

14.1 Generalità

Il calore necessario a soddisfare il fabbisogno di energia richiesta per la climatizzazione invernale e/o per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari è prodotto dal **generatore di calore**, comunemente chiamato **caldaia**. Le tipologie sono le più diverse ma tutte hanno alcune parti comuni. Infatti, una caldaia è costituita da una camera di combustione, alloggiata nel *focolare*, dove si realizza il processo di combustione in virtù del quale si ha la produzione di calore (sviluppato bruciando un combustibile) che viene trasferito e immagazzinato dal fluido termovettore attraverso le superfici di scambio di cui è dotato il generatore. Seguono poi l'impianto di alimentazione del combustibile, il camino, gli apparecchi di regolazione, di controllo e di sicurezza. Il tutto è racchiuso dal *mantello*, cioè un involucro che avvolge tutto il corpo caldaia. Il mantello è costituito da una lamiera e da materiale coibente avente lo scopo di limitare le perdite di calore verso l'esterno e migliorare quindi il rendimento della macchina. La fiamma di combustione è prodotta dal *bruciatore* che, unitamente alla caldaia, forma il *gruppo termico*.

14.2 Grandezze caratteristiche

I generatori di calore sono caratterizzati da diverse grandezze e parametri i cui valori vengono specificati sui depliant delle case costruttrici.

Una caldaia, durante il suo normale funzionamento, sviluppa una certa quantità di calore che, per la realtà del fenomeno, non viene e non può essere trasferita totalmente al fluido termovettore. Infatti, bisogna tenere conto delle perdite di energia legate a varie cause (Fig. 14.1):

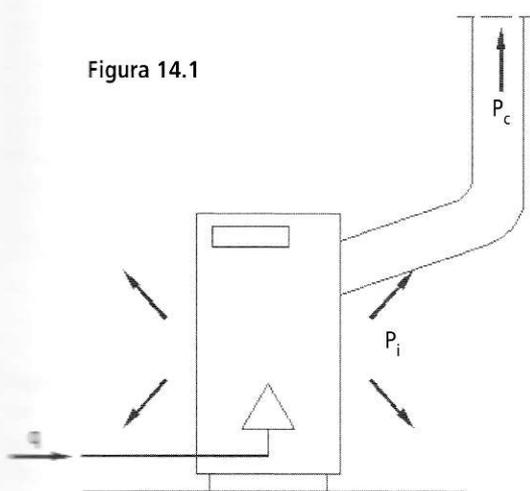
- perdite di calore per incompleta combustione;
- perdite per irraggiamento (P_i) attraverso il mantello;
- perdite di calore sensibile al camino (nei fumi) (P_c).

Le grandezze di cui tenere conto e delle quali si danno qui di seguito le definizioni sono:

- **potenza termica al focolare P_f** : è la quantità di calore fornito, nell'unità di tempo, dal combustibile effettivamente utilizzato.

Indicando con q la portata di combustibile consumato (nel caso del metano ci si deve riferire alle condizioni

Figura 14.1



standard: 15 °C; 1013 mbar) e con H_i il suo potere calorifico inferiore, tale grandezza si ottiene dal prodotto fra la portata e il potere calorifico del combustibile:

$$P_f = q \cdot H_i \left[\frac{\text{stm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{stm}^3} = \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right] \quad (14.1)$$

- **potenza resa al fluido termovettore.** è data dalla differenza fra la potenza al focolare P_f e la potenza dispersa attraverso il mantello P_i e al camino P_c :

$$P_r = P_f - P_c - P_i = P_f - (P_c + P_i)$$

- **potenza termica nominale:** è dichiarata dal costruttore del generatore e rappresenta la potenza fornita dall'apparecchio in regime di funzionamento continuativo;
- **potenza termica utile nominale:** è dichiarata dal costruttore e rappresenta la potenza resa al fluido termovettore;
- **potenza termica convenzionale:** è data dalla differenza fra la potenza al focolare e la potenza dispersa al camino attraverso i fumi:

$$P_{conv} = P_f - P_c$$

- **rendimento termico utile:** è dato dal rapporto fra la potenza resa P_r e la potenza al focolare P_f :

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} = \frac{P_f - (P_c + P_i)}{P_f} = 1 - \frac{(P_c + P_i)}{P_f} \quad (14.2)$$

- **rendimento di combustione:** è dato dal rapporto fra la potenza convenzionale P_{conv} e la potenza al focolare P_f :

$$\eta = \frac{P_{conv}}{P_f} = \frac{P_f - P_c}{P_f} = 1 - \frac{P_c}{P_f}$$

ESERCIZIO

- Un generatore di calore ha, per determinate condizioni di esercizio, un rendimento termico utile dell'85% e consuma 1,5 stm³/h di gas naturale ($H_i = 8250$ kcal/stm³). Calcolare la potenza al focolare e la potenza resa.

Soluzione

Dalla (14.1) si ottiene:

$$P_f = q \cdot H_i = 1,5 \cdot 8250 = 12375 \text{ [kcal h}^{-1}\text{]} \cong 14,40 \text{ [kW]}$$

Per determinare invece la potenza resa, si applica la (14.2):

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \Rightarrow P_r = \eta P_f = 0,85 \cdot 14,40 = 12,22 \text{ [kW]}$$

14.3 Criteri di classificazione

I generatori di calore si possono classificare in base a diverse caratteristiche riguardanti, per esempio:

- il tipo di installazione;
- il tipo di combustibile impiegato;

- il tipo di fluido termovettore;
- il materiale di costruzione;
- la pressione nella camera di combustione;
- la temperatura dei fumi.

Con riferimento al **tipo di installazione** si hanno le **caldaie murali** o **pensili** e **quelle a basamento**. I generatori murali hanno una potenzialità normalmente inferiore a 35 kW e trovano impiego negli edifici residenziali sia come sistemi per la produzione del calore necessario alla climatizzazione invernale che per produrre H₂O sanitaria (**caldaie combinate**). Si installano a parete, in locali idonei, all'interno o all'esterno (per esempio, sul balcone) della generica unità immobiliare. Quelle a basamento, sono invece poggiate sul pavimento e sistemate in apposito locale il quale, se la potenzialità della caldaia è superiore a 35 kW, deve avere determinati requisiti essendo classificato come centrale termica.

A seconda del **combustibile** impiegato, si hanno ovviamente, **caldaie a combustibile solido** (legna, coke, carbone, pellets ecc.), **liquido** (gasolio, nafta, olio combustibile, biodiesel ecc.) e **gassoso** (metano, GPL ecc.).

In merito al **tipo di fluido termovettore** vale quanto detto a proposito della classificazione degli impianti.

