



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**APPLICAZIONE DELLA TECNICA DI AIR STAGING
NELL'OTTICA DI OTTIMIZZARE LE EMISSIONI
DI UNA CALDAIA ALIMENTATA A PELLETTI**

**APPLICATION OF THE AIR STAGING STRATEGY IN ORDER TO
OPTIMIZE THE EMISSIONS OF A PELLETTI-POWERED BOILER**

Relatore:

Prof. Flavio Caresana

Laureando:

Emanuele Cammalleri

Anno Accademico 2020/2021

Indice

Capitolo 1: Introduzione al problema	1
1.1 Introduzione e scopo del tirocinio.....	1
1.2 D.M. 186.....	2
1.3 Normativa UNI EN-303:5.....	5
1.4 Strumentazione utilizzata durante la prova.....	8
1.5 Le emissioni nella combustione di biomasse.....	9
1.6 Funzionamento di base della caldaia Laminox Termoboiler Omnia 32... ..	12
Capitolo 2: Ottimizzazione delle emissioni di NO_x e CO tramite la tecnica di air staging	20
2.1 Air staging e meccanismo di combustione del pellet all'interno della caldaia oggetto di studio.....	20
2.2 Evidenze ottenute dai dati sperimentali di un caso di studio simile, utili al confronto con i dati trovati e le modifiche effettuate sulla caldaia durante l'attività di tirocinio.....	22
2.2.1 Considerazioni sulle emissioni di NO _x	26
2.2.2 Considerazioni sulle emissioni di CO.....	29
2.2.3 Trade-off tra emissioni di NO _x ed emissioni di CO.....	31
2.2.4 Confronto con i dati sperimentali ottenuti a seguito delle modifiche realizzate sulla caldaia durante l'attività di tirocinio.	32
2.3 Conclusioni e ringraziamenti.....	37
Bibliografia	38
Sitografia	38

Capitolo 1: Introduzione al problema.

1.1 Introduzione e scopo del tirocinio.

Questa tesi di laurea è stata elaborata a partire dall'attività di tirocinio svolta presso l'azienda Laminox s.r.l., leader nel settore del riscaldamento domestico.

Lo scopo del tirocinio consisteva nell'ottimizzazione delle emissioni di una caldaia a pellet secondo i requisiti esplicitati nel D.M. 186 del 17 novembre 2017.

L'oggetto di studio del tirocinio e di questa tesi è la caldaia a pellet "Laminox Termoboiler Omnia 32".

La tesi è suddivisa in due capitoli:

- Nel primo capitolo sarà introdotto il problema: verranno approfonditi i requisiti per l'ottenimento della certificazione "classe 5 stelle" secondo il D.M. 186 e le modalità di svolgimento delle prove per quantificare le emissioni di inquinanti secondo la norma UNI EN-303:5. Successivamente vedremo cosa sono gli inquinanti sui quali si basano i requisiti del D.M. 186 andando a spiegare quelli che sono i loro effetti sull'uomo e sull'ambiente. Il primo capitolo si conclude, infine, con una spiegazione sul funzionamento di base della caldaia oggetto di studio.
- Nel secondo capitolo sarà spiegato il meccanismo di combustione del pellet e sarà analizzata la tecnica di *air staging*. Questo sarà fatto partendo da considerazioni fatte sui dati sperimentali ottenuti da un caso di studio simile, le quali saranno successivamente utili per il confronto con le evidenze ottenute dai dati sperimentali raccolti durante l'attività di tirocinio.

1.2 D.M. 186.

Il 7 novembre 2017 è stato emanato un decreto dal Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare in cui è riportato *il regolamento recante la disciplina dei requisiti, delle procedure e delle competenze per il rilascio di una certificazione ambientale ai generatori di calore alimentati a biomasse combustibili solide*¹.

Il decreto in questione ha lo scopo di classificare i generatori di calore alimentati a biomasse in base alle loro emissioni.

La classificazione è basata su delle classi di emissioni. La classe di nostro interesse è la "Classe 5 stelle", che rappresenta la classe a più basse emissioni e quella nella quale si vuole portare la caldaia oggetto di studio.

Classe 5 stelle					
Tipo di generatore	PP (mg/Nm ³)	COT (mg/Nm ³)	NOx (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	η (%)
Caminetti aperti	25	35	100	650	85
Camini chiusi, inserti a legna	25	35	100	650	85
Stufe a legna	25	35	100	650	85
Cucine a legna	25	35	100	650	85
Stufe ad accumulo	25	35	100	650	85
Stufe, inserti e cucine a pellet - Termostufe	15	10	100	250	88
Caldaie	15	5	150	30	88
Caldaie (alimentazione a pellet o a cippato)	10	5	120	25	92

Tabella 1.1

Nella Tabella 1.1 troviamo i valori massimi delle emissioni, espressi in mg/Nm^3 normalizzati al 13% di O₂, al fine di rientrare nella "Classe 5 stelle", per i vari generatori di calore nelle condizioni di potenza nominale.

Riportiamo, per il caso di una caldaia alimentata a pellet, tali valori di seguito:

- 10 mg/Nm^3 per le emissioni di Particolato Primario (PP).
- 5 mg/Nm^3 per le emissioni di Carbonio Organico Totale (COT/OGC).
- 120 mg/Nm^3 per le emissioni di Ossidi di Azoto (NO_x).
- 25 mg/Nm^3 per le emissioni di Monossido di Carbonio (CO).

Inoltre, è anche riportato il valore minimo del rendimento η pari al 92%.

¹ Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, Decreto 7 novembre 2017, n°186

I produttori di generatori di calore possono richiedere una certificazione che classifica il loro prodotto secondo una di queste classi. Tale certificazione è rilasciata da un organismo notificato, che andrà prima a eseguire delle prove per attestare il livello di emissioni del generatore di calore in questione.

Le modalità di svolgimento della prova sono specificate dal decreto, come si vede dalla Tabella 1.2, quest'ultimo fa riferimento alla norma UNI EN 303:5 nel caso delle caldaie a pellet.

Tipo di generatore	PP	COT	NOx	CO	η
Stufe, caminetti, Cucine	UNI CEN/TS 15883			Specifiche norme tecniche (UNI EN) di generatore	Specifiche norme tecniche (UNI EN) di generatore
Stufe, caminetti, Cucine (alimentazione a pellet)	UNI CEN/TS 15883			Specifiche norme tecniche (UNI EN) di generatore	Specifiche norme tecniche (UNI EN) di generatore
Caldaie	UNI EN 303-5			UNI EN 303-5	UNI EN 303-5
Caldaie (alimentazione a pellet o a cippato)	UNI EN 303-5			UNI EN 303-5	UNI EN 303-5

Tabella 1.2

Per le aziende che lavorano in questo settore risulta fondamentale ottenere queste certificazioni per i loro prodotti, questo perché negli ultimi anni:

- Sono stati introdotti limiti sulle emissioni di inquinanti sempre più stringenti per l'acquisto e l'utilizzo di generatori di calore a biomassa legnosa.
- Sono stati introdotti incentivi per l'acquisto di stufe e caldaie a pellet appartenenti alla "Classe 4 stelle" o alla "Classe 5 stelle".
- Il mercato si sta spostando sempre più su prodotti eco-friendly.

Andiamo a riportare in Figura 1.1 gli ultimi valori trovati, dall'ente IMQ, delle emissioni di CO, OGC ed NO_x per la caldaia oggetto di studio alla potenza nominale di 32 KW.

CO test results / Risultati dei test CO		Unit	Test 1	Test 2	Mean value	Uncertainty
CO emission at 13% O2 Emissioni di CO al 13% O2	CO	mg/Nm ³	98	99	99	1
OGC test results / Risultati dei tests OGC		Unit	Test 1	Test 2	Mean value	Uncertainty
OGC emission at 13% O2 Emissioni di OGC al 13% O2	OGC	mg/Nm ³	0,9	1,0	0,9	1,5
NOx test results / Risultati dei tests NOx		Unit	Test 1	Test 2	Mean value	Uncertainty
NOx emission at 13% O2 Emissioni di NOx al 13% O2	NOx	mg/Nm ³	104	104	104	3

Figura 1.1

Per quanto riguarda il PP, questo è espresso come concentrazione delle polveri ed è riportato in Figura 1.2.

Dust concentration at 13% O ₂ Concentrazione della polveri al 13% O ₂	c _{12,vol} mg/Nm ³	3.8	0.7

Figura 1.2

Il rendimento è invece riportato in Figura 1.3.

Boiler efficiency Rendimento della caldaia	η _k	%	91,8	91,7	91,7	1,0

Figura 1.3

Come si vede dai dati riportati in Figura 1.1, 1.2 e 1.3 la caldaia in questione, ad oggi, non rientrerebbe nella “classe 5 stelle”. Questo per via dell’eccessivo valore di CO, il quale si attesta ad un valore medio di 99 mg/Nm³.

