
PROTOCOLLO TECNICO

MISURA IN OPERA DEL RENDIMENTO E DELLE EMISSIONI DI CALDAIE A BIOMASSE

A cura di

Valter Francescato e Loris Della Coletta

Gruppo Caldaie a Biomasse di AIEL



Nicola Favaro, Walter Battaglia, Simone Tiozzo, Mauro

Campeol e Gianpietro Mion

Stazione Sperimentale del Vetro



PREMESSA	3
1.0 DURATA DEL MONITORAGGIO.....	4
2.0 DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI ENERGIA PRIMARIA DEL BIOCOMBUSTIBILE	4
2.1 CAMPIONAMENTO.....	4
2.2 SCELTA DEL LABORATORIO	5
2.3 PARAMETRI DA DETERMINARE	5
2.4 METODO DI CALCOLO DELLA PORTATA MASSICA DI BIOCOMBUSTIBILE BRUCIATO IN CALDAIA	6
2.5 METODI DI MISURA DEL RENDIMENTO TERMICO.....	8
2.5.1 <i>Misura diretta</i>	8
2.5.2 <i>Misura indiretta</i>	11
2.6 MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI.....	13
ALLEGATO 1 - CONFRONTO TRA METODO DIRETTO E INDIRETTO, RISULTATI DI UN TEST DI VALIDAZIONE.....	16
ALLEGATO 2 – RACCOMANDAZIONI PER LA CORRETTA APPLICAZIONE DEL PROTOCOLLO	19

PREMESSA

I sistemi incentivanti per le caldaie a biomasse, quali il Conto Termico e i Certificati Bianchi richiedono, per i generatori di $P_n > 500$ kW, la conformità delle prestazioni di rendimento ed emissione ai valori limite della Classe 5 della norma tecnica di prodotto UNI EN 303-5:2012. Tuttavia, la norma tecnica è applicabile solo alle caldaie con una potenza termica nominale fino a 500 kW. Pertanto, essendo i sistemi incentivanti applicabili anche a generatori con potenza superiore, esiste attualmente un vuoto normativo, e quindi metodologico, per la misurazione “in opera” di queste prestazioni.

Il presente documento intende fornire un protocollo per la verifica *in situ* del rendimento termico e delle emissioni di caldaie a biomassa, principalmente orientato ai generatori di potenza termica nominale superiore a 500 kW, ma estendibile ai generatori di potenza inferiore, per i quali si renda necessaria una verifica in opera delle prestazioni suddette. Il protocollo è stato redatto dal tavolo tecnico del Gruppo Caldaie a Biomasse di AIEL, il più importante raggruppamento nazionale di costruttori europei, con il supporto tecnico-scientifico della Stazione Sperimentale del Vetro di Venezia.

Per la verifica del rendimento termico delle caldaie a biomassa, le determinazioni sperimentali sono eseguite in campo direttamente sulla caldaia installata, utilizzando le indicazioni riportate ai punti 5.8.4 e 5.10.1-3 della norma UNI EN 303-5:2012 (**metodo diretto**), e più approfonditamente descritte nelle appendici A7 e A8 della norma UNI EN 304:2007. Nell'impossibilità di eseguire tali misure per ragioni tecniche (e.g. mancanza di pozzetti di misura per temperature, di misuratori di flusso, ecc.) si deve operare secondo le indicazioni riportate al punto 5.10.3.2 della norma UNI EN 303-5:2012 (**metodo indiretto**), più approfonditamente descritte nelle appendici A8 e A9 della norma UNI EN 304:2007.

Contestualmente alla misura del rendimento termico è eseguito anche il **monitoraggio delle emissioni**, finalizzato alla verifica del rispetto dei limiti richiesti dai sistemi incentivanti o dalle prescrizioni delle autorità competenti.

In alcuni circostanziati casi, specificatamente dettagliati nel paragrafo 2.6, il monitoraggio delle emissioni in atmosfera può essere effettuato anche in maniera disgiunta o in tempi differenti dalla determinazione del rendimento energetico.

1.0 DURATA DEL MONITORAGGIO

Per tenere conto delle oggettive difficoltà operative legate al mantenimento del sistema nelle condizioni di regime stazionario alla potenza nominale per 6 ore (cfr. p.to 5.7.4.2 della UNI EN 303-5) durante la normale attività lavorativa in campo, le prove devono essere eseguite discontinuamente nell'arco di un periodo di almeno 6 ore in cui l'impianto funzioni ad una potenza pari o prossima a quella nominale; all'interno di tale periodo devono essere individuati almeno 4 segmenti della durata di almeno 30 minuti ciascuno; la potenza media dei 4 segmenti deve risultare all'interno della potenza di targa $\pm 8\%$. Le misure del rendimento termico e delle emissioni (Particolato primario - PP, Monossido di Carbonio - CO e Carbonio Organico Totale - OGC) devono essere effettuate in modo continuo durante i segmenti individuati, ed il valore finale è calcolato come media dei valori dei singoli segmenti.