In base al **materiale di costruzione** i generatori sono classificabili in **caldaie in ghisa** e **caldaie in acciaio**. Le prime, impiegate per piccole e medie potenzialità, hanno il corpo caldaia costituito da elementi componibili in ghisa, collegati sia nella parte inferiore che superiore da nipples e tiranti a vite, assemblati sul posto (nella CT). Gli elementi di testa e di coda sono diversi da quelli intermedi perché i primi presentano l'apertura per l'introduzione del combustibile e dell'aria necessaria ad attivare il processo di combustione; nei secondi si trova invece il foro di uscita dei fumi da avviare al camino. Le caldaie in acciaio sono costruite e assemblate direttamente in fabbrica; presentano una camera di combustione di forma cilindrica e un fascio tubiero all'interno del quale circolano i fumi di combustione (a tubi di fumo) che, prima di essere scaricati, cioè avviati al camino, cedono calore all'acqua da riscaldare che si trova all'esterno del fascio suddetto.

Prendendo come parametro la **pressione in camera di combustione**, si hanno **caldaie in depressione** e **caldaie pressurizzate**, a seconda che la pressione sia inferiore o superiore a quella atmosferica. Nei generatori con camera di combustione in depressione, quest'ultima è dovuta al tiraggio della canna fumaria (Fig. 14.2). Nei generatori di tipo pressurizzato, la camera di combustione è in sovrappressione rispetto alla pressione dell'ambiente esterno per effetto di un ventilatore di cui è dotato il bruciatore che aspira aria esterna e la soffia all'interno migliorando così lo smaltimento dei fumi e lo scambio termico fumi-fluido termovettore. Per avere un'idea di come migliorano le prestazioni del generatore, basti pensare che il carico termico specifico di una caldaia in depressione oscilla fra 12 e 15 kW m⁻² contro 35-50 kW m⁻² delle caldaie pressurizzate. La caldaia pressurizzata presenta, fra l'altro, l'inconveniente di essere piuttosto rumorosa durante il funzionamento per cui, per un suo utilizzo, si rendono necessarie delle opere di insonorizzazione di alcuni suoi componenti (cuffie sui bruciatori, silenziatori sull'espulsione dei fumi ecc.).

Per quanto riguarda la **temperatura dei fumi** si hanno:

- **caldaie a temperatura scorrevole;**
- **caldaie a condensazione.**

Della caldaia a condensazione si parlerà in modo dettagliato successivamente. La caldaia a temperatura scorrevole è nata per risolvere un problema rilevante che può essere posto nei seguenti termini: in generale le caldaie, e in particolar modo quelle alimentate con combustibile liquido, devono funzionare a temperatura elevata allo scopo

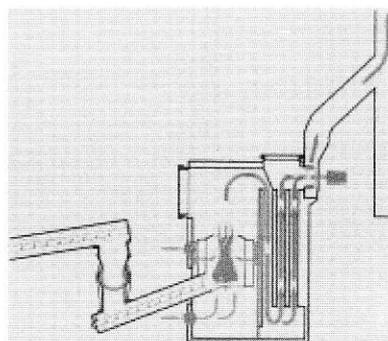


Figura 14.2

di evitare che i prodotti di combustione, venendo a contatto con superfici a temperatura più basse della loro temperatura di rugiada, diano origine a condense acide e quindi a corrosioni che limiterebbero di molto la vita del generatore. Per contro, però, è anche necessario che la temperatura del fluido termovettore, possa variare a seconda del carico termico e, in particolare, sia ridotta man mano che la richiesta di energia termica diminuisce per effetto di un aumento della temperatura esterna. Le caldaie a temperatura scorrevole sono realizzate in modo che la temperatura dell'acqua di riscaldamento si possa ridurre dal valore di mandata (75-80 °C) fino a circa 40 °C senza che si verifichi il pericolo di corrosione in quanto, ricorrendo a diverse soluzioni costruttive, i fumi vengono mantenuti sempre al di sopra della temperatura di rugiada.

14.4 La caldaia murale

La caldaia murale, introdotta circa 35 anni fa, è molto diffusa nel nostro paese. Al suo grande successo hanno contribuito numerosi fattori, tra i quali:

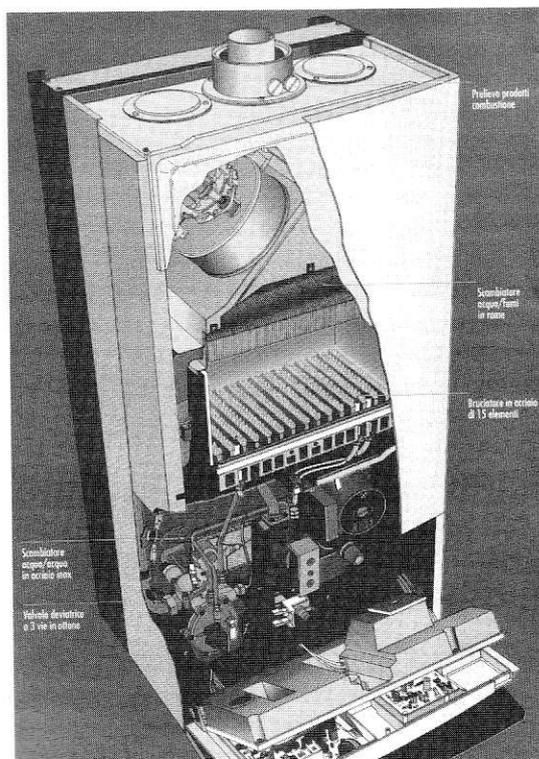
- dimensioni contenute;
- semplicità di installazione;
- diffusione degli impianti unifamiliari nel settore del riscaldamento delle abitazioni;
- sviluppo della metanizzazione.

Oggi, alla luce delle nuove direttive in materia di risparmio energetico, la classica caldaietta murale comincia a cedere il passo a nuovi sistemi dei quali si parlerà nei paragrafi e/o capitoli successivi.

Struttura e composizione

Una **caldaia murale** è essenzialmente costituita da un mantello di lamiera, isolato, che racchiude tutti gli elementi e i dispositivi necessari al suo funzionamento, alla regolazione e, non ultimo, alla sicurezza. All'interno del mantello, in pratica, sono alloggiati

Figura 14.3



gli stessi componenti e dispositivi che compongono una centrale termica al servizio di un impianto condominiale. Si trovano infatti il bruciatore, lo scambiatore di calore primario per produrre l'acqua da far circolare nel circuito di riscaldamento degli ambienti, il vaso di espansione, il circolatore, lo scambiatore di calore per produrre acqua sanitaria (se la caldaia è di tipo misto), il sistema di regolazione della temperatura, i dispositivi di controllo, di protezione e di sicurezza.

Il **bruciatore del gas** è composto da una serie di rampe munite di forellini dai quali esce la miscela gasaria su comando di un termostato che ne modula la fiamma in funzione della temperatura dell'acqua di riscaldamento e sanitaria. L'accensione della miscela gasaria si ottiene mediante una fiamma pilota oppure tramite un sistema di accensione automatico a controllo di fiamma elettronico. Lo spegnimento del bruciatore è dovuto all'azione di un termostato.