1.3 Normativa UNI EN-303:5.

Le prove eseguite sulla caldaia oggetto di studio, al fine di valutare l'andamento delle emissioni e della temperatura, sono state svolte nel rispetto della norma UNI EN-303:5².

Infatti, il D.M. 186 che stabilisce per ogni generatore di calore le modalità di svolgimento delle prove, indica come norma di riferimento per le caldaie alimentate a pellet proprio la UNI EN-303:5.

La procedura, attraverso il quale la caldaia vede riconosciuto una particolare certificazione ambientale, prevede che il produttore della caldaia richieda ad un organismo notificato di effettuare le prove secondo la norma di cui sopra e individui, in seguito all'analisi dei risultati ottenuti, la classe pertinente di qualità. L'ente, poi, rilascerà la relativa certificazione ambientale entro nove mesi dalla ricezione della richiesta.

Si considerino ora le condizioni di prova descritte all'interno della norma.

Secondo la norma UNI EN-303:5 il banco di prova deve essere installato come indicato nella sezione A.4 della EN 304:2017 e l'efficienza deve essere determinata entro una tolleranza di $\pm 3\%$.

Innanzitutto, la prova ha inizio solo una volta che l'apparecchio è stato portato nelle condizioni di esercizio, inoltre il tiraggio durante l'esecuzione della prova non deve variare dal valore specificato dal produttore di oltre $\pm 3,0 Pa$.

Una volta raggiunte le condizioni di esercizio la durata prevista della prova, alla potenza termica nominale deve essere di sei ore.

² UNI EN 303-5:2021, 20 maggio 2021

Durante le prove alla potenza termica nominale, il valore medio della temperatura di mandata deve essere compreso tra 70 °C e 90 °C. La differenza di temperatura media tra mandata e ritorno deve essere compresa tra 10 K e 25 K e inoltre, durante la prova, deve sussistere la seguente relazione tra temperatura dell'acqua di mandata, di ritorno e temperatura ambiente:

$$\frac{t_V + t_R}{2} - t_L \geq 35,0 K$$

dove t_V rappresenta la temperatura di mandata, t_R è la temperatura di ritorno e t_L la temperatura ambiente, le quali sono espresse in °C.

La norma ,inoltre, indica la modalità attraverso cui determinare la potenza termica nominale, ossia la potenza termica al focolare che rappresenta il calore sviluppato nell'unità di tempo durante la combustione. Questa può essere determinata direttamente nel circuito della caldaia o indirettamente per mezzo di uno scambiatore di calore.

La misura diretta della potenza termica utile consiste nella determinazione della portata massica di acqua fredda che entra nel circuito della caldaia e l'aumento della temperatura subito dall'acqua considerando la sua temperatura di uscita.

Altrimenti, la misura indiretta prevede innanzitutto di considerare il calore prodotto dalla caldaia e ceduto all'acqua fredda per mezzo di uno scambiatore di calore. Il calore ricevuto da quest'ultimo viene calcolato considerando la portata dell'acqua e il suo incremento di temperatura.

Alla luce del fatto che il fluido termovettore riscaldato dai fumi della combustione non può cedere tutto il calore al fluido da riscaldare nello scambiatore di calore per via delle dispersioni che si hanno nel passaggio del fluido dalla caldaia allo scambiatore, occorre considerare anche tali dispersioni termiche: a tal fine si utilizzano delle curve di dispersione termica.

La potenza termica della caldaia è quindi determinata come la somma delle due quantità di calore.

Il rendimento della caldaia secondo la normativa può essere determinato tramite un metodo diretto o attraverso un secondo metodo indiretto.

Nel metodo diretto il rendimento della caldaia è determinato come il rapporto tra la potenza termica nominale e la potenza termica in ingresso considerante tutto il potenziale energetico del combustibile, come:

$$\eta = \frac{P}{Q_B} \cdot 100\% ,$$

Nel metodo indiretto, il rendimento della caldaia viene invece determinato tenendo conto di tutte le dispersioni della potenza termica al focolare sprigionatasi con la combustione del pellet, pari a:

$$\eta = (1 - p_1 - p_2 - p_3 - p_4) \cdot 100\%$$

dove p_1 rappresenta la perdita di calore sensibile dei prodotti della combustione, p_2 la perdita per combustione incompleta, p_3 la perdita per irraggiamento, convezione e conduzione, mentre p_4 è la perdita dovuta al combustibile incombusto, ossia la cenere.

Aggiungiamo che la perdita maggiore tra quelle elencate è p_1 , la quale è legata alla differenza di temperatura tra quella dei fumi in uscita alla caldaia e la temperatura ambiente.

1.4 Strumentazione utilizzata durante la prova.

Per osservare in tempo reale come variano temperatura dei fumi in uscita, rendimento della caldaia e concentrazioni di O_2 , CO_2 , NO_x , CO è necessario un analizzatore fumi.

A tale scopo viene inserito il puntale di una sonda per fumi nel canale dei gas di scarico ad un'opportuna altezza specificata dalla normativa e in modo tale che il sensore si trovi al centro del flusso dei fumi, ossia dove viene raggiunta la massima temperatura.



Figura 1.4: Nell'immagine di sinistra è presente la configurazione di set-up per l'esecuzione della prova, nell'immagine di destra si vede la sonda dei fumi inserita all'interno della canna fumaria.

1.5 Le emissioni nella combustione di biomasse.

Le emissioni di inquinanti da impianti di combustione derivano:

- dal combustibile, qualora contenga una sostanza inquinante che rimane inalterata o una sostanza che a seguito della combustione si trasforma producendo composti inquinanti come, ad esempio, gli ossidi di azoto NO_x ;
- da una combustione anomala. Questo accade quando la combustione risulta incompleta e di conseguenza si generano sostanze non completamente ossidate come, ad esempio, il monossido di carbonio CO , oppure quando si ha una combustione non ben controllata, ad esempio, quando la temperatura di fiamma è eccessivamente elevata e/o si ha un elevato eccesso d'aria, in questo caso si formeranno gli ossidi di azoto di origine termica;
- da una combustione normale. Infatti, anche con una combustione ottimale si ha la presenza di inquinanti, come il particolato.

Analizziamo ora gli inquinanti sui quali si basano i requisiti del D.M. 186, ovvero CO , COT, NO_x e PP.

CO:

Il monossido di carbonio (CO) si forma per combustione incompleta di qualunque sostanza organica, ovvero quando a seguito della combustione del carbonio questo non si ossida completamente.

Questo gas è incolore, insapore e inodore e proprio per queste caratteristiche può essere inalato in modo impercettibile, fino a raggiungere nell'organismo concentrazioni letali³.

COT:

Sotto il termine di carbonio organico totale (OGC/COT) si identificano le sostanze organiche sotto forma di gas e vapore.

³

<https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterioreallegato_2_alleg.pdf>

NO_x:

In atmosfera sono presenti diverse specie chimiche di ossidi di azoto (NO_x), ma solamente due sono di interesse dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico:

- l'ossido di azoto (NO);
- il biossido di azoto (NO₂).

La tossicità del monossido di azoto è limitata, al contrario quella del biossido di azoto risulta notevole. Infatti, una sua inalazione determina una forte irritazione delle vie aeree e può portare a conseguenze anche gravi. Inoltre, l'NO₂ contribuisce alla formazione dello smog fotochimico e concorre al fenomeno delle piogge acide. Durante la combustione si possono avere tre meccanismi di formazione degli NO_x a cui corrispondono tre classi distinte di NO_x:

- Thermal NO_x, i quali si formano in condizioni di elevate temperature e in presenza di eccessi d'aria;
- Fuel NO_x, i quali si formano dall'azoto proveniente dalla struttura chimica del combustibile;
- Prompt NO_x, che si forma durante la parte iniziale della combustione, dove si ha una forte presenza di sostanze intermedie aggressive, le quali attaccano anche l'azoto⁴.

Tra questi gli NO_x di maggiore interesse sono quelli di origine termica (Thermal NO_x), sia perché sono i più pericolosi per l'inquinamento dell'atmosfera, sia perché la loro formazione può essere mitigata tramite l'implementazione corretta di tecniche di air staging, poi trattate nel capitolo 2.

⁴ <<https://it.wikipedia.org/wiki/NOx>>

PP:

Il particolato primario (PP) è una componente del particolato atmosferico, ovvero una sospensione di particelle solide e liquide in aria ambientale.

Il particolato atmosferico è una miscela di particolato primario e di particolato secondario. Il particolato primario rappresenta la frazione grossolana ed è emesso direttamente come tale da una sorgente, mentre il particolato secondario è originato da complessi fenomeni chimico-fisici, che avvengono in atmosfera su grande scala spaziale e temporale⁵.