Sempre all'interno del periodo di riferimento di 6 ore, sono effettuati almeno 3 campionamenti equamente distribuiti della durata di 60 minuti ciascuno per la misura degli ossidi di azoto (NOx) e degli ossidi di zolfo (SOx). Il valore finale è calcolato come media dei valori dei tre campionamenti. Nel caso in cui le esigenze operative lo richiedano, è ammesso che i segmenti di monitoraggio del rendimento e delle emissioni non siano coincidenti.

2.0 DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI ENERGIA PRIMARIA DEL BIOCOMBUSTIBILE

Per la determinazione del rendimento termico della caldaia è fondamentale conoscere con accuratezza la potenza primaria entrante nel sistema con il biocombustibile. A tale scopo, è necessario determinare sia il contenuto specifico di energia liberato dalla biomassa durante la combustione, sia monitorare e registrare attentamente l'attività del sistema di alimentazione (coclee, spintori, ecc..) durante i vari segmenti di prova.

Ai fini della determinazione delle caratteristiche energetiche specifiche del biocombustibile, il materiale bruciato durante la prova deve essere campionato ed analizzato come specificato ai § 2.1-2.3.

2.1 CAMPIONAMENTO

Deve essere condotto seguendo le norme EN ISO 18135 e EN ISO 14780. A titolo indicativo, le **quantità minime** da raccogliere sono: 55-60 litri di **cippato**, 10-15 litri di **pellet**.

La raccolta deve essere fatta con strumenti che consentano di raccogliere un sub-campione alla volta con un volume pari a 1 litro circa. Il numero di sub-campioni da raccogliere dipende dal grado di omogeneità del carico di biocombustibile. Il campionamento deve essere fatto direttamente dal deposito dell'impianto. I campioni raccolti devono essere rapidamente chiusi in contenitori impermeabili opachi. Il contenitore deve essere pressato per far uscire l'aria e deve essere spedito tempestivamente al laboratorio. Se la spedizione avviene entro pochi giorni dal campionamento, il campione va conservato ad una temperatura $< 5^{\circ}\text{C}$. Per una maggiore precisione della determinazione del contenuto idrico è raccomandabile separare una quantità di 300-400 g di materiale e porla all'interno di un contenitore ermetico riempito al colmo. Sul contenitore del campione vanno riportate in modo indelebile le seguenti informazioni: luogo e data della raccolta, identità del campionatore, massa all'origine del campione raccolto, identificativo del campione.

2.2 SCELTA DEL LABORATORIO

I laboratori di prova autorizzati devono essere accreditati, o aver iniziato l'iter di accreditamento, secondo la **norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025**. Il loro ambito di accreditamento deve inoltre includere le norme tecniche di riferimento per lo svolgimento delle diverse prove richieste per gli specifici prodotti. Essi devono utilizzare i metodi standard specificati nella norma ISO 17225.

2.3 PARAMETRI DA DETERMINARE

Ai fini della determinazione del contenuto di energia primaria del carico di combustibile, i seguenti parametri devono essere analizzati impiegando le norme di riferimento indicate in tabella. Nel caso si ravvisi la necessità di effettuare ulteriori analisi sul biocombustibile, queste devono essere eseguite in conformità alla EN ISO 17225-1.

Parametri	Metodo di prova
Contenuto idrico	EN ISO 18134-1-2 EN 14774-1
Contenuto in ceneri	EN ISO 18122
Distribuzione granulometrica (cippato)	EN ISO 17827-1
Determinazione parti fini (pellet)	EN ISO 18846
Massa volumica sterica	EN ISO 17828
Potere calorifico superiore e inferiore	EN ISO 18125

2.4 METODO DI CALCOLO DELLA PORTATA MASSICA DI BIOCOMBUSTIBILE BRUCIATO IN CALDAIA

La determinazione della portata massica di biocombustibile immessa in caldaia durante i vari segmenti di prova deve essere effettuata, ove possibile, mediante misurazione **diretta**: per esempio, in presenza di una bilancia integrata nel sistema di carico, è possibile misurare accuratamente la portata massica di combustibile pesando **direttamente** il biocombustibile in continuo prima della sua immissione nella coclea di alimentazione. Laddove ciò non sia possibile, è necessario basarsi su **operazioni di precalibrazione del sistema di carico** e sul monitoraggio dei parametri di alimentazione durante la prova, oppure su considerazioni di tipo geometrico-volumetrico.

La precalibrazione è effettuata secondo modalità diverse a seconda che il sistema di alimentazione operi secondo un principio di funzionamento tipo “Stop & Go”, oppure in “Modulazione di velocità”.

- **Stop & GO**: nel caso dei sistemi di caricamento a **spintore**, è necessario determinare la massa di biocombustibile che viene alimentata da ciascun ciclo di azionamento del pistone; nel caso di sistemi a **coclea** è necessario determinare la massa di biocombustibile alimentato in un tempo noto quando la coclea è fatta funzionare in continuo alla sua (unica) velocità di marcia. Queste misurazioni possono essere effettuate direttamente in esercizio, predisponendo opportuni *bypass*, oppure a caldaia spenta e fredda, raccogliendo il combustibile da pesare direttamente dall'interno della camera di combustione.