Lo **scambiatore di calore principale** è del tipo a serpentina con tubi alettati allo scopo di migliorare la sottrazione di calore ai fumi prima di scaricarli all'esterno. Le caldaie murali di tipo combinato hanno un ulteriore scambiatore di calore a piastre o a serpentina per produrre l'acqua sanitaria. Il sistema è organizzato in modo che la richiesta di a.c.s abbia la precedenza sul riscaldamento. In pratica, alla richiesta di acqua calda da parte dell'e-

tenza, una valvola deviatrice a tre vie, comandata da un flussostato, chiude il circuito del riscaldamento e apre quello dell'acqua calda, deviando il fluido termovettore riscaldato dallo scambiatore primario verso lo **scambiatore secondario** dove cede il calore all'acqua proveniente dalla rete idrica.

Questo modo di concepire il sistema, permette di avere potenze contenute in quanto, la potenza necessaria non è la somma di quella che occorre per il riscaldamento (4000-5000 kcal h⁻¹) e di quella per l'a.c.s. (18 000-20 000 kcal h⁻¹) ma soltanto la maggiore delle due.

Il **vaso di espansione**, a forma piatta per facilitare il suo inserimento nel mantello, necessario per contenere l'aumento di volume dell'acqua per effetto del suo riscaldamento, è del tipo chiuso a membrana.

Il **circolatore**, a cui è affidato il compito di creare la differenza di pressione per movimentare il fluido termovettore, è di *tipo centrifugo* con una portata che non supera i 2,00-2,50 m³ h⁻¹ e una prevalenza piuttosto contenuta.

Il **sistema di regolazione della temperatura** viene comandato da un termostato o da un cronotermostato che, in base alle vigenti normative, deve essere programmabile su almeno due livelli di temperatura nell'arco delle 24 ore. I dispositivi di sicurezza e di controllo rendono tali caldaie molto affidabili sia sul lato acqua che sul lato fuoco. Sul lato acqua c'è un termostato limite di sicurezza che controlla eventuali surriscaldamenti dell'acqua stessa interrompendo l'afflusso del gas al bruciatore. Un flussostato chiude il gas qualora vi sia mancanza di acqua o portata insufficiente. Nel caso in cui, per un qualunque motivo, si verifichi un aumento anomalo della pressione di esercizio, interviene la valvola di sicurezza che consente di scaricare all'esterno, parte dell'acqua dell'impianto. Oltre ai suddetti dispositivi, la caldaia è corredata di strumenti di controllo quali manometro o idrometro (se la scala è graduata in mH₂O) e termometro per la temperatura.

Funzionamento

In una caldaia murale si distinguono sempre due circuiti: il **circuito del gas e quello dell'acqua** (riscaldamento e sanitario). La figura 14.4 indica che il gas entra all'interno del generatore attraverso il rubinetto di intercettazione e affluisce alla valvola del gas 14 la cui funzione è quella di modulare la quantità di combustibile e quindi la fiamma al bruciatore 17 a seconda del valore di temperatura dell'acqua di mandata, impostato sul pannello di regolazione 33.

L'azionamento della valvola del gas dipende da un circuito elettronico 34 di accensione che elabora i segnali e quindi le informazioni provenienti da diversi dispositivi:

- termostato di sicurezza di controllo fumi 36;
- termostato di sicurezza 3 di massima temperatura in uscita dallo scambiatore primario 1;
- elettrodo di accensione 20.

Se uno solo dei suddetti dispositivi segnala qualche anomalia di funzionamento che potrebbe compromettere la sicurezza degli utenti, la valvola intercetta il gas e il bruciatore si spegne. Il gas all'uscita dalla valvola arriva al bruciatore 17 di tipo atmosferico dove, per effetto Venturi, tramite l'ugello 24, si miscela con l'aria comburente necessaria alla combustione che si realizza nell'apposita camera in cui è presente lo scambiatore primario che trasferisce il calore prodotto al fluido termovettore.

Relativamente al circuito acqua, si supponga che la caldaia stia funzionando in riscaldamento degli ambienti. All'uscita dal terminale del calore, l'acqua, movimentata dal circolatore 2, entra in caldaia dove è riscaldata nello scambiatore secondario dall'acqua calda proveniente da quello primario. Sul tubo di ritorno è collegato il vaso di espansione 15, del tipo a membrana, necessario a contenere l'aumento di volume dell'acqua in seguito al suo riscaldamento. Sullo stesso tubo che porta l'acqua al primario, è installato un flussostato per il riscaldamento 11 che controlla la velocità dell'acqua. Per velocità nulla o insufficiente il bruciatore si spegne. Tra il tubo di mandata e

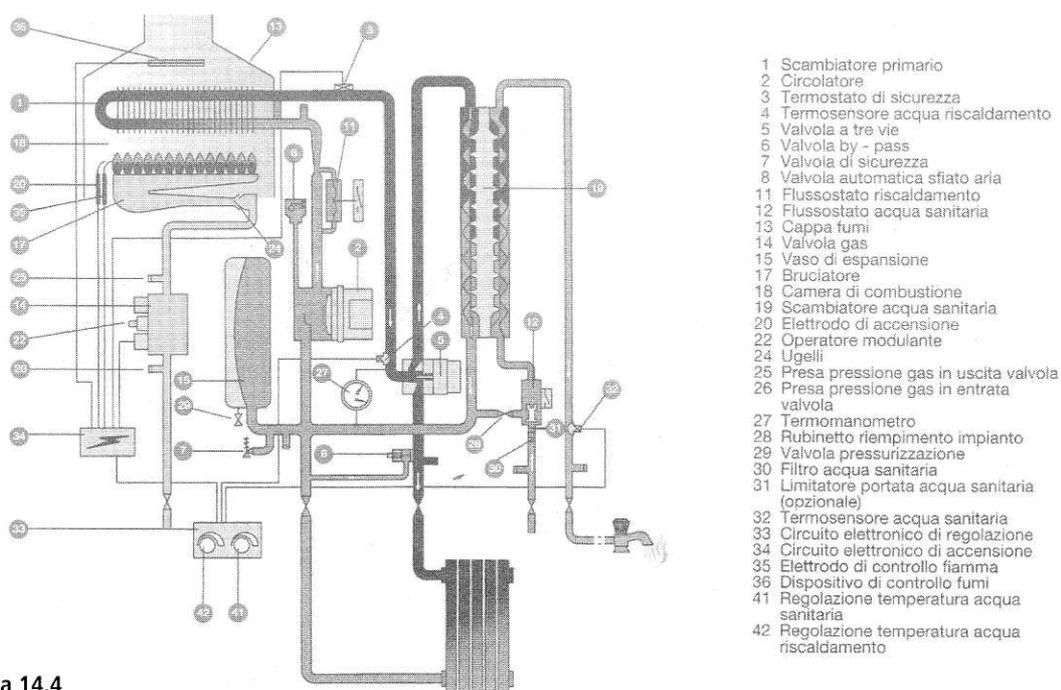
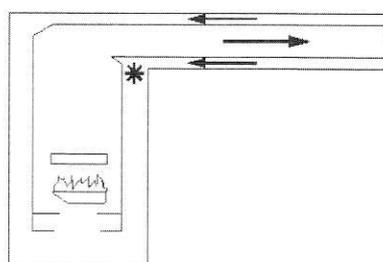
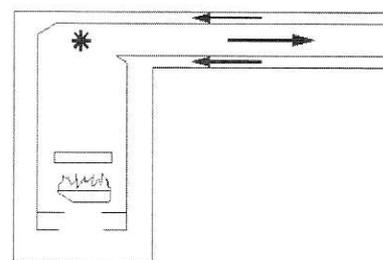