⁵ <http://www.comune.torino.it/ambiente/aria/faq_aria/cos-il-particolato.shtml>

1.6 Funzionamento di base della caldaia Laminox Termoboiler Omnia 32.

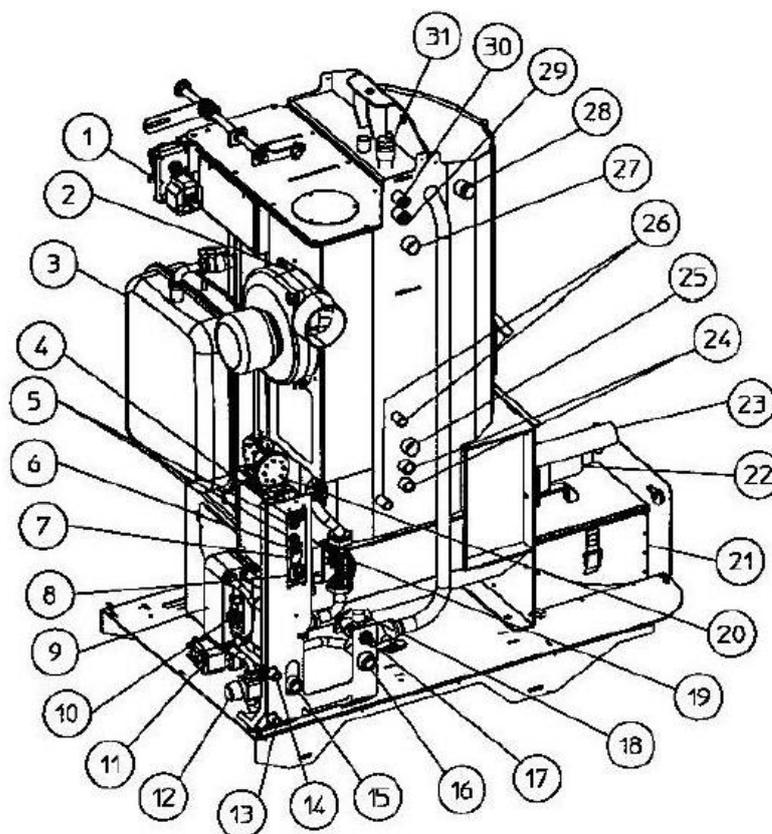
In questo paragrafo andremo ad elencare i componenti più importanti della caldaia oggetto di studio, mostrata in Figura 1.5, nonché spiegheremo quello che è il suo funzionamento di base.



Figura 1.5: Termoboiler Omnia 32

Il Termoboiler Omnia 32 è una caldaia alimentata a pellet, che ha lo scopo di generare, a seguito della combustione, dei fumi caldi. Questi vanno a riscaldare l'acqua contenuta all'interno della caldaia seguendo un determinato percorso.

In Figura 1.6 riportiamo l'assieme dei componenti che costituiscono la caldaia.



1	MOTORIDUTTORE PULIZIA TURBOLATORI	9	SCAMBIATORE A PIASTRE	17	VALVOLA DI SICUREZZA	25	INGRESSO AUSILIARIO
2	MOTORE FUMI	10	FLUSSOSTATO	18	TRASDUTTORE	26	COLLEGAMENTO PANNELLO SOLARE
3	VASO ESPANSIONE	11	MOTORIDUTTORE COCLEA CENERE	19	CIRCOLATORE	27	USCITA AUSILIARIA
4	MORSETTO PER TERMOSTATO ESTERNO	12	VALVOLA MISCELATRICE	20	DEPRESSIMETRO	28	ANODO DI MAGNESIO
5	RIARMO MANUALE	13	USCITA ACQUA SANITARIA	21	VALIGETTA CENERE	29	POZZETTO SICUREZZA TERMICA
6	PORTA SERIALE	14	INGRESSO ACQUA SANITARIA	22	MOTORE PULIZIA BRACIERE	30	POZZETTO SONDA ACQUA
7	INTERRUTTORE GENERALE	15	RITORNO IMPIANTO	23	INGRESSO ARIA PRIMARIA	31	VALVOLA JOLLY
8	PRESA DI ALIMENTAZIONE	16	MANDATA IMPIANTO	24	POZZETTI AUSILIARI		

Figura 1.6

Di seguito andremo a descrivere il funzionamento della caldaia seguendo:

- il percorso del pellet;
- il percorso dei fumi;
- il percorso dell'acqua.

Percorso del pellet:

La caldaia è dotata di un serbatoio per contenere il pellet. Una volta che quest'ultima entra in funzione, il pellet viene "pescato" da una coclea, la quale determina la risalita del pellet che successivamente verrà fatto cascare dall'alto all'interno del braciere.

Possiamo vedere il percorso del pellet, in verde, in Figura 1.7.

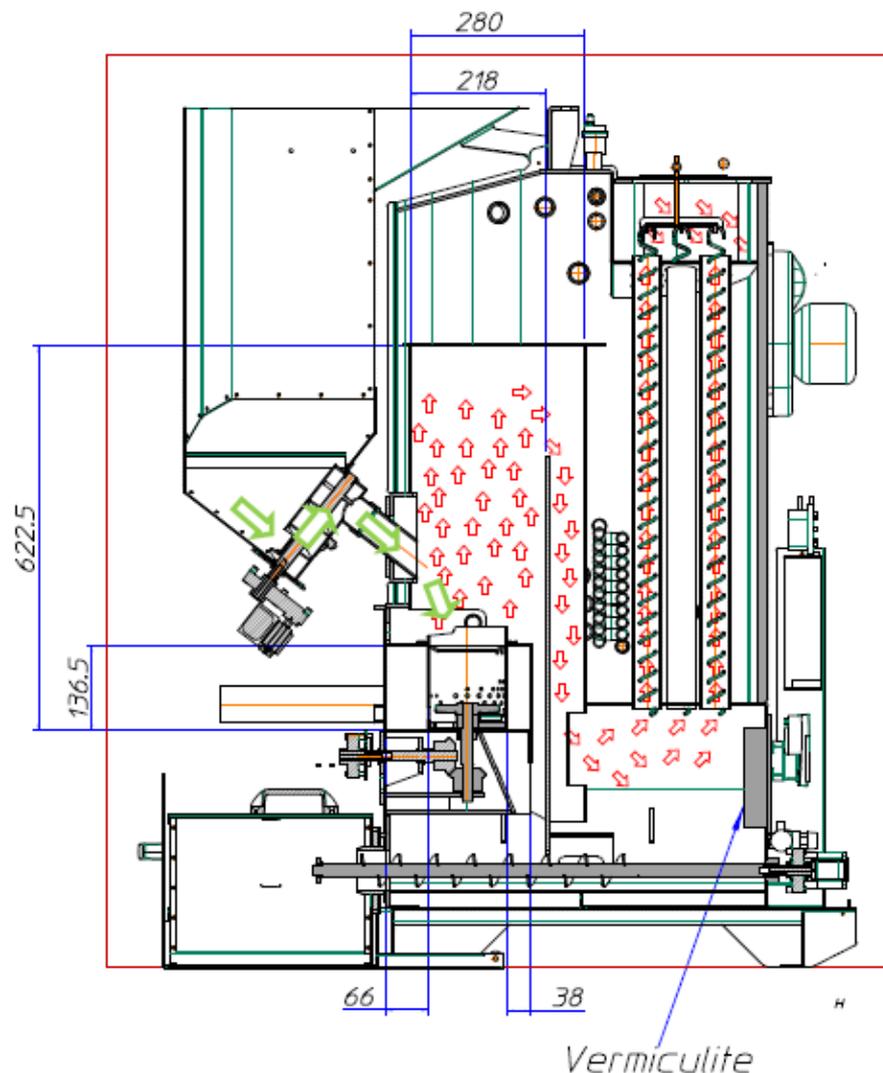


Figura 1.7: In verde il percorso del pellet, in rosso il percorso dei fumi.

Il pellet, una volta all'interno del braciere, prenderà parte alla combustione qualora questa sia stata già avviata, altrimenti quest'ultima sarà innescata da una candela costituita da una resistenza elettrica che, scaldandosi, permette l'inizio del processo.

Percorso dei fumi:

Il percorso dei fumi viene mostrato all'interno della Figura 1.7 in colore rosso.

In particolare, i fumi vengono generati in corrispondenza della camera di combustione a seguito della combustione del pellet con l'aria comburente.

In Figura 1.8 è mostrato uno spaccato della camera di combustione dove è possibile osservare:

- il condotto di aspirazione dell'aria comburente (1);
- il braciere (2);
- il sistema di pulizia del braciere (3);
- lo scivolo che collega il braciere con il sistema di accumulo delle ceneri (4);
- la candela di accensione (5).

