

SOMMARIO

PRESENTAZIONE	5
1. COMBUSTIONE DELLE BIOMASSE SOLIDE	7
1.1 Termini e concetti di base	7
1.2 Processo di combustione	11
1.3 Calcolo della combustione	13
1.3.1 Reazioni principali	14
1.3.2 Fabbisogno d'aria	14
1.3.2.1 Richiesta d'aria stechiometrica (minima)	14
1.3.2.2 Fabbisogno d'aria effettivo	14
1.3.3 Calcolo della quantità dei gas di scarico della combustione	15
1.3.4 Biocombustibile e rendimento del generatore	16
1.3.5 Esempio di calcolo pratico	16
1.4 Requisiti tecnico-costruttivi degli apparecchi	18
1.5 Differenze funzionali tra generatori manuali e automatici	19
2. APPARECCHI DOMESTICI MANUALI E AUTOMATICI	21
2.1 Principi di funzionamento dei focolari a carico manuale	21
2.1.1 Focolare a fiamma trasversale	21
2.1.2 Focolare a fiamma superiore	21
2.1.3 Focolare a fiamma inferiore	23
2.2 Apparecchi domestici manuali ad aria	25
2.2.1 Camini chiusi	26
2.2.2 Stufe	27
2.2.2.1 Componenti e funzionamento di una moderna stufa a legna	27
2.2.2.2 Linee guida alla scelta della stufa a legna	29
2.2.2.3 Componenti a corredo e utili accessori	31
2.2.2.4 Evoluzioni tecnologiche delle stufe a legna	31
2.2.3 Cucine	33
2.3 Apparecchi domestici manuali ad acqua	34
2.3.1 Termocucine	34

2.3.2 Termocamini e termosufe	35
2.3.3 Corretta accensione di un apparecchio manuale	36
2.4 Apparecchi domestici automatici	38
2.4.1 Stufe a pellet ad aria	38
2.4.2 Termostufe a pellet	39
2.5 Principali requisiti di sicurezza dei locali di installazione	40
3. CALDAIE MANUALI E AUTOMATICHE	41
3.1 Caldaie manuali a legna	41
3.1.1 Funzionamento	41
3.1.2 Dispositivi di sicurezza	42
3.1.3 Campi di applicazione	43
3.1.4 Caricamento della caldaia	43
3.1.5 Tiraggio forzato	44
3.1.6 Scambiatore di calore	44
3.1.7 Regolazione	45
3.1.8 Caldaie a pieno carico (a potenza non regolabile)	45
3.1.9 Caldaie a potenza regolabile	46
3.1.10 Caldaie a potenza e combustione regolabili	46
3.2 Caldaie a caricamento automatico	47
3.2.1 Tipologie di focolari	47
3.2.2 Caldaie sottoalimentate	49
3.2.3 Caldaie ad alimentazione laterale	49
3.2.3.1 Caldaie a griglia fissa	50
3.2.3.2 Caldaie a griglia mobile	51
3.2.4 Caldaie con focolare per caduta	52
3.2.4.1 Cippato calibrato (P8, M20) e cubettato	52
3.2.5 Componenti aggiuntive e combinazione con altre fonti	53
3.2.5.1 Scambiatore di calore e condensazione	53
3.2.5.2 Combinazione con altre fonti di calore	53
3.2.6 Sistemi d'estrazione e d'alimentazione del focolare	54
3.2.7.1 Estrattori meccanici	56
3.2.7.2 Estrazione dal silo con fondo inclinato (pellet)	56
3.2.7.3 Estrattore con molle a balestra o braccio articolato	57
3.2.7.4 Estrattore a coclea rotativa e conico	58
3.2.7.5 Estrattore a rastrelli	58
3.2.7.6 Sistemi d'alimentazione	59
3.2.8 Fornitura, stoccaggio e logistica del cippato	59
3.2.8.1 Linee guida per la configurazione del sistema estrazione-carico-focolare	61
3.2.9 Requisiti per la fornitura, lo stoccaggio e la logistica del pellet	62

3.2.9.1 Fornitura	62
3.2.9.2 Stoccaggio	64
3.2.9.3 Silo a sacco	64
3.2.9.4 Depositi con fondo a pareti inclinate	64
3.2.9.5 Serbatoi sotterranei	66
3.2.9.6 Formazione di CO	67
3.2.10 Sistemi di sicurezza	71
3.2.11 Sistemi di regolazione	73