Al fine di ottenere una quantificazione il più possibile rappresentativa, tali misurazioni devono essere ripetute almeno 3 volte, così da ricavare un valor medio che tenga in considerazione l'intrinseca variabilità legata alla distribuzione dimensionale del biocombustibile.

Sulla base dei dati di precalibrazione così raccolti e del monitoraggio delle tempistiche di funzionamento e pausa del sistema di carico adottate durante la prova, è possibile in seguito calcolare la portata massica di biocombustibile effettivamente alimentata nel focolare.

- **“Modulazione di velocità”**: dal momento che l'efficienza di riempimento delle spire della coclea è funzione della sua velocità di rotazione, la portata massica di biocombustibile alimentata nel focolare non risulta lineare con la velocità di rotazione. Di conseguenza, è necessario costruire una **curva di precalibrazione** dalla coclea andando a misurare le quantità di biocombustibile alimentate nella camera di combustione (o nel *bypass*) in un tempo noto in funzione della velocità di rotazione della coclea. Al fine di coprire al meglio l'intero intervallo utile di

funzionamento del sistema di carico, si suggerisce di effettuare prove di calibrazione almeno al 100%, 80%, 70%, 60%, 40% della velocità massima.

Sulla base della curva di precalibrazione così costruita e del monitoraggio delle velocità di funzionamento del sistema di carico adottate durante la prova, è possibile calcolare la portata massica di combustibile effettivamente alimentata nel focolare in ogni istante.

Alternativamente, la calibrazione della coclea può essere effettuata successivamente alla prova, e limitatamente alle sole velocità di rotazione effettivamente impiegate durante il test.

Nel caso non sia possibile misurare la quantità di materiale alimentato attraverso le metodologie sopra riportate e siano note le caratteristiche dimensionali e operative del sistema di alimentazione, la portata volumetrica media del biocombustibile solido può essere calcolata a priori direttamente; nota pertanto la massa sterica del biocombustibile impiegato, determinata secondo la norma EN ISO 17828, anche la portata massica media può essere calcolata. La motivazione della scelta deve essere chiaramente indicata nel rapporto di prova.

In particolare, ai fini della corretta quantificazione della portata volumetrica, nei sistemi di carico tramite **coclea** è necessario conoscere:

- Diametro e passo della coclea;
- Efficienza di riempimento della coclea;
- Velocità di rotazione della coclea nelle fasi di attività durante la prova di rendimento;
- Durata dei cicli di lavoro e pausa impiegati durante la prova di rendimento.

Per i sistemi di caricamento tramite **spintore**, invece, devono essere noti:

- Sezione utile dello spintore (larghezza e altezza);
- Corsa dello spintore (lunghezza);
- Efficienza di riempimento dello spintore;
- Durata di ciascun ciclo di carico (spinta e ritorno) durante la prova di rendimento.

Data la dipendenza della portata volumetrica di combustibile dalle efficienze di riempimento di spintori e coclee, parametri di difficile previsione teorica, tale metodo è da considerarsi come alternativa secondaria, da praticarsi in caso di impossibilità di effettuare in tempo utile una calibrazione del sistema (e.g. impossibilità di effettuare un bypass e caldaia non spegnibile).

2.5 METODI DI MISURA DEL RENDIMENTO TERMICO

Per la verifica del rendimento termico della caldaia devono essere utilizzate le indicazioni riportate ai punti 5.8.4, 5.10 della norma UNI EN 303-5:2012 (**metodo diretto**). Nell'impossibilità di eseguire tali misure, potrà essere utilizzato quanto indicato al punto 5.10.3.2 della norma UNI EN 303-5:2012 (**metodo indiretto**).

2.5.1 MISURA DIRETTA

La misura diretta del rendimento della caldaia (η_K) è effettuata secondo quanto prescritto dalla norma UNI EN 303-5:2012 punto 5.8.4 e 5.10, e richiede la quantificazione del calore fornito al focolare del generatore con il biocombustibile di prova e basato sul suo potere calorifico inferiore (Q_B) e del calore utile trasmesso dalla caldaia al fluido termovettore (Q).

Il rendimento di caldaia η_K è calcolato come:

$$\eta_K = \frac{Q}{Q_B} \times 100$$

La misura diretta deve essere eseguita mediante la determinazione delle temperature del fluido termico in ingresso e uscita dalla caldaia, in corrispondenza ai punti di misura più vicini disponibili. Le misure devono essere eseguite utilizzando dei pozzetti immersi nel fluido, o soluzioni alternative in grado di garantire le medesime incertezze.

Le misure di temperatura devono essere eseguite utilizzando catene di misura riferibili a misure primarie (esp. ACCREDIA). Le misure devono essere eseguite ad intervalli massimi di 20 secondi ed il valore medio deve essere registrato ad intervalli di almeno 1 minuto. La catena di misura delle temperature deve garantire un'incertezza di misura inferiore allo 0,1 °C sul valore misurato.

