle tre pressioni.

NOTA - La valvola indicata nella fig. 3 sul condotto della miscela del gas ha uno scopo puramente didattico ma in pratica non viene quasi mai impiegata in impianti ed è anzi di solito sconsigliata od addirittura proibita.

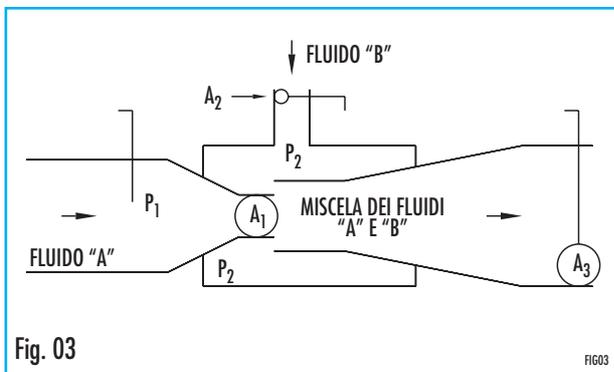


Fig. 03

FIG03

Supponendo di mantenere fissa l'area  $A_3$  e completamente aperta la valvola di ammissione nella posizione "fluido A" si avrà attraverso l'orificio  $A_1$  la massima portata ed un determinato valore della pressione  $P_3$  e di quella negativa  $P_2$ .

Tabella 1

$P_1$ mm H <sub>2</sub> O	$P_2$ mm H <sub>2</sub> O	$P_3$ mm H <sub>2</sub> O
+ 700	- 100	+ 250
+ 350	- 50	+ 125
+ 175	- 25	+ 62,5
+ 87,5	- 12,5	+ 31,25

La tabella 1 indica la variazione delle tre pressioni quando si moduli la posizione della valvola sul condotto di immissione del "fluido A". Si noterà che le pressioni  $P_2$  e  $P_3$  variano in proporzione diretta alla variazione della pressione  $P_1$ .

Regolando la pressione di immissione del "fluido B" attraverso l'orificio  $A_2$  esattamente a zero, e cioè al valore della pressione atmosferica, la perdita di carico attraverso l'orificio  $A_2$  corrisponde alla pressione negativa che si leggerà in  $P_2$ . Nella tabella sopra indicata, la perdita di carico attraverso  $A_2$ , corrispondente ad una pressione  $P_1$  di 700 mm H<sub>2</sub>O, è di 100 mm H<sub>2</sub>O. Pertanto attraverso i due orifici  $A_1$  e  $A_2$  si avranno perdite di carico tra loro direttamente proporzionali avendo una variazione solo della pressione  $P_1$ .

Tabella 2

$P_1$ mm H <sub>2</sub> O	$\Delta P$ attraverso $A_1$ mm H <sub>2</sub> O	$\Delta P$ attraverso $A_2$ mm H <sub>2</sub> O	Portata del fluido A Nm <sup>3</sup> /h	Portata del fluido B Nm <sup>3</sup> /h
700	800	100	1000	100
350	400	50	710	71
175	200	25	500	50

La tabella 2 indica come queste due perdite di carico variano in funzione della pressione  $P_1$ .

Essendo le perdite di carico attraverso i due orifici direttamente proporzionali si avrà, secondo l'equazione 2, che anche le portate attraverso gli stessi orifici saranno pure proporzionali tra loro. Osservando le ultime due colonne a destra della tabella si noti come al variare delle pressioni il rapporto di portata tra i due fluidi rimane costante (da 10 a 1) durante tutto il campo di variazione delle pressioni. Il collegamento precedentemente descritto e indicato nella fig. 2, è qui posto direttamente in evidenza. Questo collegamento è in pratica il

risultato della forma interna e della precisione meccanica di esecuzione del miscelatore, nonché dell'esatto collocamento dei due orifici  $A_1$  e  $A_2$ .

In pratica, la pressione del "fluido B" all'ingresso dell'orificio  $A_2$  può essere mantenuta al valore della pressione atmosferica in due modi diversi:

- nei sistemi ad aria aspirata (essendo prelevata dall'ambiente l'aria è a pressione atmosferica);
- nei sistemi ad aria ventilata nei quali si utilizza un regolatore di pressione atmosferico o "Zero Governor" per ridurre la pressione del gas aspirato al valore di zero.

Un'analisi dello squilibrio delle pressioni che può crearsi nel miscelatore nei punti  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  può dare maggiori chiarimenti sul principio di funzionamento del venturi.

Una variazione della pressione  $P_3$  può essere ottenuta variando la sezione di  $A_3$  e mantenendo costanti la pressione  $P_1$  e le aree di  $A_1$  e  $A_2$ . Qualsiasi variazione al valore della pressione  $P_3$  che non sia il risultato della variazione della pressione  $P_1$ , modificherà la perdita di carico tra  $P_1$  e  $P_3$ . Come precedentemente accennato, è il valore di detta perdita di carico che determina l'entità della pressione negativa  $P_2$ .

Diminuendo la perdita di carico (cioè la differenza di pressione) tra  $P_1$  e  $P_3$  diminuirà in proporzione la pressione negativa  $P_2$  e viceversa, aumentando la perdita di carico tra  $P_1$  e  $P_3$  si aumenterà il valore negativo della pressione  $P_2$ .

La tabella 3 mostra in che misura variano le pressioni  $P_2$  e  $P_3$  chiudendo lentamente la valvola nella posizione  $P_3$  in modo da ridurre la sezione libera di  $A_3$ .