4. COLLEGAMENTI IDRAULICI	74
4.1 Simbologia	75
4.2 Costruzione della rete idraulica	76
4.3 Varianti di base della distribuzione	77
4.4 Circuiti di distribuzione all'utenza	78
4.4.1 Calcolo della potenza	78
4.4.2 Differenza di temperatura ΔT	78
4.4.3 Tipi di circuiti	79
4.4.3.1 Circuiti a portata variabile	79
4.4.3.2 Circuiti a portata costante	80
4.4.4 Riepilogo delle caratteristiche idrauliche dei circuiti	83
4.5 Dimensionamento della rete di distribuzione	84
4.5.1 Dimensionamento della pompa di circolazione	85
4.5.1.1 Criteri per la corretta scelta della pompa	86
4.5.2 Dimensionamento delle valvole di regolazione	87
4.5.2.1 Autorità della valvola di regolazione	88
4.5.3 Circuito anticondensa	90
4.6 Installazione dell'accumulatore	90
4.6.1 Funzionamento e varianti	93
4.6.2 Dimensionamento dell'accumulatore	94
4.6.3 Integrazione dell'accumulatore nel circuito idraulico	97
4.6.4 Collegamento di un impianto solare termico	99
4.7 Vaso di espansione chiuso negli impianti a biomasse	101
4.7.1 Vantaggi del vaso di espansione chiuso	101
4.7.2 Riferimenti normativi	102
4.7.2.1 Apparecchi domestici < 35 kW (temperatura del fluido vettore ≤ 110 °C)	102
4.7.2.2 Caldaie a biomasse > 35 kW (temperatura del fluido vettore ≤ 110 °C)	102
4.7.3 Una recente precisazione di INAIL-ex ISPESL	103
4.7.4 Prescrizioni di sicurezza della UNI EN 303-5:2012	103
4.7.5 Esempi applicativi	104

5. MINIRETI DI TELERISCALDAMENTO	107
5.1 Corretto dimensionamento della rete	107
5.2 Tubazioni	109
5.2.2 Posa in opera	110
5.3 Fornitura di ACS nelle minireti	110
6. Valutazione finanziaria dell'investimento	113
6.1 Costi fissi	113
6.2 Costi variabili	114
6.3 Calcolo del risparmio sul combustibile precedente	115
6.4 Flusso di cassa e indicatori finanziari	115
7. PRESTAZIONI TECNICO-AMBIENTALI DI APPARECCHI E CALDAIE	119
7.1 Rendimento termico	119
7.1.1 Rendimento degli apparecchi domestici	119
7.1.2 Rendimento delle caldaie centralizzate	120
7.1.3 Evoluzione del rendimento	122
7.2 Emissioni	122
7.2.1 Composizione e impatto sulla salute	122
7.2.2 Fattori di conversione	124
7.2.3 Emissioni degli apparecchi domestici	124
7.2.4 Fattori di emissione delle caldaie	127
7.2.5 Livelli di tossicità del particolato nei moderni generatori	131
7.2.5.1 Citotossicità del PM da combustione: gli studi svizzeri	132
7.2.5.2 Effetti sulla salute del PM da combustione: gli studi austro-finlandesi	133
8. NORMATIVA GIURIDICA	137
8.1 Autorizzazioni e procedure amministrative	138
8.2 Installazione	144
8.3 Conduzione, controllo e manutenzione	145
9. NORMATIVA TECNICA	151
9.1 Caldaie	151
9.2 Apparecchi domestici	154
ALLEGATI	156
BIBLIOGRAFIA	158

PRESENTAZIONE

Il mercato degli apparecchi e delle caldaie alimentati a biocombustibili di origine agroforestale ha registrato in Italia dati di crescita importanti negli ultimi anni. Nel 2012 le vendite sono state di circa 300.000 apparecchi domestici e 20.000 caldaie. Il pellet è il vero driver di questo trend positivo, con tassi di crescita a due cifre in entrambi i segmenti.

Il parco apparecchi e caldaie domestiche installato a scala nazionale, secondo le nostre ultime stime, è composto da circa 2 milioni di apparecchi a pellet, 8 milioni di apparecchi a legna e poco meno di 0,8 milioni di caldaie domestiche (<35 kW). Nell'ambito civile e industriale (>35 kW <1 MW), negli ultimi anni sono state installate circa 3.000 caldaie all'anno per un totale installato di oltre 20.000 unità, mentre i teleriscaldamenti hanno superato quota 200.