Durante ciascuno degli almeno 4 segmenti di prova previsti, ove possibile il salto termico ($\Delta T = T_{\text{mandata}} - T_{\text{ritorno}}$) tra le temperature di mandata e ritorno non deve variare di più di: 0,5 [°C/h] x durata totale periodo di prova[h]; e.g, per una durata complessiva di prova di 6 ore, durante ciascuno dei 4 segmenti di prova della durata di 30 minuti ciascuno, il salto termico non dovrebbe variare di più di $\pm 3^\circ\text{C}$.

Durante tutto il periodo di prova, ove possibile, la temperatura della mandata deve rimanere mediamente compresa tra 70°C e 90°C, e la differenza di temperatura tra mandata e ritorno deve rimanere compresa ove possibile tra 10 e 25°C.

Contestualmente alla misura delle temperature e con i medesimi intervalli, deve essere misurata anche la portata massica del fluido termico in circolazione mediante l'impiego di un misuratore di portata, utilizzando catene di misura riferibili a misure primarie (esp. ACCREDIA). Lo strumento deve essere installato preferibilmente a valle (ritorno) dell'impianto di circolazione dell'acqua utilizzando flange preinstallate (figura 1). Qualora l'impianto non fosse predisposto per misure di portata, possono essere utilizzate soluzioni strumentali alternative, a patto che siano comparabili in termini di incertezza. La catena di misura della portata deve garantire una incertezza di misura inferiore all'1,5% sul valore misurato.

Per la misurazione della durata degli intervalli di prova, dei tempi di lavoro e pausa dei sistemi di caricamento del combustibile, ecc., si prescrive l'utilizzo di un cronometro calibrato a 0,01 min.

La quantità di combustibile utilizzato durante la prova deve essere quantificata mediante i metodi già dettagliati al paragrafo 2.4 del presente protocollo.

AIEL
ASSOCIAZIONE
ITALIANA ENERGIE
AGROFORESTALI

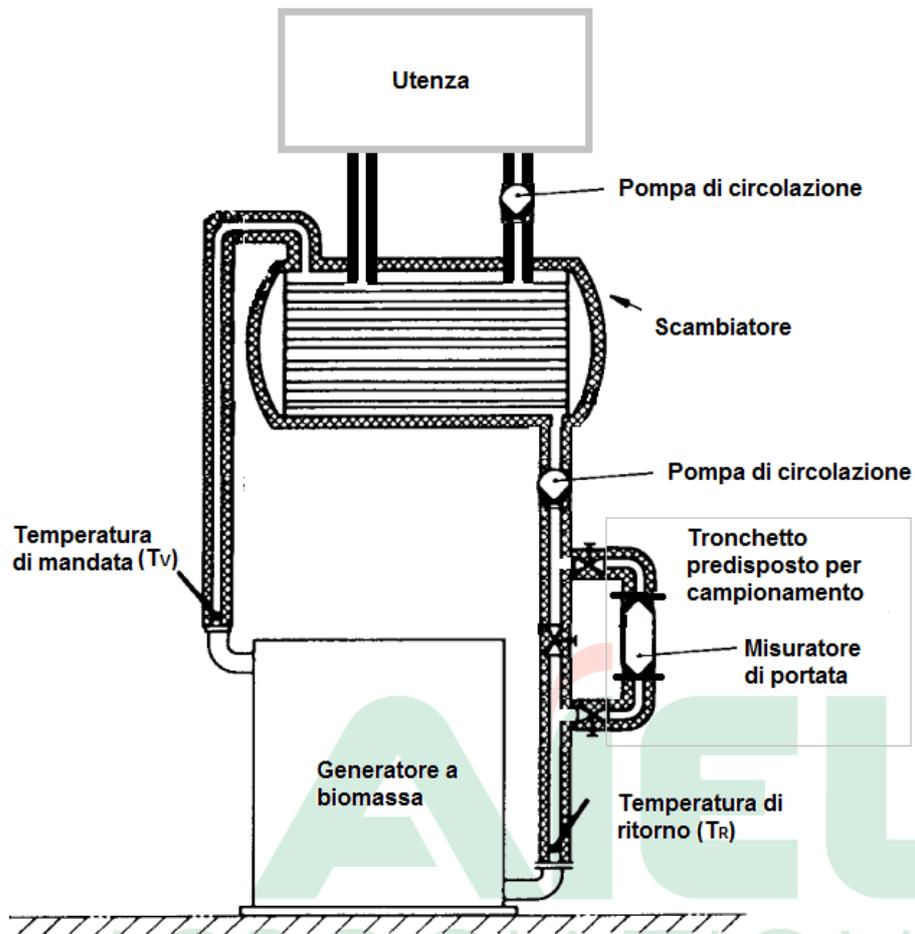


Figura 1 – Configurazione dei sistemi di misurazione sulla caldaia e il suo sistema di distribuzione per la misura diretta del rendimento termico.