Figura 14.4

quello di ritorno, specie se nel circuito di riscaldamento sono presenti delle valvole termostatiche, è installata una valvola differenziale di by-pass 6, che ha il compito di consentire la circolazione dell'acqua in caldaia anche se i terminali di erogazione del calore sono intercettati. Seguendo il percorso dell'acqua calda all'uscita dallo scambiatore primario 1 si osserva che essa arriva ad una valvola a tre vie 5. Se ad un certo punto, l'utente richiede a.c.s., il flussostato 12 del sanitario, avverte tale richiesta ed aziona la valvola a tre vie deviatrice che chiude il riscaldamento ed apre la via che collega lo scambiatore primario al secondario 19 dove, in controcorrente, arriva l'acqua da riscaldare proveniente dalla rete idrica. Il termosensore 32 che si trova sul tubo in uscita del sanitario consente il mantenimento della temperatura impostata mediante l'apposita manopola 41 posta sul pannello di regolazione 33.



Camera di combustione
in pressione
(il ventilatore agisce sull'aria)



Camera di combustione
in depressione
(il ventilatore agisce sui fumi)

Figura 14.5

Caldaia murale a flusso bilanciato

La **caldaia a flusso bilanciato**, detta anche a **circuito stagno** o di **tipo C**, ha la camera di combustione isolata rispetto all'ambiente nel quale è installata. Questo significa che il processo di combustione è indipendente dalle condizioni di ventilazione dell'ambiente in cui si trova la caldaia.

In base alla figura 14.5 la caldaia ha due tubi coassiali; attraverso uno dei due entra l'aria necessaria al processo di combustione dall'altro, vengono espulsi i prodotti della combustione. All'interno della camera di combustione si trova un ventilatore che, a seconda della sua ubicazione, può agire sui fumi o sull'aria. La soluzione da preferire è evidentemente quella del ventilatore che agisce sui fumi perché in questo modo, la camera di combustione è in depressione rispetto all'ambiente. Se, invece, il ventilatore agisce sull'aria fresca, è necessario avere una camera assolutamente stagna in modo che venga impedita un'eventuale diffusione dei prodotti di combustione nell'ambiente per difetti di tenuta della camera.

Criteri di installazione e designazione

Le caldaie murali possono essere di tre tipi:

- **tipo A**: a camera aperta senza condotto di evacuazione;
- **tipo B**: a camera aperta con condotto di evacuazione;
- **tipo C**: a camera stagna con condotto di evacuazione.

Gli **apparecchi di tipo A** sono di piccola potenzialità e hanno la camera di combustione in comunicazione con l'ambiente in cui sono installati; pertanto ne consumano l'ossigeno. Devono essere muniti di dispositivo di sicurezza per l'accensione contro lo spegnimento e di controllo dell'atmosfera ambiente. I prodotti della combustione devono essere evacuati dall'ambiente per mezzo di aperture verso l'esterno.

In merito ai criteri di installazione si ricordano:

- il volume del locale deve essere superiore a 12 m³;
- indipendentemente dal volume del locale, nel caso siano presenti più apparecchi la loro portata termica complessiva non deve superare 15 kW;
- il rapporto fra il volume del locale e la portata termica dell'apparecchio installato non deve essere inferiore a 1,5 m³ kW⁻¹;
- non si possono installare in nessun caso in bagno;
- non si possono installare in nessun caso in camera da letto.

Per quanto riguarda la **tipologia B**, è necessario il collegamento a un condotto di evacuazione dei fumi anche se, per essi, come nel caso precedente, deve essere prevista un'apertura di aerazione in quanto l'aria comburente è prelevata direttamente dall'ambiente dove è installato l'apparecchio.

La designazione di tali apparecchi è fatta con la lettera B seguita dalle cifre 1, 2, 3 non sempre tutte e tre presenti. La prima cifra (1) indica che l'apparecchio è previsto per essere collegato a un condotto di evacuazione. La seconda cifra indica che l'apparecchio è a tiraggio naturale (1) o che il ventilatore di cui è eventualmente dotato se l'apparecchio è a tiraggio forzato è posto a valle della camera di combustione (2) oppure a monte (3) della stessa. La terza cifra (1-2) indica la presenza o meno del dispositivo rompitruggio-antivento.

ESEMPIO

- Un apparecchio designato secondo la sigla B122 significa che si è in presenza di una caldaia di tipo B che deve essere collegata a un condotto di evacuazione dei fumi, dotata di ventilatore a valle della camera di combustione senza dispositivo rompitruggio-antivento.

In merito ai **criteri da adottare per una corretta installazione**, bisogna innanzi tutto assicurare una sufficiente aerazione che può essere sia di tipo diretto che indiretto. Nel primo caso, su una parete del locale dove deve essere installato l'apparecchio, bisogna praticare un'apertura pari a 6 cm^2 per ogni kW di potenza installata e, comunque, mai inferiore a 100 cm^2 . Se non è possibile l'aerazione diretta è consentito ricorrere a quella indiretta, con prelievo dell'aria comburente da un locale attiguo a quello in cui è installato l'apparecchio, attraverso un'adeguata apertura praticata nella parte bassa della porta. Tale soluzione è permessa solo se sono soddisfatte certe condizioni quali:

- il locale attiguo non è adibito a camera da letto;
- il locale attiguo è dotato di ventilazione diretta;
- il locale attiguo non è una parte comune dell'immobile e non è un ambiente con pericolo di incendio.

Ferme restando le condizioni suddette, le caldaie di tipo B si possono installare in tutti i locali come sostituzione, esclusi bagni e camere da letto; si possono installare all'esterno o in locali tecnici adeguati. Gli scaldabagni di tipo B, invece, si possono installare in bagno se il locale ha un volume superiore a 20 m^3 , oppure se il rapporto fra volume e portata termica è superiore a $1,5 \text{ m}^3$ per ogni kW oppure in tutti gli altri locali escluse le camere da letto.

Gli **apparecchi di tipo C**, sono apparecchi nei quali il circuito di combustione (presa dell'aria comburente, camera di combustione, scambiatore, evacuazione dei prodotti di combustione) è stagno rispetto al locale in cui sono installati.