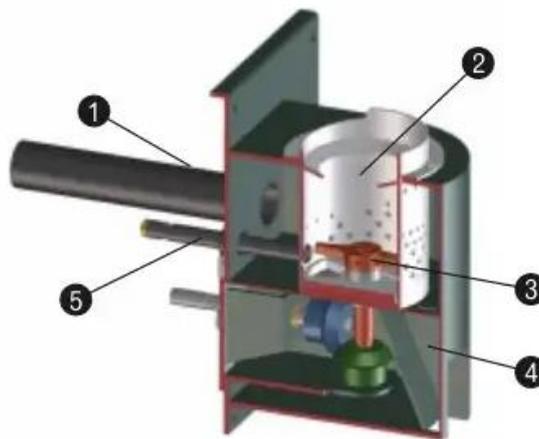


Figura 1.8

L'ingresso di aria comburente all'interno della camera di combustione è permesso grazie all'aspiratore fumi, una macchina dinamica che ha lo scopo di creare una zona di depressione in corrispondenza della camera di combustione e quindi garantire l'ingresso dell'aria per differenza di pressione.

L'aspiratore fumi viene mostrato nell'assieme di Figura 1.6 come componente numero 2 e di seguito nella Figura 1.9 dove sono mostrata due sue fotografie.

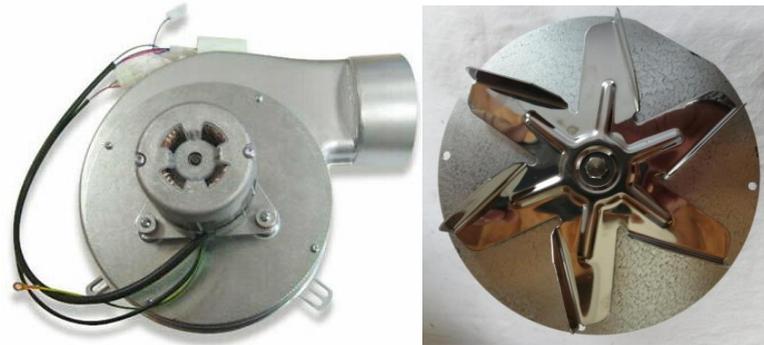


Figura 1.9: A sinistra l'aspiratore fumi, a destra invece è mostrata la conformazione delle pale.

Una volta entrata all'interno della camera di combustione, l'aria comburente passerà per la foratura presente sul braciere alimentando la combustione.

Il braciere ed in particolare la distribuzione dei fori presenti su di esso sono di fondamentale importanza per il nostro studio, in quanto influenzano in maniera importante le emissioni di inquinanti.

Dalla Figura 1.10, notiamo due distinte distribuzioni di fori, le quali vanno a formare delle "corone" sul corpo cilindrico del braciere.

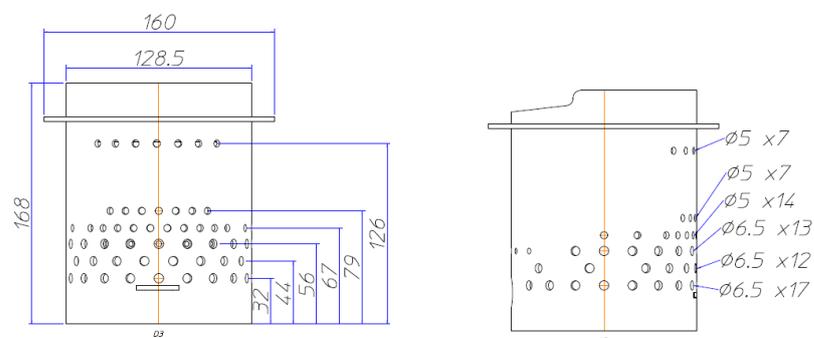


Figura 1.10

Le corone di fori presenti nella parte bassa del corpo cilindrico del braciere permettono l'ingresso dell'aria primaria (PA), invece, la corona di fori, che si trova sulla parte alta del corpo cilindrico del braciere, permette l'ingresso dell'aria secondaria (SA).

I fori dell'aria primaria e secondaria sono degli ugelli il cui scopo è quello di distribuire l'aria comburente rispettivamente nella zona primaria e secondaria di combustione. Infatti, grazie a questa distribuzione di fori è possibile dividere la combustione in due fasi:

- essiccazione e gassificazione del pellet, la quale avviene nella zona primaria grazie all'apporto di PA;
- combustione dei gas combustibili generati dalla gassificazione del pellet, la quale avviene nella zona secondaria grazie all'apporto di SA.

Una volta generati i fumi caldi a seguito della combustione, questi vengono richiamati dall'aspiratore fumi verso la canna fumaria. Durante il percorso, rappresentato in rosso in Figura 1.7, che porta i fumi dalla camera di combustione alla canna fumaria, questi scambiano calore con l'acqua presente all'interno della caldaia.

In questa fase è di fondamentale importanza, al fine di garantire un elevato rendimento della macchina, rallentare il flusso dei fumi. Questo consente di aumentare il tempo per il quale i fumi scambiano calore con l'acqua: ciò determinerà una riduzione della temperatura di uscita dei fumi T_{uf} e della perdita di calore sensibile dei prodotti della combustione, la quale è proporzionale alla differenza $(T_{uf} - T_{amb})$ ed è la più importante per queste applicazioni.

A tale scopo, all'interno delle tubazioni si inseriscono dei turbolatori, i quali si interpongono al flusso dei fumi.

I turbolatori hanno una geometria a spirale, rappresentata in Figura 1.11.

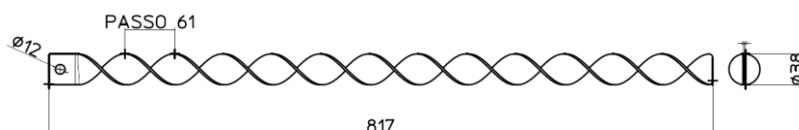


Figura 1.11: Turbolatore a spirale.

Percorso dell'acqua:

Il Termoboiler Omnia 32 presenta un accumulo d'acqua che viene preriscaldato e mantenuto ad una temperatura di almeno 70°C anche in condizione di non funzionamento dell'impianto. Questo in modo tale da rispondere immediatamente alla richiesta di acqua calda da parte dell'impianto di riscaldamento o di acqua sanitaria.

L'accumulo d'acqua presente all'interno della caldaia è ben visibile in Figura 1.12.

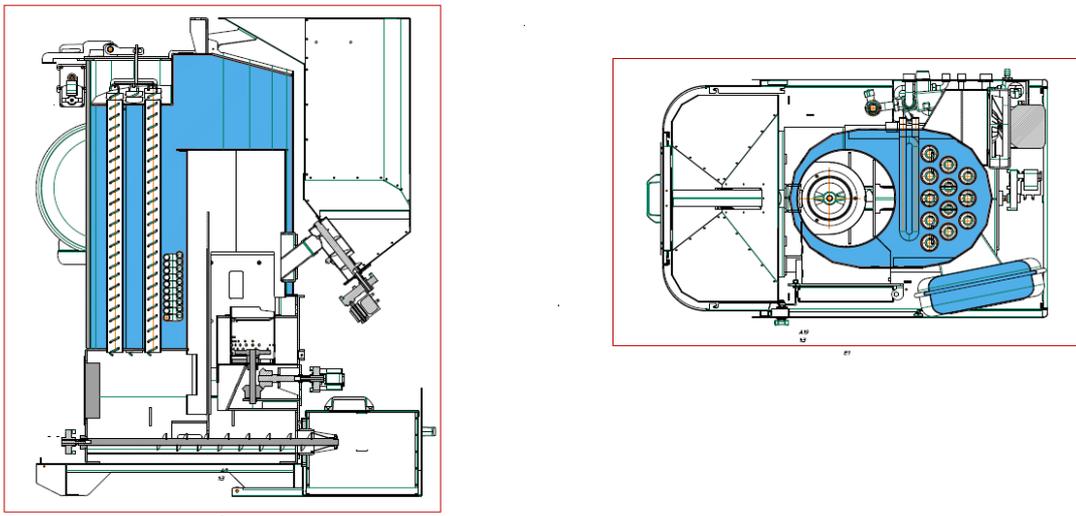


Figura 1.12

In Figura 1.13 è mostrato il circuito idraulico della caldaia.

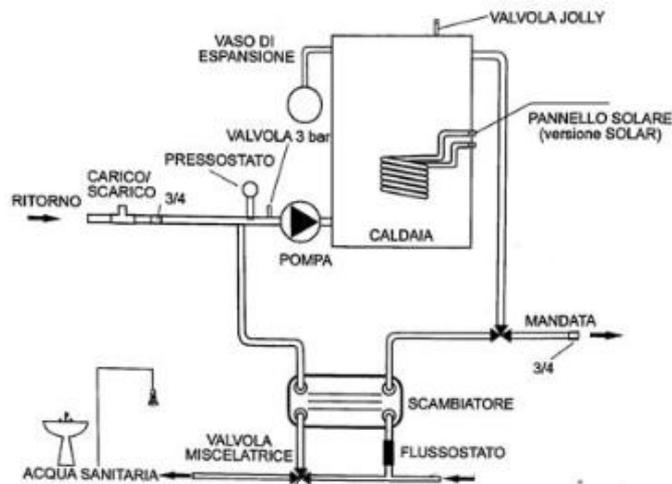


Figura 1.13

Descriviamo il percorso dell'acqua all'interno dell'impianto della caldaia a partire dal punto di ritorno.