2.5.2 MISURA INDIRETTA

La misura indiretta del rendimento della caldaia (η_K) è effettuata secondo quanto prescritto dalla norma UNI EN 303-5:2012 punto 5.10.3.2, e richiede la quantificazione dell'energia entrante nel sistema e di tutti i flussi energetici classificabili come perdite, i.e. il calore sensibile perso con i fumi in uscita dalla caldaia (q_A), gli incombusti (CO, OGC) presenti nei fumi (q_U), le dispersioni termiche radiative e convettive verso l'ambiente da parte delle superfici esterne della caldaia (q_S), i residui solidi carboniosi incombusti perduti con le ceneri di grata (q_B).

Il rendimento di caldaia η_K è calcolato come:

$$\eta_K = (1 - q_A - q_U - q_S - q_B) \cdot 100$$

Laddove i quattro termini q sono tutti normalizzati rispetto all'energia entrante nel sistema sotto forma di combustibile.

La quantità di combustibile utilizzato durante la prova deve essere quantificata mediante i metodi già dettagliati al paragrafo 2.4 del presente protocollo.

Le perdite sotto forma di calore sensibile dei fumi (q_A) sono quantificate sulla base della misurazione della temperatura d'uscita dei fumi dalla caldaia, della determinazione della loro composizione chimica e della loro portata massica.

La determinazione della temperatura e della portata massica deve essere eseguita in accordo con il metodo UNI 10169. Il metodo deve essere accreditato UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2005. Le misure devono essere eseguite il più vicino possibile a valle del punto di uscita dallo scambiatore termico della caldaia, ove possibile ad una distanza da quest'ultimo pari ad almeno 3 diametri del condotto (in assenza di curve intermedie, o a 2 diametri dall'ultima curva), in modo tale da garantire che temperatura e composizione dei gas siano il più possibile omogenee. In assenza di coibentazione, si consiglia di isolare termicamente il tratto di condotto compreso tra il punto di misura e l'uscita dalla caldaia (figura 2).

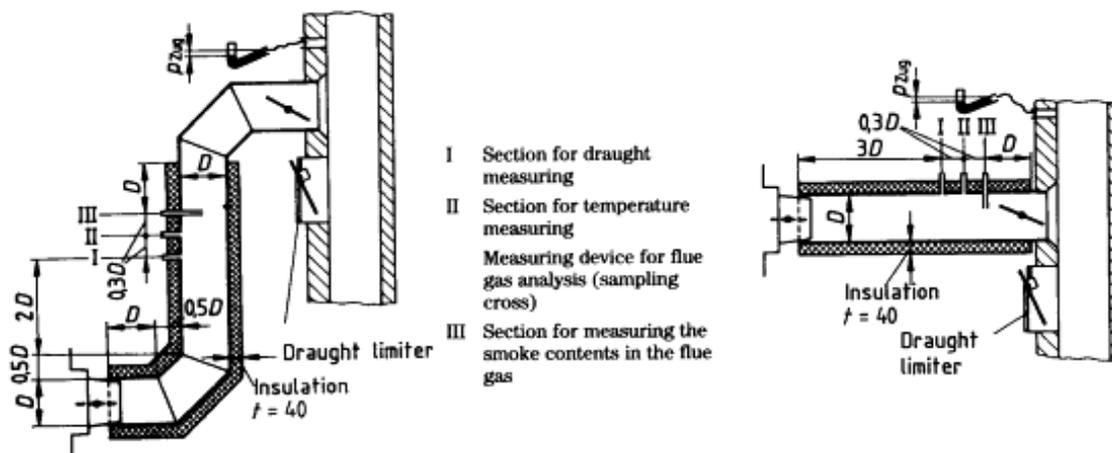


Figura 2 – Sezioni di misurazione per il metodo indiretto.

Le perdite energetiche per presenza di incombusti nei fumi in uscita dalla caldaia (q_U) sono calcolate a partire dalla determinazione della portata massica dei fumi e della % di CO e di OGC nel punto di prelievo situato a valle dell'uscita dei fumi dallo scambiatore di calore.

Le dispersioni di calore nell'ambiente attraverso le pareti esterne della caldaia (q_S) possono essere stimate per via diretta, impiegando un apposito termoflussimetro, oppure per via indiretta, sulla base della misura delle temperature delle pareti esterne e della metodologia dettagliata al paragrafo A.9.3 della norma UNI EN 304:2007. In entrambi i casi è necessario predisporre una opportuna griglia di misurazione, tale da coprire con adeguata rappresentatività tutte le varie sezioni del sistema, che possono disperdere il calore con intensità differenti.

Le perdite energetiche sotto forma di incombusti carboniosi nelle ceneri di grata (q_B) si calcolano determinando la quantità di ceneri prodotte per chilogrammo di cippato bruciato in condizioni nominali, ed il loro potere calorifico residuo. Al fine di impedire che l'ossidazione del residuo carbonioso possa continuare anche dopo la rimozione delle ceneri dalla grata (i.e. all'interno del sistema di raccolta delle ceneri), il campione destinato alla determinazione del potere calorifico residuo deve essere, ove possibile, spento in acqua.