Per quanto riguarda la **designazione di tali apparecchi**, è costituita dalla lettera C seguita da tre cifre da 1 a 3. La prima cifra (1-2-3) indica il diverso modo in cui avviene il prelievo dell'aria comburente e l'evacuazione dei fumi. La seconda cifra (1) indica che si tratta di un apparecchio a tiraggio naturale, oppure (2) con ventilatore a valle della camera di combustione, oppure (3) con ventilatore a monte della camera di combustione.

ESEMPIO

- Per apparecchio C22 si intende un apparecchio di tipo C (camera stagna) collegato a canne fumarie doppie o coassiali con ventilatore a valle della camera di combustione.

Per quanto riguarda i locali in cui tali apparecchi possono essere installati non ci sono particolari vincoli anche se bisogna assicurare una certa aerazione.

14.5 La caldaia a condensazione

La **caldaia a condensazione**, alla luce delle nuove direttive in materia di risparmio energetico, ha ormai assunto un ruolo molto importante nelle applicazioni impiantistiche.

Il principio di funzionamento è molto semplice: si recupera una parte del calore latente di condensazione contenuto nei prodotti di combustione prima che gli stessi vengano scaricati all'esterno. Concettualmente le cose sono molto semplici quindi, ma per capire le caratteristiche di funzionamento e i motivi per i quali la caldaia a condensazione trova impiego solo in determinati tipi di impianto è opportuno fornire alcune delucidazioni.

Gli stati di aggregazione dell'acqua

Una qualunque sostanza, a seconda dei valori di pressione e temperatura a cui si trova, può presentarsi in tre diversi stati di aggregazione: solido, liquido e gassoso. L'esempio più comune e immediato è quello dell'acqua che, alla pressione atmosferica di $101,30$

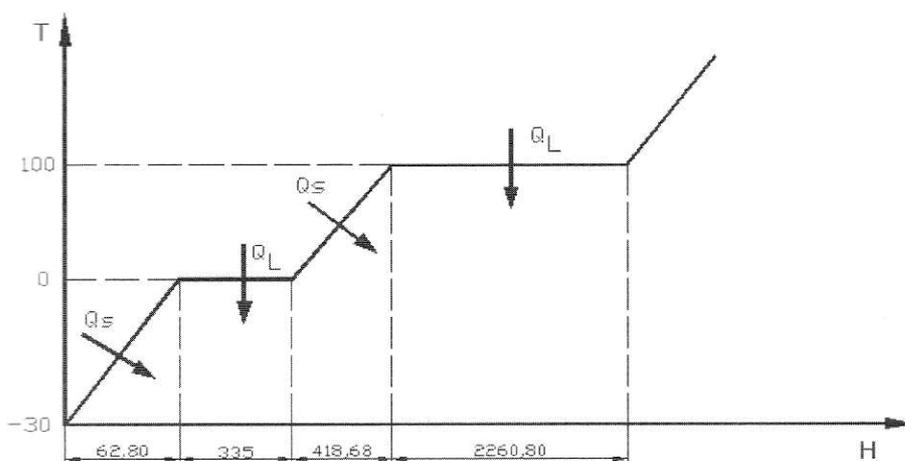


Figura 14.6

kPa e per temperature inferiori a 0 °C, si trova allo stato solido (ghiaccio), per intervalli di temperature tra 0-100 °C è allo stato liquido e, infine, per temperature superiori a 100 °C passa allo stato di vapore. Nei passaggi di stato della materia tre aspetti del fenomeno sono particolarmente importanti:

- i **passaggi di stato** sono **isotermobarici**, cioè avvengono a temperatura e pressione costanti;
- il **calore somministrato o sottratto** durante un passaggio di stato è di **tipo latente** (non comporta cioè variazioni di temperatura);
- il **calore somministrato o sottratto** a una sostanza in uno stato di aggregazione ben definito è di **tipo sensibile** (comporta cioè variazioni di temperatura).

A tale proposito si considerino il piano $T-H$ (temperatura-entalpia) e un chilogrammo di ghiaccio che, alla pressione atmosferica è alla temperatura di -30 °C (Fig. 14.6).

Se si comincia a somministrare calore, si osserva che la temperatura della massa di ghiaccio aumenta progressivamente fino a che raggiunge il valore di 0 °C. La quantità di calore necessaria a coprire il salto termico di 30 °C è ovviamente di tipo sensibile e vale:

$$Q = cm\Delta t = 2,09 \cdot 1 \cdot [0 - (-30)] = 62,80 \text{ kJ}$$

dove $c = 2,09 \text{ kJ/kg}$ è il calore specifico del ghiaccio.

Raggiunto lo zero, continuando a somministrare calore, si osserva che il chilogrammo di ghiaccio comincia a fondere, cioè si verifica il passaggio di stato solido \rightarrow liquido ma la temperatura non aumenta mantenendosi costante a 0 °C fino a che non è avvenuta la completa fusione della sostanza. L'energia termica spesa per provocare la fusione completa del chilogrammo di ghiaccio è di circa 335 kJ ed è, per quanto detto, calore latente (di fusione) in quanto non provoca nessuna variazione di temperatura.

Completata la fusione, continuando a fornire calore, la temperatura, che nella fase precedente si era mantenuta costante, comincia ad aumentare. L'aumento di temperatura in atto si arresta al raggiungimento dei 100 °C. L'energia termica necessaria a realizzare il salto termico 0-100 °C è di circa 100 kcal, cioè 418,68 kJ. Questo significa che, per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 kg di acqua, occorre 1 kcal (4,1868 kJ), essendo infatti 1 kcal/kg il calore specifico dell'acqua. Raggiunti i 100 °C, continuando a fornire calore e sempre alla pressione atmosferica, la temperatura non aumenta e si verifica la vaporizzazione dell'acqua (passaggio di stato liquido-vapore) che richiede all'incirca 2260,80 kJ (540 kcal).

In conclusione, si può dire che per trasformare una massa $m = 1$ kg di ghiaccio da solido a vapore occorre una quantità di calore:

$$Q_t = 62,80 + 335 + 418,68 + 2260,80 = 3077,90 \text{ kJ (735 kcal)}$$

Di tale quantità, $335 + 2260,80 = 2595,80$ kJ è calore latente, pari all'84% del calore totale, e 482,10 kJ, pari al 16% del totale, è calore di tipo sensibile. Ovviamente, è possibile fare le stesse considerazioni a "ritroso" e cioè partendo da 1 kg di vapore per arrivare a ottenere 1 kg di ghiaccio; sarà necessario sottrarre al chilogrammo di sostanza una quantità di calore pari a 3077,90 kJ (a parità di pressione).

Il calore recuperabile

Nel modulo 4, dedicato alla combustione, si è detto che bruciando un qualunque combustibile si forma sempre una determinata quantità di acqua sotto forma di vapore che, miscelata con i fumi, viene scaricata all'esterno dal camino. Il vapore d'acqua porta con sé il calore di condensazione che rappresenta una perdita di energia. Ci si potrebbe chiedere quale sia l'entità di tale perdita.