Una buona parte degli apparecchi e delle caldaie installate, in particolare a scala domestica, hanno età superiore a 10-15 anni, bassi livelli di rendimento ed elevati fattori di emissione e sono spesso caratterizzati da errori più o meno grossolani d'installazione, eseguita da operatori non adeguatamente preparati.

Nel prossimo futuro, quindi, oltre a puntare alla realizzazione di nuovi impianti di elevato livello prestazionale, sarà sempre più importante il risanamento e la riqualificazione energetica degli impianti a biomasse esistenti, interventi questi che per altro godono già di interessanti incentivi.

La riqualificazione degli impianti, se eseguita perseguendo il massimo livello qualitativo dell'intervento, dalla scelta del generatore alla sua installazione e manutenzione, incluso l'impianto fumario, le componenti idrauliche ed elettriche e le opere edili, offre la possibilità di ottenere significative quote di risparmio di energia primaria.

Questo manuale intende contribuire ad aumentare il livello delle conoscenze tecniche sugli apparecchi domestici e le caldaie alimentate da biocombustibili solidi. La prima parte è dedicata alla descrizione del processo di combustione e all'evoluzione costruttiva dei focolari, sia manuali sia automatici. Segue la disanima dei principali tipi di apparecchi e caldaie, nell'ottica di fornire una sorta di linee guida al riconoscimento dei principi di funzionamento e alle caratteristiche tecnico-costruttive che differenziano i moderni genera-

tori di calore a biomasse. Nell'ambito delle caldaie automatiche, sono riportate informazioni tecniche e di sicurezza per la corretta realizzazione dei depositi del biocombustibile, in forma di pellet e di cippato.

All'idraulica è dedicato il capitolo 4, con particolare attenzione alle componenti e gli aspetti progettuali fondamentali per gli impianti a biocombustibili solidi, con un cenno anche all'integrazione del solare termico.

Progettazione e installazione corrette sono alla base di un impianto di successo, in particolare di quelli più impegnativi sotto il profilo degli investimenti e caratterizzati da una lunga vita tecnica. Per questo è stato inserito un capitolo dedicato alla metodologia di valutazione di fattibilità degli investimenti, con valori unitari indicativi per l'imputazione dei costi e il calcolo degli indici finanziari per la verifica preliminare della redditività dell'investimento.

Il capitolo 7 riporta un approfondimento sul delicato tema delle emissioni, con un confronto tra i generatori tradizionali e quelli moderni e più innovativi e dei focus sul potenziale delle misure primarie per la futura riduzione dei livelli quantitativi e degli effetti di tossicità delle emissioni di particolato.

Il manuale si chiude con una panoramica sulle principali normative giuridiche e tecniche.

Valter Francescato, direttore tecnico AIEL

1. COMBUSTIONE DELLE BIOMASSE SOLIDE

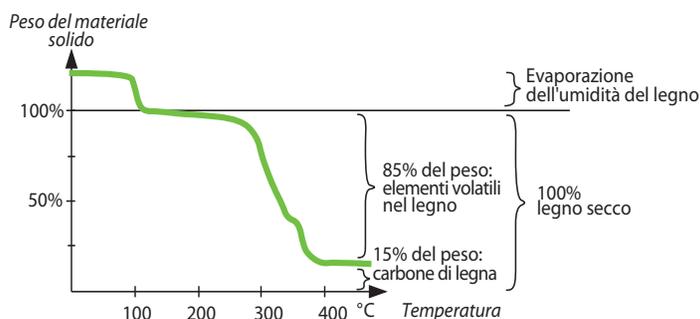
1.1 Termini e concetti di base [17]

Prima di descrivere le fasi che caratterizzano la combustione del legno è opportuno introdurre brevemente alcuni termini e concetti di base utili alla comprensione di quanto sarà detto successivamente, con riferimento alle caratteristiche delle caldaie e degli impianti termici.

Componente volatile

È la componente del legno – prevalentemente gassosa – rilasciata nella fase di riscaldamento del legno ($t > 150^{\circ}\text{C}$). In termini quantitativi è inversamente proporzionale alla componente carboniosa (carbone di legno). Nei combustibili legnosi è in media l'85% della s.s., mentre è più bassa (74-76%) nelle biomasse erbacee (paglia). Nei combustibili fossili (carbone) varia invece nel range 6-63%.