2.6 MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI

Per la misura delle emissioni in atmosfera devono essere utilizzati i metodi prescritti dai meccanismi incentivanti e dal DLgs. 152/2006 e ss.mm.ii. Il protocollo tecnico fa quindi riferimento ai metodi di prova (e ss.mm.ii) elencati in tabella 1.

Parametri	Metodo di prova	Definizione/ descrizione
Particolato primario (PP)	UNI EN 13284-1:2003	Emissioni da sorgente fissa - Determinazione della concentrazione di polveri in basse concentrazioni
Umidità*	UNI EN 14790:2006	Emissioni da sorgente fissa - Determinazione del vapore acqueo in condotti
O₂*	UNI EN 14789 :2006	Emissioni da sorgente fissa – Determinazione della concentrazione in volume di ossigeno (O ₂) – Metodo di riferimento - Paramagnetismo
CO	UNI EN 15058:2006	Emissioni da sorgente fissa – Determinazione della concentrazione in massa di monossido di carbonio (CO) – Metodo di riferimento: spettrometria a infrarossi non dispersiva
OGC (COT)	UNI EN 12619:2013	Emissioni da sorgente fissa – Determinazione della concentrazione in massa del carbonio organico totale in forma gassosa a basse concentrazioni in effluenti gassosi. Metodo in continuo con rivelatore a ionizzazione di fiamma
Ossidi di azoto (NOx)	UNI EN 14792:2006	Determinazione degli ossidi di azoto totali mediante estrazione diretta del flusso gassoso e successiva misura con analizzatore in continuo collegato ad un registratore per l'acquisizione dei dati.
Ossidi di zolfo (SOx)	UNI EN 14791:2006	Prelievo degli ossidi di zolfo totali con sonda riscaldata. Gorgogliamento dei fumi filtrati in una soluzione contenente perossido di idrogeno per l'ossidazione dell'anidride solforosa a ione solfato, e successiva determinazione mediante cromatografia ionica.

Tabella 1 - Parametri e metodi di prova per la misura delle emissioni.

*Parametri necessari alla normalizzazione.

Il laboratorio deve essere **accreditato in accordo alla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025** per i singoli metodi.

La portata massica dei fumi di combustione è determinata sulla base della conoscenza della loro portata volumetrica e della loro temperatura e composizione nel punto di misura della portata volumetrica. La portata volumetrica dei fumi di combustione deve essere determinata secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 16911-1 e la posizione della sezione, del punto di prelievo e le dimensioni del bocchello di ispezione devono essere preferibilmente in linea con i requisiti previsti dalla norma UNI EN 15259:2008. In particolare i bocchelli di ispezione (flange) per il campionamento dovrebbero avere caratteristiche dimensionali come illustrato in figura 3 (Allegato A alla norma UNI EN 15259:2008).

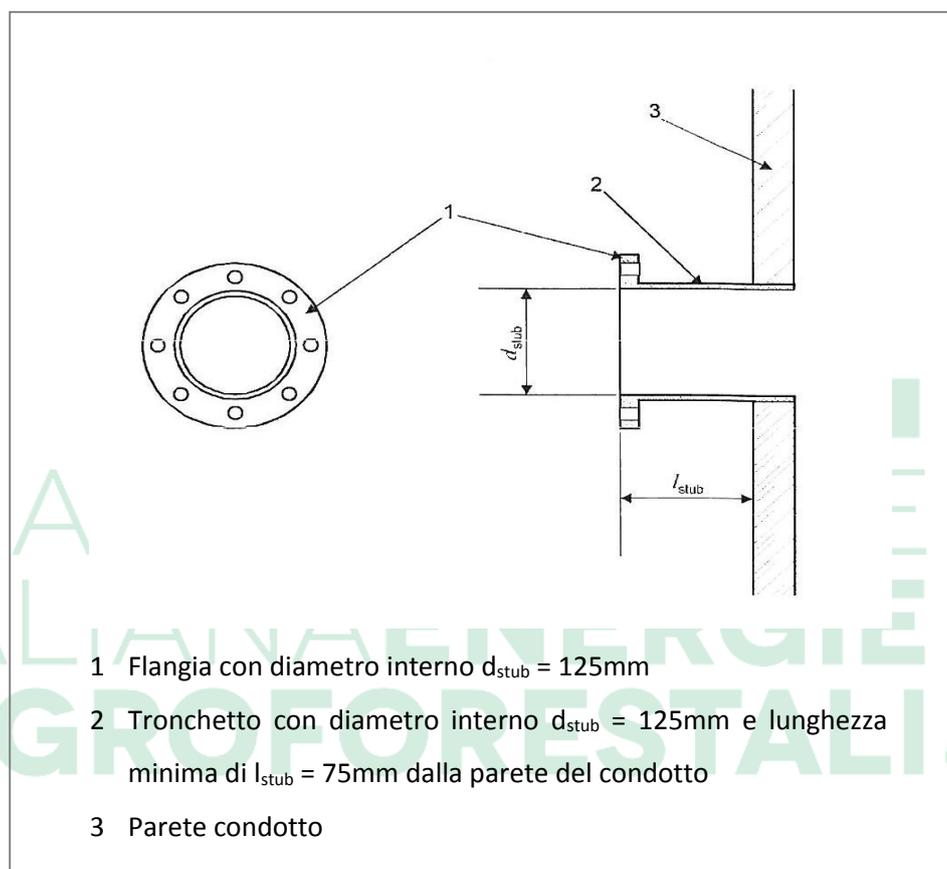


Figura 3 – Caratteristiche dimensionali delle flange secondo la UNI EN 15259:2008.