Si riprenda la reazione di combustione del metano CH_4 :



Si osserva, come già detto, che dalla combustione di 1 m^3 di CH_4 (in condizioni normali), si producono 2 m^3 (2000 litri) di vapore d'acqua. Ricordando che, in condizioni normali (0°C ; 760 mmHg), una mole di un qualunque gas occupa sempre il volume di 22,40 litri, il numero di moli contenuti in 2000 litri è:

$$1 : 22,40 = x : 2000 \Rightarrow x = \frac{2000}{22,40} = 89,30 \text{ moli}$$

Essendo la molecola d'acqua formata da due atomi di idrogeno (peso atomico 1) e da un atomo di ossigeno (peso atomico 16), il suo peso molecolare è 18 ($2 + 16$) e, pertanto, in seguito alla combustione di 1 m^3 di CH_4 si formano:

$$89,30 \times 18 = 1607 \text{ g di H}_2\text{O}$$

A questo punto, richiedendo 1 kg di acqua circa 2,51 MJ (600 kcal) per vaporizzare, con la condensazione di 1,607 kg di vapore è possibile ottenere:

$$2,51 \times 1,607 = 4,03 \text{ MJ/m}^3_{\text{N}}$$

che coincide praticamente con la differenza fra il potere calorifico superiore ($39,90 \text{ MJ/m}^3_{\text{N}}$) e quello inferiore ($35,90 \text{ MJ/m}^3_{\text{N}}$) del metano.

Alla luce di quanto detto, rispetto al potere calorifico inferiore del combustibile, la quantità di calore che si perde con i fumi è:

$$\frac{4,03}{35,90} \times 100 = 11,20\%$$

che è opportuno cercare di recuperare perché non è assolutamente trascurabile. Nella pratica comunque, non è possibile recuperare tutto il calore di condensazione dal momento che le condizioni di funzionamento hanno una certa influenza sul punto di rugiada e quindi sulla temperatura di condensazione. Infatti, per recuperare il calore di condensazione contenuto nei fumi e cederlo all'acqua di riscaldamento quando questa ritorna in caldaia, è necessario che quest'ultima sia a una temperatura più bassa della temperatura di rugiada del vapore acqueo contenuto nei prodotti di combustione.

Uno schema di principio della caldaia a condensazione è rappresentato nella figura

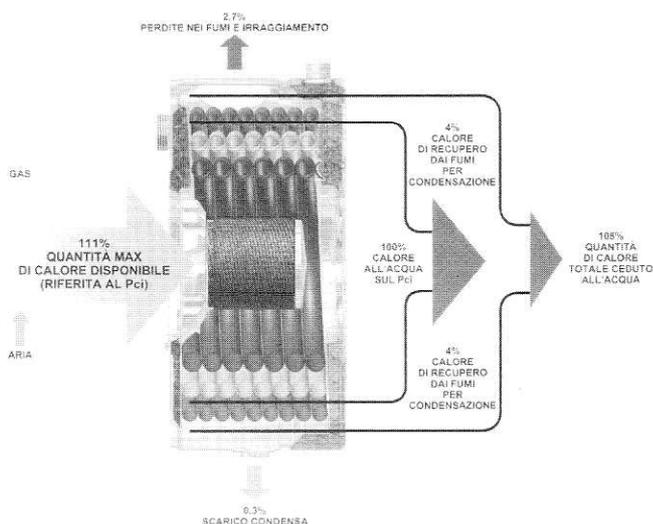


Figura 14.7

14.7. I fumi, prima di essere scaricati, vengono deviati verso lo scambiatore dal deflettore. Lo scambio di calore avviene in due diverse zone, prima e dopo il deflettore. A valle del deflettore si ha la cessione del calore latente e il condensato che si forma viene avviato allo scarico.

Non resta a questo punto che esaminare il rendimento della caldaia. Nel paragrafo 14.2 si è definito il rendimento di combustione o di produzione il quale, a parità di altre condizioni, dipende dal potere calorifico del combustibile impiegato essendo inversamente proporzionale a quest'ultimo:

$$\eta_c = \frac{P_{comv}}{P_f} = \frac{P_{comv}}{qH} = 1 - \frac{P_c}{qH}$$

con il noto significato dei vari termini. Dal momento che ogni combustibile è caratterizzato da due valori del potere calorifico, superiore e inferiore, si possono definire due rendimenti uno riferito al potere calorifico superiore H_s e l'altro a quello inferiore H_i :

$$\eta_{CH_s} = 1 - \frac{P_c}{qH_s} \qquad \eta_{CH_i} = 1 - \frac{P_c}{qH_i}$$

Rapportando membro a membro si ha:

$$\frac{\eta_{CH_s}}{\eta_{CH_i}} = \frac{H_i}{H_s} \qquad (14.3)$$

Si consideri una caldaia per la quale il costruttore dichiara:

- potenza al focolare $P_f = 29,65 \text{ kW}$
- potenza resa $P_r = 27,43 \text{ kW}$
- potenza persa con i fumi $P_c = 1,65 \text{ kW}$
- potenza persa attraverso il mantello $P_i = 0,57 \text{ kW}$

Il rendimento riferito al potere calorifico inferiore è dunque:

$$\eta_{CH_i} = \frac{27,43}{29,65} \cdot 100 = 92,50\%$$

$$29,65 = 27,43 + 1,65 + 0,57$$

$$100\% = 92,50\% + 5,57\% + 1,93\%$$

Il rendimento riferito al potere calorifico superiore, nell'ipotesi che la caldaia sia alimentata a metano, in base alla (14.3) è:

$$\eta_{CH_s} = \eta_{CH_i} \frac{H_i}{H_s} \cdot 100 = 0,925 \frac{35,90}{39,90} \cdot 100 = 0,849 \cdot 100 = 84,90\%$$

ESEMPIO

- Si abbia una caldaia a condensazione di potenza pari a 30 kW per la quale le perdite di calore sensibile siano il 2% e quelle non recuperate risultano il 4%; la potenza uscente è:

$$33,3 - 0,66 + 1,97 = 34,61 \text{ kW}$$

da cui si ha un rendimento riferito al potere calorifico inferiore di:

$$\eta_{CH_i} = \frac{34,61}{33,3} \cdot 100 = 1,04 \cdot 100 = 104\%$$

Il rendimento riferito invece al potere calorifico superiore è:

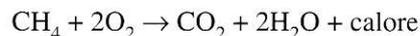
$$\eta_{CH_s} = 1,04 \frac{35,90}{39,90} \cdot 100 = 0,935 \cdot 100 = 93,5\%$$

I combustibili utilizzati

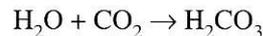
I combustibili migliori per alimentare una caldaia a condensazione sono quelli gassosi e, tra questi, il più adatto è il metano. I vantaggi che l'impiego del metano comporta sono diversi:

- ha la differenza più alta tra il potere calorifico superiore e quello inferiore, per cui maggiore è la quantità di calore di condensazione che è possibile recuperare;
- la temperatura di rugiada dei gas combusti provenienti dalla combustione del metano è più alta, a parità di eccesso d'aria, rispetto a qualunque altro combustibile. Il gasolio, per esempio, ha una temperatura di rugiada di circa 10 °C più bassa;
- la condensa prodotta dalla combustione del metano è debolmente acida e può essere facilmente smaltita senza problemi attraverso la normale rete di scarico delle acque reflue delle abitazioni, contrariamente alla condensa che si forma, per esempio, con il gasolio.