Grazie alla pompa è possibile la circolazione dell'acqua all'interno dell'impianto di riscaldamento. La prevalenza che fornisce la pompa, serve a vincere le sole perdite di carico presenti nell'impianto, in quanto questo è un circuito chiuso.

A partire dal punto di ritorno, l'acqua fredda viene richiamata dalla pompa ed entra all'interno della caldaia, dove scambia calore con i fumi caldi prodotti dalla combustione del pellet. Prima dell'ingresso all'interno della caldaia è posto un pressostato di sicurezza e una successiva valvola di sicurezza utile in caso di malfunzionamento del pressostato.

Notiamo, inoltre, la presenza di un vaso di espansione a membrana, che ha lo scopo di garantire l'espansione dell'acqua a seguito di un suo aumento di temperatura al fine di evitare un aumento eccessivo di pressione.

Troviamo anche una valvola di sfogo (valvola Jolly), il cui scopo è quello di liberare l'aria che entra all'interno dell'impianto.

Una volta uscita dalla caldaia, l'acqua calda giunge ad una valvola deviatrice e da qui indirizzata alla mandata e/o all'interno di uno scambiatore a piastre per la produzione di acqua calda sanitaria.

All'interno dello scambiatore a piastre, utile alla produzione di acqua calda sanitaria, entra parte dell'acqua corrente fredda, che scambia calore con l'acqua calda in uscita dalla caldaia, riscaldandosi.

L'acqua sanitaria in uscita sarà, infine, prodotta dalla miscelazione con l'acqua calda in uscita dallo scambiatore e la restante parte di acqua corrente fredda. Il processo per la produzione di acqua calda sanitaria è regolato attraverso la valvola miscelatrice presente in Figura 1.13, questo al fine di ottenere acqua sanitaria alla temperatura desiderata.

Capitolo 2: Ottimizzazione delle emissioni di NO_x e CO tramite la tecnica di air staging.

2.1 Air staging e meccanismo di combustione del pellet all'interno della caldaia oggetto di studio.

Per garantire una completa combustione della biomassa con basse emissioni e scorie ridotte, la quantità e il metodo di alimentazione dell'aria comburente rivestono un'importanza fondamentale.

L'air staging è una tecnica per la riduzione di inquinanti e si basa sulla realizzazione di due zone di combustione, che sono spazialmente e temporalmente disgiunte: una zona di combustione primaria con carenza di ossigeno ed una zona di combustione secondaria con eccesso di ossigeno.

Nella zona primaria avviene la combustione primaria, composta da due fasi: la fase di essiccazione e la fase di gassificazione della legna⁶. Durante l'essiccazione, viene rilasciata l'acqua rimanente che evapora dalla biomassa legnosa. A quel punto il pellet essiccato viene scomposto in combustibile, componenti volatili e carbone di legna. La combustione primaria richiede un input energetico e si verifica con una proporzione d'aria inferiore al rapporto stechiometrico⁷.

Il risultato utile della combustione primaria è la produzione di gas combustibili, i cui componenti principali sono monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H₂). Questi gas combustibili prendono parte alla combustione secondaria ossidandosi e liberando una gran quantità di calore. Per ossidare completamente i gas combustibili è importante avere un eccesso d'aria nella zona secondaria.

⁶ <<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/gasification>>

⁷ <https://en.wikipedia.org/wiki/Staged_combustion>

Sono stati individuati due inconvenienti nell'applicare questa tecnica:

- il primo riguarda la significativa formazione di CO nel caso in cui gli ugelli per l'aria non fossero ben allocati; infatti, è molto importante garantire un'adeguata miscelazione tra l'aria secondaria e i gas di combustione per poter ossidare completamente il CO prodotto dalla gassificazione;
- il secondo inconveniente è da attribuire all'incremento di carbonio nelle ceneri di fondo.

Nel capitolo successivo ci focalizzeremo sulla tecnica di air staging nell'ottica di ridurre le emissioni di CO ed NO_x. Non tratteremo del particolato primario (PP) né tanto meno del carbonio organico totale (OGC/COT), questo perché la caldaia oggetto di studio presenta i suoi limiti principale nell'emissione di CO, come già detto nel paragrafo 1.2.

D'altro canto, è fondamentale trattare la situazione degli ossidi di azoto (NO_x) in quanto, come vedremo, esiste una situazione di trade-off tra emissioni di CO ed emissioni di NO_x.

2.2 Evidenze ottenute dai dati sperimentali di un caso di studio simile, utili al confronto con i dati trovati e le modifiche effettuate sulla caldaia durante l'attività di tirocinio.

In mancanza di sufficienti e precise prove sperimentali cerchiamo di cogliere e comprendere il fenomeno a partire da dati sperimentali ottenuti da terzi.

In particolare, andiamo a considerare i dati ottenuti dalla ricerca di Zadavec et al.⁸, il cui caso di studio è una caldaia a pellet per uso domestico con potenza di 35kW. Durante l'attività di ricerca in questione è stato effettuato uno studio parametrico per la determinazione dell'impatto dei parametri di processo sulla quantità di emissioni prodotte e sull'efficienza di combustione. L'obiettivo principale era quello di osservare il processo di combustione al variare del flusso di aria primaria (PA), del flusso di aria secondaria (SA) e dell'eccesso d'aria complessivo. Tutti gli altri parametri di processo quali la velocità e la frequenza di alimentazione del carburante, il preriscaldamento dell'aria, il tiraggio del camino, nonché tutti i parametri di processo legati alla geometria erano gli stessi per tutte le variazioni considerate.

Quanto descritto fino ad ora coincide perfettamente con quanto svolto durante l'attività di tirocinio; infatti, il nostro scopo era quello di ottimizzare l'efficienza della combustione e ridurre gli inquinanti prodotti da una caldaia a pellet ad uso domestico, con potenza nominale di 32 kW e design costruttivo molto simile a quella dello studio sopracitato, tramite la tecnica di air staging, ovvero variando il flusso di aria primaria, secondaria e l'eccesso d'aria.

Nella Tabella 2.1 sono riportate in dettaglio le variazioni del rapporto PA/SA e dell'eccesso di aria per ciascun caso considerato nell'ambito dello studio parametrico ottenuto da Zadavec et alii. All'interno di tale ricerca sono stati affrontati nove diversi casi, che differivano per il rapporto PA/SA e l'eccesso di aria complessivo, quest'ultimo espresso come concentrazione di O₂ nei fumi.

⁸ Tomas Zadavec, Boštjan Rajh, Filip Kokalj, Niko Samec, *Influence of air staging strategies on flue gas sensible heat losses and gaseous emissions of a wood pellet boiler: An experimental study*, Renewable Energy, Volume 178,2021, Pages 532-548

Per i due parametri di processo considerati sono stati scelti tre valori: High (H), Medium (M) e Low (L), dai quali otteniamo nove diversi casi riportati nella Tabella 2.1.

Rapporto PA/SA medio		Aria media in eccesso (concentrazione di O ₂ nei fumi)				
		Alto	9,68%	medio	7,26%	Basso
Alto	1,41	Caso 1 alto (C1H)	Caso 1 medio (C1M)	Caso 1 basso (C1L)		
medio	0,98	Caso 2 alto (C2H)	Caso 2 medio (C2M)	Caso 2 basso (C2L)		
Basso	0,56	Caso 3 alto (C3H)	Caso 3 medio (C3M)	Caso 3 basso (C3L)		

Tabella 2.1.

Riportiamo quindi nella Figura 2.1 gli andamenti delle emissioni che maggiormente ci interessano, ovvero CO ed NO_x, per i tre valori del rapporto PA/SA ed in funzione dell'eccesso d'aria.

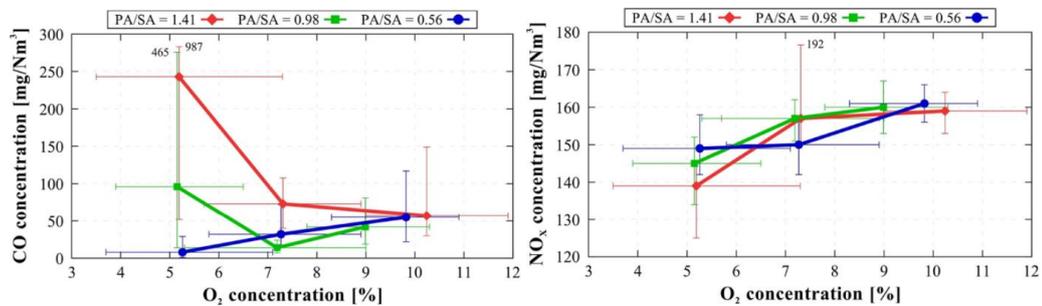


Figura 2.1

Riportiamo, inoltre, nella Figura 2.2 un diagramma che ci mostra il valore medio della concentrazione di CO e della concentrazione di NO_x in funzione del caso.