Figura 1.1.1 *Suddivisione percentuale delle componenti del legno e loro comportamento durante la combustione [1]*



Acqua di combustione e punto di rugiada

Nel corso della combustione del legno evapora sia l'acqua di imbibizione, durante le prime fasi della combustione, sia l'acqua di saturazione indicata anche come "acqua di combustione". Queste componenti determinano il contenuto d'acqua nei fumi di scarico al camino, sulla base del quale è definito il loro punto di rugiada. Ad esempio impiegando legno secco – con un eccesso d'aria di 1,5 – il punto di rugiada è pari a 45°C e sale a 62°C nel caso di impiego di legno umido. Sotto il punto di rugiada si ha la condensazione dei gas che possono determinare un

effetto corrosivo sia nel camino che in altre componenti dell'impianto. Nella maggior parte dei casi applicativi, perciò, i fumi di scarico della combustione del legno – in funzione del contenuto d'acqua e dell'eccesso d'aria - non dovrebbero scendere sotto ad una certa temperatura. Tranne i casi in cui l'energia d'evaporazione dell'acqua è recuperata attraverso un condensatore, essa rappresenta una perdita energetica che, in particolare nel caso d'impiego di combustibili molto umidi, peggiora notevolmente il bilancio energetico complessivo. Tuttavia, poiché il rendimento dell'apparecchio, il più delle volte, è riferito al potere calorifico inferiore (pc_M) e non a quello superiore, il peso della differenza tra combustibili secchi e umidi gioca un ruolo marginale.

Numero dell'eccesso d'aria

Per assicurare una completa ossidazione dei composti ossidabili contenuti nel legno generalmente è fornito al processo di combustione un surplus d'aria, ovvero un eccesso di ossigeno corrispondente alla quantità teorica necessaria per ossidare completamente il combustibile. Il grado d'eccesso d'aria è indicato con il numero Lambda (λ), corrispondente al rapporto tra:

- la quantità d'aria complessivamente fornita nell'unità di tempo al processo d'ossidazione e
- la quantità d'aria minima (stechiometrica) necessaria per la completa ossidazione.

$$\lambda = \frac{q_{aria\ tot.}}{q_{aria\ min.}}$$

Per un'ossidazione completa, quindi, il numero Lambda deve essere almeno pari a 1 (nessun eccesso d'aria). Di fatto nel caso di generatori termici a legna varia tra 1,5 e 2,5, ovvero la combustione avviene quasi sempre in una condizione d'eccesso d'aria.

Combustione

Il carbonio (C) o l'idrogeno (H) in presenza di ossigeno (O_2) sono ossidati liberando energia con formazione di CO_2 e di H_2O . Questo processo descrive la combustione delle biomasse, composte fondamentalmente di (C), ossigeno (O) e idrogeno (H) e può essere indicato con la seguente formula chimica $C_nH_mO_p$. Si parla di "combustione completa" quando tutte le componenti ossidabili sono completamente ossidate. Il numero d'eccesso d'aria quindi deve sempre essere uguale o superiore a 1. In carenza d'aria – ovvero quando <1 – dopo le reazioni di ossidazione rimangono ancora quantità di combustibile non ossidate o ossidate parzialmente (CO e C_nH_m) e si parla in questo caso di combustione incompleta.

Gassificazione

Quando un combustibile - ad es. il carbonio (C) – in aggiunta di ossigeno è ossidato e parzialmente combusto ($0 < \lambda < 1$) formando CO (piuttosto che CO_2) si parla di gassificazione o combustione parziale. Il gas così sviluppato (CO) può essere condotto in un altro processo tecnico dove può essere ossidato sottoponendolo ad un successivo apporto energetico. Attraverso la gassificazione il legno è quindi trasformato in gas combustibile che poi – almeno in teoria – può essere impiegato in modo efficiente per la produzione di energia elettrica e termica.

Pirolisi

Anche nel caso della pirolisi si tratta di un processo termochimico, tuttavia in questo caso il processo avviene esclusivamente sotto l'azione del calore e in assenza di ossigeno ($\lambda=0$). Poiché i biocombustibili contengono ossigeno (es. il legno ca. 44% O_2) si tratta di reazioni di decomposizione piuttosto che di ossidazioni. Oltre che per i processi termochimici di decomposizione pirolitica, il concetto di pirolisi è applicato anche per la produzione di vettori energetici fluidi prodotti da biomasse solide in specifici impianti (BTL = *Biomass to Liquid*).