Le variazioni di pressioni indicate non sono esattamente quelle che si possono ottenere in pratica in un sistema di miscelazione, ma sono egualmente indicative.

L'importanza della tabella 3 è quella di mostrare l'andamento delle variazioni delle pressioni che determinano un effetto indesiderabile sul sistema di miscelazione. Si noti che le variazioni delle pressioni  $P_2$ , risultanti a loro volta dalla variazione delle pressioni  $P_3$ , non sono proporzionali alle variazioni di  $P_3$ .

Tabella 3

$P_1$ mm H <sub>2</sub> O	$P_2$ mm H <sub>2</sub> O	$P_3$ mm H <sub>2</sub> O	Sezione di $A_3$
+ 700	- 100	+ 250	Diminuisce ↓
+ 700	- 75	+ 280	
+ 700	- 25	+ 300	
+ 700	- 12,5	+ 350	
+ 700	+ 12,5	+ 380	

Quando la pressione  $P_3$  aumenta oltre il punto critico, la pressione  $P_2$  diviene in realtà positiva. In queste condizioni il gas che fluisce dall'orificio  $A_1$  uscirà anche dall'orificio  $A_2$ .

In impianti di combustione a premiscelazione o ad aria forzata dove il fluido che fluisce attraverso  $A_1$  è rappresentato da aria, avviene che in tale condizione di esercizio l'aria anziché aspirare il gas dall'orificio  $A_2$  uscirà dal medesimo orificio per insinuarsi nel regolatore atmosferico che si trova a monte.

Dato che i regolatori atmosferici sono fatti in modo da permettere il passaggio del flusso in una sola direzione, avviene che tali anormali condizioni provocheranno la chiusura del regolatore atmosferico e di conseguenza impediranno il passaggio dell'aria comburente al sistema di miscelazione. Per gli stessi motivi verrà interrotto anche il flusso di gas.

Aperto gradualmente la valvola  $A_3$ , la pressione  $P_3$  diminuirà e il valore negativo della pressione  $P_2$  aumenterà. Ciò è indicato alla tabella 4.

Anche qui i valori delle variazioni delle pressioni sono puramente indicativi, il fenomeno più importante è sempre rappresentato dall'andamento delle variazioni di tali pressioni.

Variazioni di pressioni analoghe potranno essere verificate su un sistema venturi variando l'area  $A_1$ . Aumentando l'area  $A_1$  e mantenendo costanti le condizioni di pressione del "fluido A" in  $P_1$  e di pressione atmosferica all'ingresso del "fluido B", nonché lasciando invariata l'area  $A_3$ , automaticamente si aumenterà la pressione  $P_3$ .

Tabella 4

$P_1$ mm H <sub>2</sub> O	$P_2$ mm H <sub>2</sub> O	$P_3$ mm H <sub>2</sub> O	Sezione di $A_3$
+ 700	- 100	+ 250	Aumenta ↓
+ 700	- 150	+ 200	
+ 700	- 250	+ 100	

Tale variazione è determinata dall'aumento della portata del fluido passante attraverso la sezione costante  $A_3$ . Qualsiasi variazione al valore della pressione  $P_3$  comporta immediatamente una variazione della pressione negativa  $P_2$ .

Se l'area  $A_1$  viene aumentata oltre una certa misura e di conseguenza  $P_3$  supera certi limiti, la pressione  $P_2$  diventa positiva. Tali condizioni sono esattamente le stesse di quelle che si sarebbero ottenute diminuendo la sezione  $A_3$  e mantenendo costante la sezione  $A_1$ . Analogamente riducendo la sezione  $A_1$  al di sotto del valore iniziale si diminuirà la pressione  $P_3$  e automaticamente aumenterà il valore negativo della pressione  $P_2$ .

In pratica condizioni ideali di pressione negativa  $P_2$  corrispondenti alla massima pressione ottenibile  $P_3$  ed a una determinata sezione  $A_3$ , possono essere ottenute con una sola ben determinata sezione dell'orificio  $A_1$ .

Operando a pressioni di  $P_3$  prossime a quelle limite, con un minimo di pressione negativa  $P_2$  si può andare incontro a difficoltà, dato che una piccolissima variazione della sezione  $A_3$ , per esempio dovuta ad accumulo di sporcizia, modificherebbe la portata dell'orificio  $A_2$  con una conseguente variazione del rapporto aria-gas.

Per i miscelatori che utilizzano basse pressioni di aria, i costruttori stabiliscono una massima pressione di esercizio di miscela  $P_3$  per una determinata pressione di alimentazione  $P_1$ . Queste pressioni massime di  $P_3$  indicate dai costruttori sono il risultato dell'esperienza di molti anni e, per ottenere soddisfacenti condizioni di pressione negativa  $P_2$ , si raccomanda che esse non vengano mai superate. I miscelatori di tipo atmosferico (o ad aria aspirata) sono invariabilmente progettati per alimentare una determinata sezione libera ai bruciatori (equivalente alla sezione  $A_3$ ) e sono di solito venduti come unità monoblocco. Bruciatori di questo tipo sono rappresentati dai complessi a piastra, ad anello, a tubo forato e a torcia singola.

In questi tipi di bruciatori la sezione libera dei bruciatori è predeterminata in modo da ottenere condizioni ideali di funzionamento.