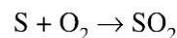
Infatti, se si riprende la reazione di combustione del metano:



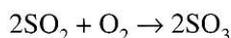
il condensato che si forma combinandosi con l'anidride carbonica produce acido carbonico che è solubile in acqua:



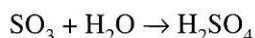
Se il combustibile è gasolio, esso contiene zolfo (S) il quale, combinandosi con l'ossigeno, produce anidride solforosa secondo la seguente reazione chimica:



Una parte dell'anidride solforosa, in presenza di eccesso d'aria, si combina con altro ossigeno e dà luogo alla formazione di anidride solforica:



Quest'ultima, a contatto con il vapore acqueo, produce acido solforico che è molto corrosivo:



Questo è il motivo per cui nei generatori funzionanti a gasolio, i fumi devono essere evacuati a una temperatura elevata allo scopo di impedire la formazione di condensa. Nelle caldaie alimentate con gasolio, maggiore è il tenore di zolfo presente nel combustibile più alto è il punto di rugiada e, quindi, ancora più alta deve essere la temperatura di evacuazione dei fumi. In base a quanto detto si comprende che una caldaia a condensazione non può essere alimentata a gasolio.

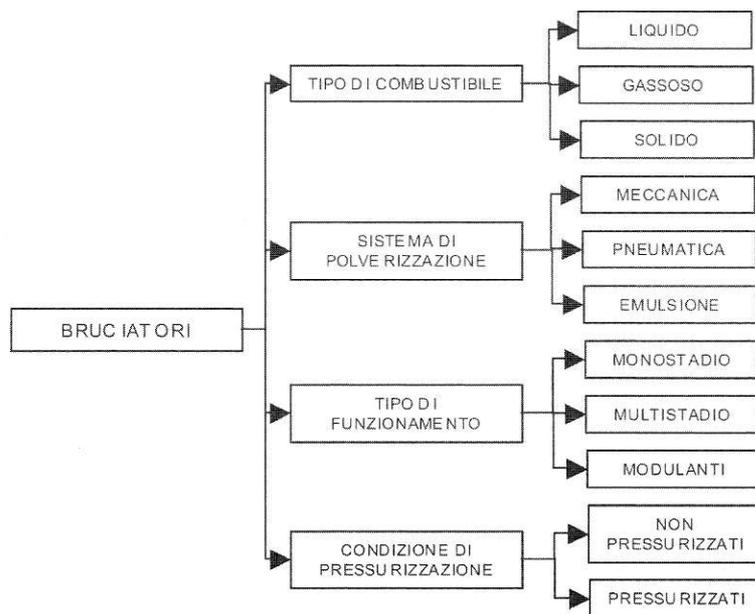
14.6 I bruciatori

I **bruciatori** sono apparecchiature, a corredo del generatore di calore, alle quali è affidato il compito di preparare la miscela combustibile-comburente e di innescarne la combustione.

Al fine di migliorare il rendimento di combustione è necessario che il combustibile sia miscelato intimamente con l'ossigeno dell'aria comburente. Si realizza questa condizione riducendo il combustibile in minutissime particelle in modo che, innescato il processo di combustione, il fronte di fiamma avanzi con la giusta velocità e investa tutta la miscela. Se il combustibile è gassoso, ovviamente l'operazione di miscelazione è molto più facilitata, essendo il combustibile e l'ossigeno nello stesso stato di aggregazione. Nel caso, invece, di combustibile liquido, si rende necessario ridurlo in goccioline (*effetto nebbia*); tale operazione si chiama **polverizzazione**.

Criteri di classificazione

Sono diversi e rispondenti allo schema seguente.



Considerata la vastità dell'argomento, ci si limita a descrivere solo alcuni tipi di bruciatori, iniziando da quelli impiegati per i combustibili gassosi. Il più semplice di essi è il **bruciatore atmosferico** il cui schema è riportato nella figura 14.8.

La parte caratteristica è rappresentata dal Venturi, che ha la funzione di creare la

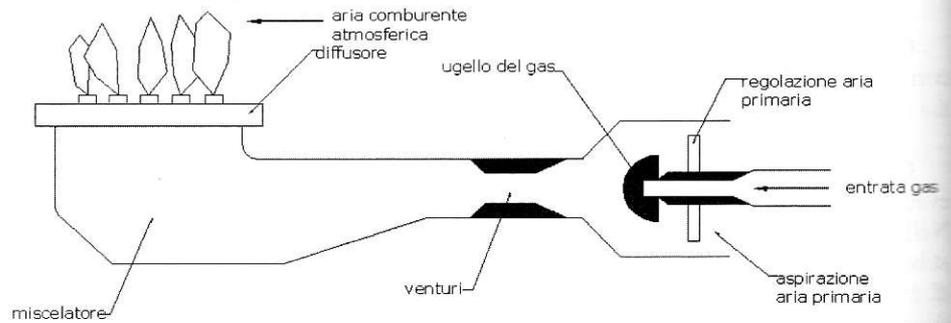


Figura 14.8

depressione necessaria a richiamare l'aria primaria dall'esterno in seguito al passaggio del gas proveniente dall'ugello ad alta velocità. Nel miscelatore avviene poi la premiscelazione tra il gas e l'aria primaria aspirata e, infine, la miscela così preparata esce da una serie di fori praticati nel diffusore dove si realizza il processo di combustione. La rimanente parte di aria (circa il 50%), detta *aria secondaria*, occorrente per la combustione, è formata da quella circostante il diffusore. Nelle caldaie dotate di bruciatore atmosferico, solo l'aria primaria è indipendente dal tiraggio, mentre quella secondaria dipende da esso e, quindi, dalla depressione alla base del camino. Dal momento che il tiraggio non è costante, per fare in modo che l'aria secondaria sia insensibile alle sue variazioni, la caldaia è corredata di un dispositivo rompitiraggio che ha la funzione di mantenere costante la quantità di aria secondaria a vantaggio della regolarità della reazione di combustione.

Il bruciatore atmosferico è largamente impiegato nei gruppi termici di piccola e media potenza, ma non è raro trovare gruppi termici di potenze alte, anche 300 kW, che ne sono dotati.