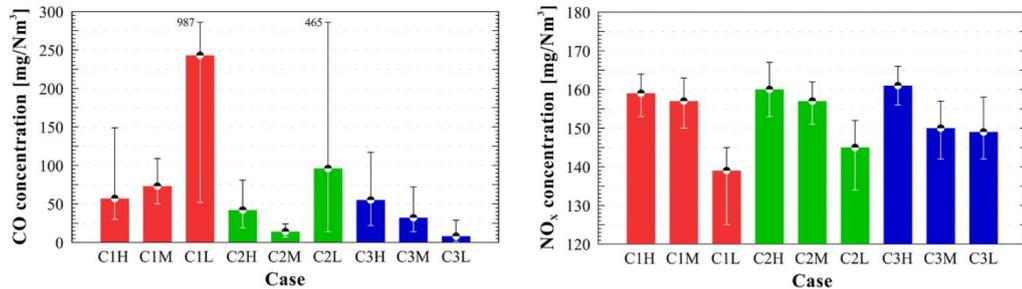


Figura 2.2

Di seguito riportiamo le considerazioni su tali andamenti, successivamente cercheremo dal punto di vista fisico di spiegare il fenomeno e infine, considerando il nostro effettivo caso di studio, andremo a confrontare le evidenze ottenute.

Da tali diagrammi osserviamo che:

- 1) per quanto riguarda la concentrazione di NO_x:
 - a parità di PA/SA la concentrazione di NO_x diminuisce al diminuire dell'eccesso d'aria;
 - un aumento del rapporto PA/SA per bassi valori dell'eccesso d'aria può ridurre la concentrazione di NO_x;
 - la concentrazione media di NO_x più bassa si ha nel caso C31L (PA/SA alto, eccesso d'aria basso).
- 2) per quanto riguarda la concentrazione di CO:
 - per medi ed elevati eccessi d'aria il valore della concentrazione di CO si attesta su bassi valori;
 - per elevati eccessi d'aria il termine PA/SA non ha grande influenza sulla concentrazione di CO;
 - gli effetti maggiori del rapporto PA/SA si hanno quando l'eccesso d'aria è basso;
 - la concentrazione media di CO più bassa si ha nel caso C3L (PA/SA basso, eccesso d'aria basso);

- i valori più elevati della concentrazione media di CO si hanno nei casi C1L E C2L, i quali sono accumulati da un basso eccesso d'aria;
- al diminuire di PA/SA si riscontra un calo della concentrazione di CO.

2.2.1 Considerazioni sulle emissioni di NO_x

Dai diagrammi si evidenzia un andamento piuttosto chiaro per quanto riguarda la concentrazione di NO_x. Qualora la caldaia che si debba ottimizzare presenti delle emissioni di NO_x al di sopra dei valori desiderati è opportuno:

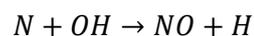
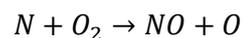
- ridurre l'eccesso d'aria. Questo è possibile diminuendo la portata d'aria in ingresso alla caldaia, ad esempio, andando a ridurre leggermente la velocità di rotazione del motore dell'aspiratore fumi e/o introducendo elementi all'interno del condotto d'aspirazione che vadano a determinare perdite di carico e/o semplicemente andando a ridurre la sezione di ingresso dell'aria comburente;
- aumentare il rapporto PA/SA adottando un design del braciore della caldaia che presenti una ripartizione degli ugelli in grado di distribuire maggiore aria primaria rispetto all'aria secondaria.

In particolare, gli NO_x che vengono mitigati secondo questo metodo sono quelli termici, i cosiddetti Thermal NO_x, che si formano in condizioni di alte temperature e in presenza di eccessi d'aria.

In generale i fattori che influenzano la formazione dei Thermal NO_x sono:

- la temperatura massima del sistema;
- l'eccesso d'aria dove si trova la massima temperatura.

Il meccanismo che meglio spiega la formazione dei Thermal NO_x è detto "Meccanismo di Zeldovich"⁹. Questo è composto da tre reazioni:



⁹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Zeldovich_mechanism>

Fondamentale è la reazione (1) in quanto genera il precursore dell'NO, il radicale N. Tale reazione è molto lenta per la sua elevata energia di attivazione ed è quindi necessaria un'elevata temperatura per farla avvenire. Essa si verifica nella zona post fiamma dove la temperatura è massima, e quindi in corrispondenza degli ugelli dell'aria secondaria, la quale è distribuita nella zona più critica per la formazione degli NO_x.

Da questo ragionamento possiamo intuire che si formeranno meno NO_x se andremo a fornire una bassa quantità di aria secondaria e in generale un basso eccesso d'aria, questo avverrà perché, all'aumentare dell'aria comburente introdotta, aumenterà anche la concentrazione di N₂.

Per comprendere meglio ciò che accade, consideriamo i dati sperimentali ottenuti da Zadavec et al. in merito alle misure di temperatura riportati in Figura 2.3, dove, a sinistra si hanno i valori della temperatura media in corrispondenza della zona dell'aria primaria, mentre a destra quelli della zona dell'aria secondaria.

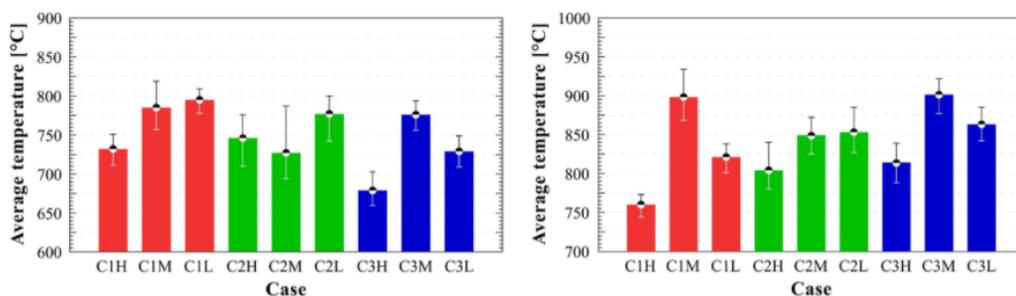


Figura 2.3

Innanzitutto, notiamo che in ognuno dei nove casi la temperatura media è maggiore in corrispondenza della zona dell'aria secondaria, piuttosto che nella zona dell'aria primaria; dunque, i dati sperimentali evidenziano quanto detto precedentemente.

Inoltre, notiamo che a parità di eccesso d'aria e al diminuire del rapporto PA/SA si ha in genere un aumento della temperatura media in corrispondenza della zona dell'aria secondaria. In realtà i dati sperimentali ci mostrano che questo è vero eccetto che nel caso di un eccesso d'aria medio, per cui al passaggio da un valore di PA/SA medio ad un valore di PA/SA alto si ha un aumento della temperatura piuttosto che una diminuzione attesa. Trascurando quest'unico caso, abbiamo che, al diminuire del rapporto PA/SA viene favorita la prima reazione del Meccanismo di Zeldovich e quindi la generazione del radicale N, che andrà successivamente a reagire con l'ossigeno formando NO_x.

2.2.2 Considerazioni sulle emissioni di CO

Il rapporto PA/SA è molto influente sulle emissioni di CO ed in particolare per un eccesso d'aria basso. Ciò significa che dividere la combustione in due stadi piuttosto che farla avvenire in un unico step, è conveniente da questo punto di vista.

In particolare, come abbiamo già detto nel paragrafo 2.1, nel primo step si ha un'essiccazione e gassificazione del pellet e ciò avviene in corrispondenza della zona dell'aria primaria.

Ricordiamo, inoltre, che, per poter avere la gassificazione del pellet e quindi la generazione del gas con proprietà combustibili utile alla seconda fase, è necessario che questa avvenga in difetto d'aria, ovvero che la quantità di ossigeno presente sia minore di quella stechiometrica. Questo ci suggerisce che PA non debba essere troppo elevata.

Il prodotto di questa fase è una miscela gassosa, con proprietà combustibili, i cui componenti di maggior interesse sono l'idrogeno e il monossido di carbonio.

In particolare, le reazioni principali che caratterizzano la gassificazione sono:

- $C + CO_2 + \text{calore} \rightarrow 2CO$, che prende il nome di reazione di Boudouard¹⁰.
- $CO + H_2O + \text{calore} \rightarrow CO_2 + H_2$, che prende il nome di water/gas shift reaction¹¹.

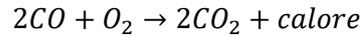
Tali reazioni non necessitano di ossigeno per avvenire, motivo per il quale non è necessaria un'elevata quantità di aria primaria, che, tra l'altro tenderebbe ad abbassare la temperatura, ostacolando la reazione di Boudouard.