Al fine di compensare per le eventuali infiltrazioni di aria lungo il condotto tra il punto di uscita dei fumi dalla caldaia ed il punto di misurazione della portata, in corrispondenza a entrambi i punti deve essere determinata la % di O_2 , così da permettere una eventuale rinormalizzazione del valore misurato.

Qualora a seguito della prova di monitoraggio delle emissioni si riscontri il superamento dei limiti normativi limitatamente alle sole emissioni in atmosfera di particolato (e.g. a causa di un malfunzionamento dei sistemi di filtrazione), per il quale la determinazione non può essere effettuata in tempo reale in situ, è ammessa la possibilità di effettuare in un secondo tempo (dopo eventuali riparazioni) un campionamento di verifica, durante il quale la caldaia deve essere fatta operare in condizioni analoghe a quelle della precedente prova.

Nel caso in cui la seconda prova di verifica dia esito positivo, si considera valida quest'ultima; in caso contrario, il sistema viene definitivamente certificato come non conforme ai limiti emissivi.



ALLEGATO 1 - Confronto tra metodo diretto e indiretto, risultati di un test di validazione

Al fine di verificare la corrispondenza biunivoca tra risultati di rendimento termico ottenibili mediante il metodo diretto ed indiretto, la Stazione Sperimentale del Vetro ha effettuato un apposito test di validazione, operando nel rispetto di quanto dettagliato nel presente protocollo su una caldaia già installata di potenza nominale inferiore a 500 kW. In particolare:

Per la determinazione del quantitativo di energia entrante con il combustibile:

- Il potere calorifico inferiore ed il contenuto idrico del cippato sono stati fatti determinare da un laboratorio esterno in conformità a quanto previsto rispettivamente dalla norma UNI EN 14918 e UNI EN 14774.
- La portata massica di combustibile caricata in caldaia è stata calcolata a partire dalla conoscenza della massa sterica del cippato (dall'attestato di qualità del biocombustibile) e delle dimensioni e parametri di funzionamento della coclea di carico (velocità di rotazione, tempi di attività e inattività).

Ai fini della misura del rendimento termico per via diretta:

- le temperature dell'acqua subito a monte e subito a valle dello scambiatore di calore sono state acquisite in continuo mediante due termocoppie tarate di tipo K, posizionate rispettivamente nel pozzetto di ritorno e nel pozzetto di mandata dell'impianto idraulico;
- la portata dell'acqua è stata misurata ad intervalli regolari mediante un flussimetro ad ultrasuoni in un tratto di impianto subito a monte dello scambiatore di calore (ritorno).

Per la misura del rendimento termico per via indiretta:

- La portata massica umida, la temperatura e la composizione (CO, CO₂, OGC, O₂, H₂O, N₂, ecc) dei fumi di combustione sono state misurate in corrispondenza ad un punto di prelievo interno al camino.
- La temperatura dei fumi di combustione subito a valle dallo scambiatore di calore è stata misurata ad intervalli regolari per mezzo di una termocoppia tarata.

- Le dispersioni di calore verso l'ambiente sono state quantificate sperimentalmente mappando accuratamente con un termo-flussimetro (e con l'ausilio di una termo-camera) le superfici esterne accessibili della caldaia.
- Le perdite di energia sotto forma di incombusti nelle ceneri di grata sono state stimate sulla base di dati di letteratura e dall'attestato di qualità del biocombustibile impiegato per la prova.

I dati misurati e i risultati ottenuti sono riportati di seguito:

Energia entrante

Potere calorifico inferiore cippato:	$PC_{i \text{ cippato}} = 3874 \text{ kcal/kg} = 16,21 \text{ MJ/kg}$
Portata massica media cippato:	$Q_{m \text{ cippato}} = 104,9 \text{ kg/h}$
Potenza media entrante con il cippato:	$En_{in} = 406\,471 \text{ kcal/h} = 472,41 \text{ kW}$

Metodo diretto

Salto termico medio acqua:	$\Delta T_{\text{acqua}} = 6,55 \text{ }^\circ\text{C}$
Portata massica media acqua:	$Q_{m \text{ acqua}} = 48,59 \text{ m}^3/\text{h}$
Potenza utile trasferita all'acqua:	$En_{out} = 318\,182 \text{ kcal/h} = 369,80 \text{ kW}$