Un altro tipo di bruciatore per combustibili gassosi è il **bruciatore ad aria soffiata**. L'apparecchio è dotato di un ventilatore che immette aria nella zona di miscelazione dove giunge anche il gas che fuoriesce dalla testa di combustione. La miscela così formata è innescata da un elettrodo di accensione e brucia originando una fiamma di colore blu poco luminosa. Questo è il motivo per cui tali tipi di bruciatori hanno dei sistemi di rilevazione della fiamma non a fotoresistenza ma a termocoppia o a ionizzazione.

In base al tipo di gas, i bruciatori ad aria soffiata si classificano in:

- **bruciatori a premiscelazione**, se la miscelazione fra il gas e l'aria comburente avviene a monte della zona di combustione;
- **bruciatori a postmiscelazione** quando la miscelazione avviene a livello della zona di combustione.

In base al tipo di funzionamento, si classificano in:

- **bruciatori monostadio**, se la portata di aria e combustibile non variano automaticamente durante il funzionamento;
- **bruciatori multistadio**, quando l'apparecchio è provvisto di due o più stadi di alimentazione con la commutazione che può avvenire o manualmente o automaticamente;
- **bruciatori modulanti**, se l'apparecchio è previsto per il funzionamento con alimentazione variabile automaticamente, in modo continuo, almeno tra il 30 e il 100% della potenza termica nominale del bruciatore.

In base al tipo di costruzione, i bruciatori si classificano in:

- **bruciatori monoblocco**, se il ventilatore è parte integrante dell'apparecchio;
- **bruciatori ad alimentazioni separate**, se il ventilatore dell'aria è staccato dal bruciatore.

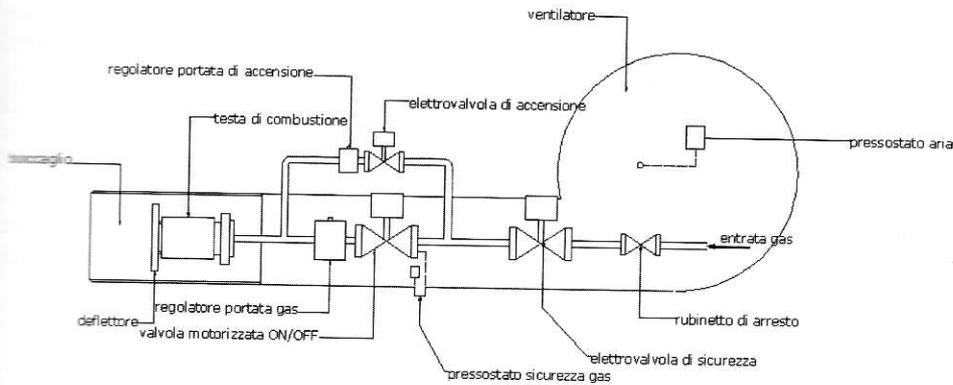


Figura 14.9

In base al tipo di pressurizzazione, i bruciatori si classificano in:

- bruciatori per focolare pressurizzato;
- bruciatori per focolare non pressurizzato.

Si ha, infine, la classificazione in base alla pressione di alimentazione del gas combustibile:

- bruciatori per bassa pressione, se la pressione è inferiore o al massimo uguale a 40 mbar;
- bruciatori per alta pressione quando l'intervallo di pressione è compreso tra 40 mbar e un massimo di 500 mbar.

Lo schema di un bruciatore monostadio ad aria soffiata è riportato nella figura 14.9 Il pressostato dell'aria di cui è corredato l'apparecchio ha la funzione di controllare il corretto funzionamento del ventilatore durante la fase di prelavaggio, necessaria per espellere eventuali gas combusti residui, prima che si inneschi il processo di combustione. Se in tale fase si dovessero verificare delle anomalie durante il funzionamento, il pressostato arresta il bruciatore. Durante la fase di prelavaggio, mentre tutte le valvole di intercettazione del gas restano chiuse, si inserisce l'elettrovalvola di accensione in modo che, terminata la fase di prelavaggio, all'apertura della suddetta valvola comandata dal pressostato, scocca la scintilla fra gli elettrodi e si infiamma la mi-

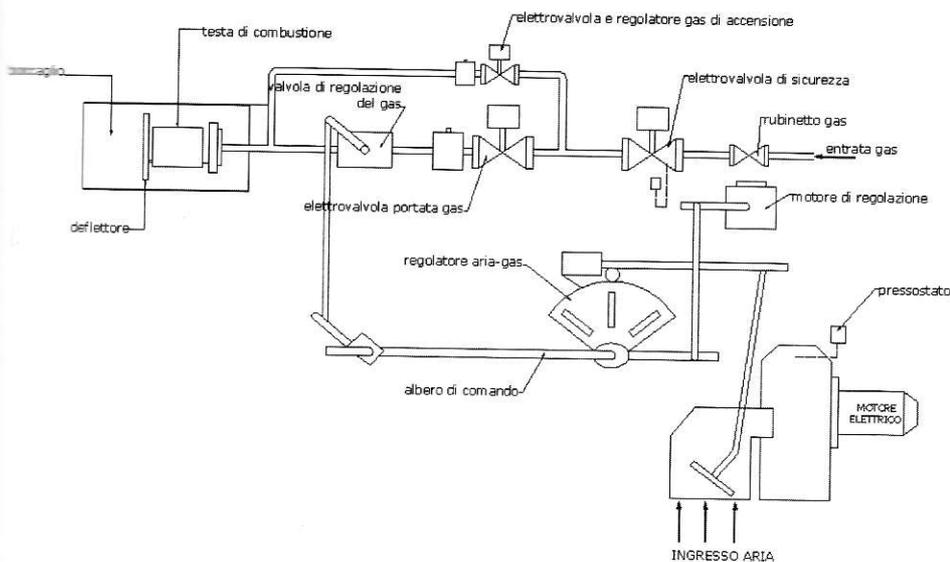


Figura 14.10

sceola aria-gas. La fiamma che si genera, rilevata dall'elettrodo, apre la valvola motorizzata di intercettazione del gas in modo da consentire all'apparecchiatura di continuare il normale ciclo di funzionamento.

Il **bruciatore modulante** (Fig. 14.10) è particolarmente indicato negli impianti in cui la richiesta di energia termica è variabile, quale per esempio un impianto destinato al riscaldamento degli ambienti con regolazione climatica. Infatti, con tale apparecchiatura si ha la possibilità di adattare la potenza del bruciatore alla richiesta della caldaia che può essere molto variabile. In questo modo, oltre a risparmiare combustibile, diminuisce anche il cimento termico dei materiali legati al riscaldamento e al raffreddamento ciclico dell'impianto caratteristico del funzionamento intermittente.

Il **sistema di regolazione modulante** consta di:

- valvola di regolazione del gas;
- regolatore aria;
- motore di regolazione per il comando automatizzato della potenza del bruciatore.

La regolazione si ottiene variando la portata del gas in seguito alla variazione della sezione della valvola regolatrice. La valvola dell'aria provvede ad adattare la quantità di comburente al consumo del gas per l'intero campo di regolazione.