La seconda fase del processo consiste nella combustione completa dei gas combustibili, creati a seguito della gassificazione. Tale step avviene in corrispondenza della zona dell'aria secondaria e necessita di ossigeno per poter avvenire.

¹⁰ <https://it.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_di_Boudouard>

¹¹ <https://it.wikipedia.org/wiki/Reazione_di_spostamento_del_gas_d%27acqua>

Concentrandoci sulla combustione del CO, la reazione è la seguente:



Vediamo, quindi, che la presenza di aria secondaria è di fondamentale importanza, motivo per cui questa fase avviene sempre con eccesso d'aria.

Da queste considerazioni si capisce che, per far avvenire correttamente la combustione in due fasi e poter abbassare le emissioni di CO, è necessario un rapporto PA/SA basso.

Dai dati ottenuti da Zadavec et al., questo, si nota soprattutto per bassi eccessi d'aria; infatti, un elevato eccesso d'aria complessivo tenderebbe ad ossidare in misura maggiore entrambe le zone di combustione, favorendo la trasformazione del CO in CO₂. D'altronde un eccesso d'aria eccessivo tende ad abbassare la temperatura di fiamma e della camera di combustione dando luogo ad un processo complessivo non ottimale.

Infatti, come si vede dalla Figura 2.3, per eccessi d'aria elevati si ha una minore temperatura all'interno della camera di combustione, che va a favorire, anche se non in maniera eccessiva, le emissioni di CO.

Questo significa che la condizione da ricercare, per quanto riguarda il CO, è quella rappresentata dal caso C3L, caratterizzata da un basso rapporto di PA/SA ed un altrettanto basso eccesso d'aria. Tale risultato è molto difficile da ottenere nella pratica, in quanto il design interno della caldaia deve garantire una perfetta miscelazione dell'aria secondaria con i gas combustibili. Ad esempio, grazie ad una permanenza più lunga di quest'ultimi in camera di combustione è possibile evitare che parte del CO prodotto dalla prima fase non prenda parte alla combustione nella zona secondaria dando luogo a emissioni di CO.

Perciò, nella pratica, si tende a garantire un medio eccesso d'aria, che va introdotto in corrispondenza della zona secondaria, utile a compensare l'effetto di una non perfetta miscelazione dell'aria con i gas combustibili.

2.2.3 Trade-off tra emissioni di NO_x ed emissioni di CO:

Esiste un trade-off tra le emissioni di monossido di carbonio e l'emissione di ossidi di azoto¹². Troppa poca aria comporterà un aumento delle emissioni di CO, ma limiterà il quantitativo di NO_x nei gas di combustione. Al contrario, un maggiore eccesso d'aria comporterà il rilascio di un quantitativo maggiore di NO_x.

Oltre all'eccesso d'aria, anche il rapporto PA/SA genera una situazione di compromesso tra le emissioni di CO e di NO_x. Infatti, come detto precedentemente, un basso rapporto PA/SA tende a limitare le emissioni di CO, ma a favorire quelle di NO_x, viceversa, un elevato rapporto PA/SA tende a limitare le emissioni di NO_x, ma a favorire quelle di CO.

Questo significa che, in un processo di ottimizzazione delle emissioni di una caldaia a pellet occorre tener conto di questa situazione di compromesso, andando ad attuare delle modifiche consapevoli del fatto che, ad una riduzione delle emissioni di CO, corrisponderà un aumento delle emissioni di NO_x e viceversa.

¹² Hassan Khodaei, Ferdinando Guzzomi, David Patiño, Babak Rashidian, Guan H. Yeoh, *Air staging strategies in biomass combustion-gaseous and particulate emission reduction potentials*, Fuel Processing Technology, Volume 157, 2017, Pages 29-41

2.2.4 Confronto con i dati sperimentali ottenuti a seguito delle modifiche realizzate sulla caldaia durante l'attività di tirocinio:

Andremo a considerare i risultati ottenuti durante l'attività di tirocinio al fine di trovare un riscontro con le considerazioni fatte a partire dai dati sperimentali presi dallo studio di Zadavec et al.

Emissioni nella condizione di partenza:

Nella Figura 2.4 andiamo a riportare gli andamenti delle emissioni, registrati in un breve arco temporale, della caldaia nella sua configurazione di partenza.

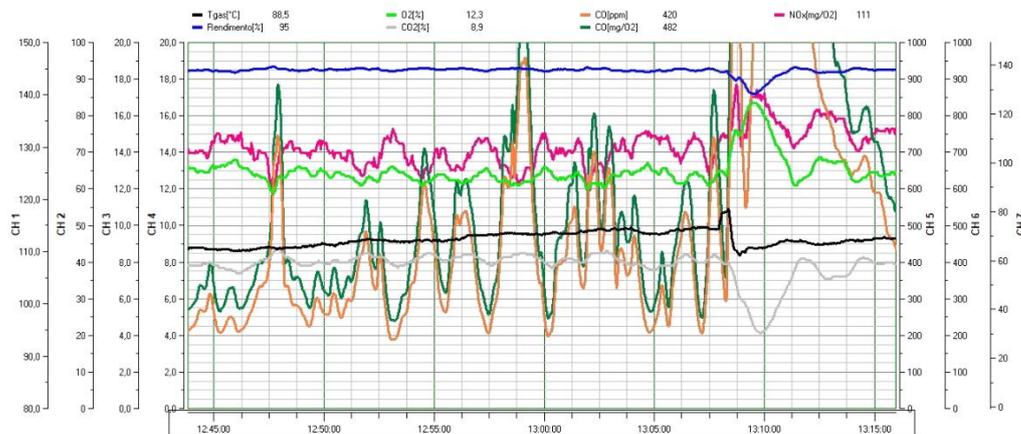


Figura 2.4: Andamento di rendimento, temperatura dei gas ed emissioni nel tempo, misurate nel corso della prova di combustione. Sono rappresentate nel Canale 1 la temperatura dei gas, nel Canale 2 il rendimento, nei Canale 3 e 4 O_2 e CO_2 , nei Canale 5 e 6 CO , rispettivamente in ppm e mg/ O_2 , nel Canale 7 l' NO_x .

Andando a variare la velocità del motore dell'aspiratore fumi, tramite un metodo up and down, al fine di ricercare un suo valore ottimale corrispondente a delle emissioni più basse, ci siamo accorti che tale condizione corrisponde, per questa configurazione della caldaia, ad una velocità di circa 1800 rpm.

I dati sperimentali corrispondenti a tale situazione sono riportati, di seguito, in Figura 2.5:

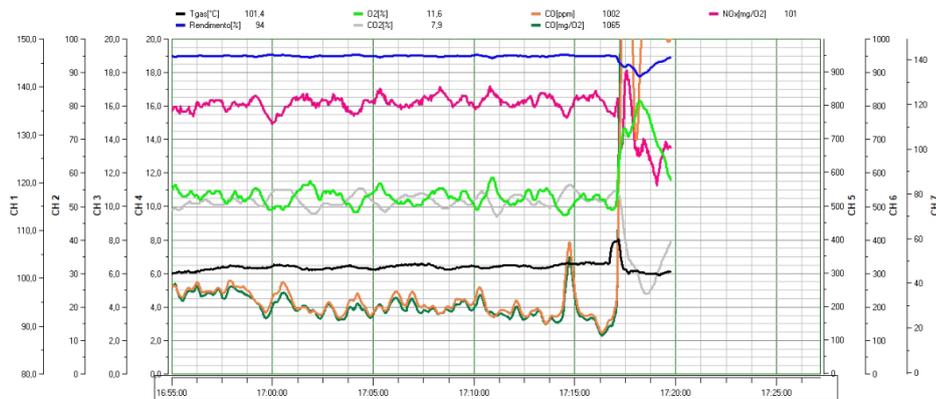


Figura 2.5

Consideriamo, quindi, questa situazione come l'effettiva condizione di partenza sulla quale si svilupperanno le modifiche atte ad ottimizzare le emissioni della caldaia.

Focalizzandoci sulla concentrazione di NO_x e di CO , che maggiormente ci interessano, notiamo che:

- la concentrazione media di NO_x è leggermente al di sotto del limite desiderato di $120 \text{ mg}/\text{Nm}^3$;
- la concentrazione media di CO è nettamente al di sopra del limite desiderato di $25 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

Notiamo che le problematiche maggiori sono legate alle emissioni di CO , che quindi dovrebbero essere mitigate riducendo il rapporto PA/SA , garantendo un eccesso d'aria minimo nella zona secondaria al fine di non ridurre la temperatura all'interno della camera di combustione o inevitabilmente introdurre un grande o medio eccesso d'aria, qualora la miscelazione dell'aria secondaria con i gas combustibili non sia ottimale.

Ricordiamo, inoltre, che ciò dovrà essere realizzato tenendo conto della situazione di compromesso tra NO_x e CO ; infatti, in generale, al ridurre del CO si avrà anche un aumento degli NO_x .