Metodo indiretto

Portata media fumi <u>umidicamino</u> :	$Q_{\text{fumi umidi}} = 996,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$
Portata media fumi secchi camino:	$Q_{\text{fumi secchi}} = 957,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$
T media fumi uscita scambiatore:	$T_{\text{fumiusc. scamb.}} = 248,9^\circ\text{C}$
%O ₂ fumi secchi camino:	%O ₂ fumi secchi = 12,8%
%CO ₂ fumi secchi camino:	%CO ₂ fumi secchi = 8,0%
%H ₂ O fumi umidi camino:	%H ₂ O fumi umidi = 4,0%
%N ₂ fumi secchi camino:	%N ₂ fumi umidi = 76,1%
Entalpia specifica fumi uscita scamb.:	$H_{\text{fumiusc. scamb.}} = 74,94 \text{ kcal/Nm}^3 = 313,57 \text{ kJ/Nm}^3$
Entalpia netta fumi uscita scamb.:	$H_{\text{fumiusc. scamb.}} = 74\,682 \text{ kcal/h} = 86,80 \text{ kW}$
Perdita % per calore sensibile fumi:	$q_A = 18,4\%$

Potenza dispersa dalle pareti caldaia:	$E_{\text{dispersiomi}} = 7996 \text{ kcal/h} = 9,29 \text{ kW}$
Perdita % per potenzadispersapareti:	$q_s = 2,0\%$
Produzione specifica ceneri di grata ¹ :	$\%_{\text{ceneri}} = 5\%$ della massa di cippato
Produzione oraria ceneri di grata:	$Q_{\text{m ceneri}} = 5,2 \text{ kg/h}$
Percentuale residuo incombustoceneri ² :	$\%_{\text{residuo}} = 8,5\%$ della massa di ceneri
Potere calorifico del residuo incombusto ³ :	$PC_{\text{residuo}} = 7\ 170 \text{ kcal/kg} = 30,00 \text{ MJ/kg}$
Potenza persa per incombusti nelle ceneri:	$E_{\text{ceneri}} = 3197 \text{ kcal/h} = 3,72 \text{ kW}$
Perdita % per incombusti nelle ceneri:	$q_B = 0,8\%$
% Carbonio Organico Totale fumi camino:	$OGC_{\text{fumi camino}} = 13 \text{ mg/Nm}^3$ di fumi al 12.8% O ₂
Emissione oraria netta OGCCamino:	$OGC = 0,01296 \text{ kg/h}$
Perdita % per incombusti nei fumi:	$q_U = 0,0\%$
Rendimento di caldaia stimato con il metodo DIRETTO:	$\eta_{K \text{ diretto}} = 78,3\%$
Rendimento di caldaia stimato con il metodo INDIRETTO:	$\eta_{K \text{ indiretto}} = 78,9\%$
Differenza percentuale tra le due stime:	$\Delta \text{Err} < 1\%$

¹Dato riportato sull'attestato di qualità del cippato;

² Dato ricavato dal manuale AIEL "Legna, Cippato e Pellet" come somma delle percentuali di CO₂ e C_{organico} misurate nella composizione chimica delle ceneri (cfr. pag. 24);

³ Si assume che il residuo carbonioso sia assimilabile ad un'antracite media, avente PCI $\approx 30 \text{ MJ/kg}$.

ALLEGATO 2 – Raccomandazioni per la corretta applicazione del protocollo

Di tipo impiantistico

- ✓ E' necessario garantire la presenza di 2 pozzetti di misura immersi nel fluido raggiungibili in condizioni di sicurezza, uno in mandata e uno nel ritorno, dove eseguire le misure di temperatura;
- ✓ Individuare un tratto rettilineo sul tubo a valle (ritorno) dell'impianto dove installare il sistema di misurazione della portata, sufficiente lungo da garantire condizioni di regime laminare;
- ✓ Il sistema di alimentazione, sia esso a coclea o pistone, deve consentire la taratura della portata di alimentazione della biomassa, per esempio mediante bypass della coclea.
- ✓ Il punto di campionamento delle emissioni deve essere accessibile in condizioni di sicurezza

Di tipo operativo

- ✓ E' necessaria la presenza costante per tutta la durata della prova di un caldaista in grado di gestire la caldaia;
- ✓ E' necessario garantire la dissipazione del calore prodotto dalla caldaia in modo da raggiungere e mantenere per il tempo necessario alla prova le condizioni di regime stazionario alla potenza nominale;
- ✓ E' necessario mantenere, per quanto possibile, il sistema di alimentazione della biomassa a regime costante, sia esso un sistema a coclea o un sistema a pistone;
- ✓ E' necessario mantenere, per quanto possibile, la portata d'acqua nel circuito idraulico a regime costante.

Di tipo documentale

- ✓ Certificato di classificazione della biomassa impiegata durante la prova;
- ✓ Scheda tecnica caldaia con le seguenti informazioni minime: modello, potenza nominale, matricola;
- ✓ Scheda tecnica impianto di alimentazione biomassa con le seguenti informazioni minime: modello, portata di alimentazione massima.