Rendimento al focolare (η_f)

Il rendimento al focolare tiene conto delle perdite nei gas di scarico del focolare (fuoco) in forma di perdite termiche e chimiche. Particolarmente importanti sono: la temperatura dei fumi, l'eccesso d'aria (contenuto di O_2 o CO_2) così come il CO ed eventuali altri incombusti nei fumi. In questo caso, le perdite per radiazione e convezione del focolare e le perdite di arresto non sono considerate nel calcolo del rendimento. Il rendimento si calcola secondo l'equazione: $\eta_f = 1 - P_{term} - P_{chim}$ che considera le perdite termiche (P_{term}) rilevabili dal calore dei gas di scarico e le perdite chimiche (P_{chim}) legate all'incompleta combustione. Le perdite termo-chimiche sono riferite alla quantità d'energia espressa dal pc_M del combustibile.

Rendimento del generatore o rendimento utile (η_k)

Il rendimento del generatore è espresso dal rapporto tra la quantità d'energia utile fornita dal vettore termico (acqua) e la quantità d'energia primaria immessa nel generatore con il combustibile (pc_M della massa in ingresso). In questo caso, accanto alle perdite nei gas di scarico, contemplate nel rendimento al focolare, sono considerate in aggiunta anche quelle per radiazione e le perdite della griglia. Le perdite per radiazione derivano dal rilascio di calore della caldaia (nel vano tecnico) mentre le perdite dalla griglia sono legate ai residui incombusti nelle ceneri. Il rendimento della caldaia è di qualche punto percentuale più basso del rendimento al focolare; tuttavia, attraverso il miglioramento della coibentazione della caldaia ed una efficace combustione i due valori possono avvicinarsi molto.

Rendimento d'impianto (η_a)

Anche il rendimento d'impianto è posto in relazione al rapporto tra l'energia termica utile prodotta e l'energia immessa con il combustibile. Tuttavia, si tratta in questo caso di un parametro calcolato su un ampio intervallo di osservazione con condizioni di utilizzo molto variabili (periodo di riscaldamento, anno solare), riferito all'intero sistema di conversione energetica. Perciò, accanto alle perdite di esercizio sono anche tenute in considerazione le perdite dell'impianto (accensione, raffreddamento e mantenimento brace) così come le eventuali perdite ascrivibili alla presenza di un accumulatore di calore inerziale e alla distribuzione del calore (collettori, rete).

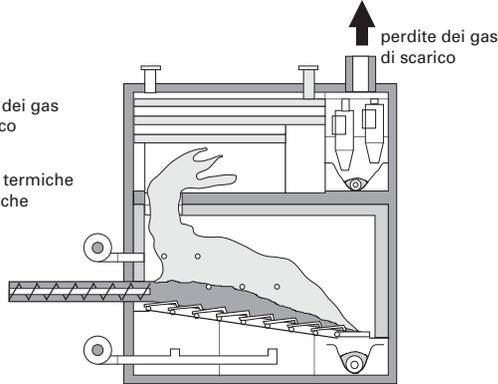
Il rendimento d'impianto è il parametro essenziale per descrivere la bontà tecnico-energetica di un impianto.

Figura 1.1.2 Illustrazione grafica dei concetti di rendimento al focolare, rendimento della caldaia e rendimento d'impianto [1]

RENDIMENTO AL FOCOLARE

$$\eta_f = 100\% - \text{perdite dei gas di scarico}$$

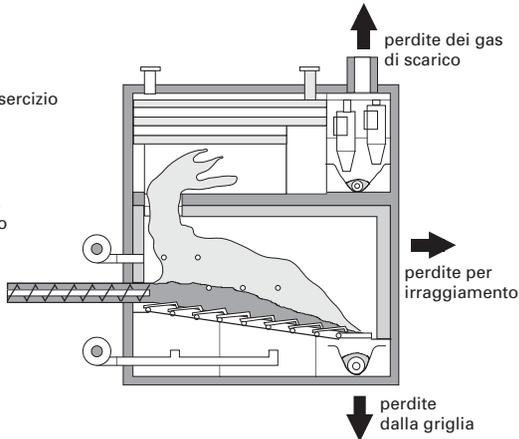
$$\text{perdite dei gas di scarico} = \text{perdite termiche e chimiche}$$



RENDIMENTO DEL GENERATORE

$$\eta_k = 100\% - \text{perdite di esercizio}$$

$$\text{perdite di esercizio} = \begin{aligned} &\text{perdite dei gas di scarico} \\ &\text{perdite per irraggiamento} \\ &\text{perdite dalla griglia} \end{aligned}$$



RENDIMENTO D'IMPIANTO

$$\eta_a = \frac{\text{quantità di energia prodotta annualmente}}{\text{quantità di energia fornita annualmente}}$$

$$\eta_a = 100\% - \text{perdite di esercizio} - \text{perdite di accensione}$$