Vediamo quindi le modifiche effettuate a partire da tale situazione. In particolare, non si andranno a riportare tutte le modifiche e prove realizzate durante l'attività di tirocinio, ma solamente quelle che prevedano una variazione di PA/SA e dell'eccesso d'aria. Si deve ricordare, inoltre, che le precedenti considerazioni sulle emissioni di NO_x e di CO sono state elaborate a posteriori, rispetto all'attività di tirocinio.

Aggiunta di una corona di fori sul braciere nella zona dell'aria secondaria.

L'aggiunta di una corona di fori sul braciere in corrispondenza della zona dell'aria secondaria equivale all'introduzione di un numero più elevato di ugelli che distribuiscono una quantità maggiore di aria secondaria. Si noti che la prova viene eseguita utilizzando un eccesso d'aria pari alla condizione iniziale, e quindi una velocità di rotazione del motore dell'aspiratore fumi costante e pari a 1800 rpm. Rimanendo costante l'eccesso d'aria e il numero di ugelli dell'aria primaria, all'aumentare degli ugelli dell'aria secondaria si avrà un contemporaneo aumento di SA e una riduzione di PA.

Si è dunque ridotto il rapporto PA/SA mantenendo costante l'eccesso d'aria. I dati sperimentali conseguentemente ottenuti sono riportati in Figura 2.6.

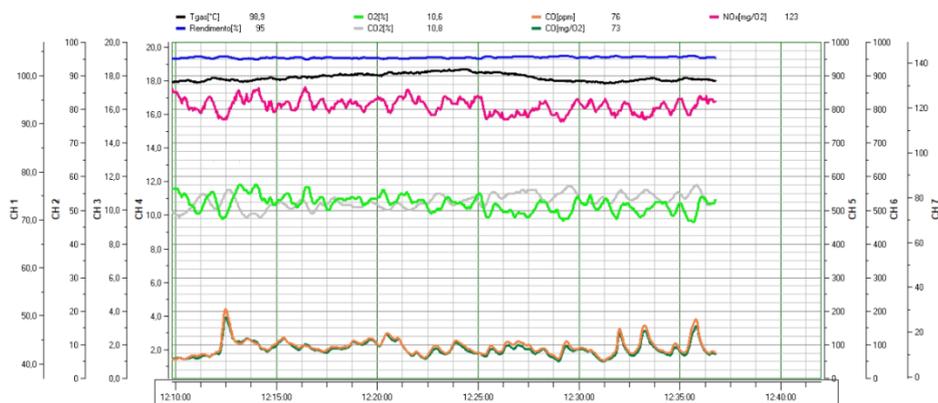


Figura 2.6

Come notiamo dal diagramma, le modifiche apportate hanno rispettato l'andamento atteso, infatti, al ridursi del rapporto PA/SA si è notevolmente ridotto il valore medio di CO, che si attesta, circa, su 80 mg/Nm³.

Per quanto riguarda gli NO_x notiamo un leggero aumento, in accordo con le considerazioni ottenute a partire dai dati sperimentali determinati da Zadravec et alii.

Realizzazione di fori sullo sportello di apertura della camera di combustione.

Aver praticato dei fori sullo sportello di apertura ha determinato l'aumento dell'eccesso d'aria ed in particolare essendo stati realizzati ad un'altezza maggiore rispetto all'altezza della camera di combustione, l'aria in più introdotta concorre a realizzare la combustione dei gas combustibili in corrispondenza della zona secondaria.

Questa situazione è sicuramente favorevole per la riduzione del CO, ma le modifiche apportate sono piccole per poter ottenere una riduzione apprezzabile di tale inquinante.

Possiamo, quindi, visualizzare cosa accade quando si va ad aprire leggermente lo sportello della camera di combustione. In questa condizione, infatti, l'eccesso d'aria risulterà elevata, la camera di combustione verrà notevolmente ossidata in corrispondenza della zona secondaria e questo comporterà una riduzione sostanziale del CO, che si legherà con l'ossigeno presente.

I dati corrispondenti a tale situazione sono riportati di seguito in Figura 2.7.

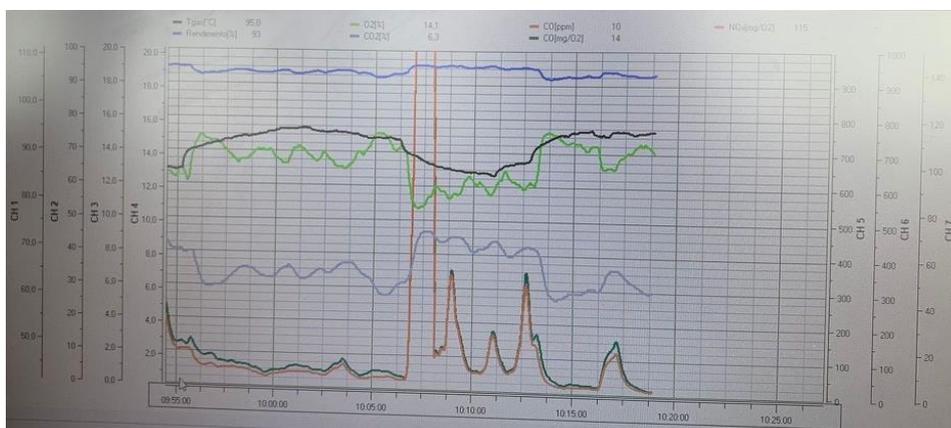


Figura 2.7

Dalla Figura 2.7 notiamo:

- netti miglioramenti nel valore delle emissioni di CO, le quali hanno raggiunto un valore minimo durante la prova di 10 mg/Nm^3 ;
- un'elevata quantità di O₂ nei fumi di scarico, questo proprio per via dell'elevato eccesso d'aria;
- una bassa temperatura dei fumi di scarico, questo perché si ha un maggior ingresso di aria comburente fredda.

Purtroppo, notiamo che non è presente la curva degli NO_x, questo perché al momento della prova si era scelto di non misurarli. Ci saremmo comunque aspettati un notevole aumento del valore degli NO_x per via dell'elevatissimo eccesso d'aria.

Considerazioni finali:

Come vediamo dalle due semplici modifiche proposte nel paragrafo precedente, il comportamento del CO segue quello previsto a partire dalle considerazioni fatte sui dati sperimentali ottenuti da Zadavec et alii. Invece, per quanto riguarda l'andamento delle emissioni degli NO_x otteniamo una leggera corrispondenza. Essendo, però, l'attività di tirocinio svolta precedentemente alla stesura di questo elaborato e essendoci concentrati maggiormente sulla concentrazione di CO, non abbiamo dati a sufficienza per ottenere un riscontro soddisfacente con quanto detto nel paragrafo 2.2.1.

2.3 Conclusioni e ringraziamenti.

Attraverso questo elaborato, mi sono posto lo scopo di cercare di spiegare in maniera semplice e qualitativa ciò che è osservabile dall'applicazione della tecnica di air staging al caso di una caldaia a pellet di uso domestico nell'ottica di ottimizzare un prodotto già presente in commercio.

I principali risultati ottenuti sono la dipendenza delle emissioni di CO ed NO_x dal rapporto PA/SA e dall'eccesso d'aria ed infine, la comprensione della situazione di compromesso tra l'abbattimento delle emissioni di CO ed NO_x.

Concludendo ringrazio l'azienda Laminox s.r.l. ed i dipendenti con i quali ho collaborato, la collega Valentina Arrà con cui ho svolto l'attività di tirocinio ed il Professore Flavio Caresana per la disponibilità con la quale ha svolto il ruolo di tutor accademico e relatore di questa tesi.

Bibliografia

- [1] Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, Decreto 7 novembre 2017, n°186
- [2] UNI EN 303-5:2021, 20 maggio 2021
- [3] Tomas Zadavec, Boštjan Rajh, Filip Kokalj, Niko Samec, *Influence of air staging strategies on flue gas sensible heat losses and gaseous emissions of a wood pellet boiler: An experimental study*, Renewable Energy, Volume 178,2021, Pages 532-548
- [4] Hassan Khodaei, Ferdinando Guzzomi, David Patiño, Babak Rashidian, Guan H. Yeoh, *Air staging strategies in biomass combustion-gaseous and particulate emission reduction potentials*, Fuel Processing Technology, Volume 157, 2017, Pages 29-41

Sitografia

- [1] <https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterio reallegato_2_alleg.pdf>
- [2] <<https://it.wikipedia.org/wiki/NOx>>
- [3] <http://www.comune.torino.it/ambiente/aria/faq_aria/cos-il-particolato.shtml>
- [4] <<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/gasification>>
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Staged_combustion>
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Zeldovich_mechanism>
- [7] <https://it.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_di_Boudouard>
- [8] <https://it.wikipedia.org/wiki/Reazione_di_spostamento_del_gas_d%27acqua>