

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ  
DI BOLOGNA**

**SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA  
CON SEDE A CESENA**

**CORSO DI LAUREA  
IN INGEGNERIA MECCANICA**

**Classe: L-9**

**Sede di Forlì**

**ELABORATO FINALE DI LAUREA**

**In Disegno Assistito al Calcolatore**

**STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DI UNA  
CALDAIA A PELLETTI PER ESTERNI**

**CANDIDATO**

**Andrea Ruscelli**

**RELATORE**

**Prof. Luca Piancastelli**

**Anno Accademico 2011/2012**

**Sessione III**

# SOMMARIO

INTRODUZIONE .....	6
1. CENNI STORICI.....	7
2. IL PELLETT .....	8
2.1 <i>Cos'è il pellet?</i> .....	8
2.2 <i>Storia del pellet.</i> .....	8
2.3 <i>Caratteristiche del pellet.</i> .....	8
2.4 <i>Le caldaie a pellet.</i> .....	10
2.4.1 <i>Vantaggi e svantaggi delle caldaie a pellet.</i> .....	13
3. UNA CALDAIA A PELLETT CON COLLOCAZIONE ESTERN... 14	
3.1 <i>Presentazione caldaia.</i> .....	14
3.2 <i>Lo sviluppo del progetto.</i> .....	15
3.3 <i>Funzionamento della caldaia.</i> .....	19
3.3.1 <i>Processo di combustione.</i> .....	19
3.3.2 <i>Percorso del fluido vettore.</i> .....	21
3.3.3 <i>Il sistema di coibentazione e recupero fumi.</i> .....	22
3.4 <i>Dimensionamento dei componenti.</i> .....	26
3.4.1 <i>Il bruciatore.</i> .....	26
3.4.2 <i>il sistema di ventilazione.</i> .....	29
3.4.3 <i>il sistema di alimentazione mediante coclea.</i> .....	32
3.4.4 <i>Lo scambiatore di calore</i> .....	37
3.4.5 <i>l'impianto idraulico</i> .....	41
3.4.6 <i>Il serbatoio di stoccaggio.</i> .....	47
3.5 <i>Valutazione del costo della caldaia</i> .....	50
4. REALIZZAZIONE DI UNA NUOVA TIPOLOGIA DI PELLETT. .52	
4.1 <i>Introduzione alla combustione del pellet.</i> .....	52
4.1.1 <i>La combustione del pellet.</i> .....	52
4.1.2 <i>La composizione del pellet</i> .....	53
4.1.3 <i>Il processo di pirolisi</i> .....	53
4.2 <i>Produzione del pellet.</i> .....	56
4.2.1 <i>L'idea di partenza.</i> .....	56
4.2.2 <i>Preparazione del composto per produzione pellet.</i> .....	56

4.2.3 <i>Prova di combustione</i> .....	57
4.2.4 <i>Valutazione dei risultati ottenuti</i> .....	57
CONCLUSIONI .....	59
BIBLIOGRAFIA .....	60
SITOGRAFIA.....	60





## **INTRODUZIONE**

Il presente progetto si pone come obiettivo lo studio e sviluppo di una caldaia a pellet adatta per il posizionamento esterno; la scelta si indirizza verso il pellet, in quanto settore in continua evoluzione ed espansione e combustibile innovativo rispettoso dell'ambiente.

È stato appurato la totale inesistenza di tale tipologia di caldaia per mezzo di una ricerca di mercato, sia online che attraverso informazioni dirette presso rivenditori della zona di Forlì-Cesena.

A seguito di un attento dimensionamento dei vari componenti, si provvederà alla realizzazione della caldaia mediante il programma da disegno solid-works.

Il presente elaborato è suddiviso in quattro capitoli. Il primo è dedicato al combustibile pellet e a tutte le sue caratteristiche, vantaggi e svantaggi. Nel secondo sono esposte e descritte le differenti tipologie di caldaie presenti sul mercato odierno; nel terzo sarà progettata la caldaia a pellet, con il dimensionamento e il costo complessivo per la realizzazione del prodotto. Si procederà, infine, alla progettazione per la produzione di una nuova tipologia di pellet, mediante il riutilizzo di scarti provenienti dalle aziende cartarie e dalle segherie.

La finalità principale di tale progetto sarà, in un futuro prossimo, la reale costruzione della caldaia e un suo inserimento nel mercato, in modo che possa essere installata e utilizzata in ambienti domestici, apportando molteplici vantaggi tra cui il rispetto ambientale e una maggiore facilità di posizionamento in unità abitative ristrette.

## **1. CENNI STORICI**

Nel corso dei secoli, si è passati dal riscaldamento per mezzo di energie rinnovabili (legna), all'utilizzo di combustibili fossili. La prima caldaia a muro compatta, che oggi tutti conosciamo, è stata realizzata nel 1924; essa sfrutta combustibili fossili per la produzione di acqua calda e per il riscaldamento domestico. Successivamente, nel 1980, viene inventata negli Stati Uniti la stufa a pellet; assomiglia ad una stufa tradizionale, l'unica differenza risiede nell'automazione del sistema di carico e nella maggiore efficienza nella produzione di energia termica. A tale stufa seguono le caldaie a pellet odierne, che riscaldano l'abitazione attraverso un sistema di termosifoni.

Si è tornati, quindi al reimpiego delle energie rinnovabili, cercando di migliorarne l'efficienza attraverso l'uso di nuove tecnologie. Una causa evidente del ritorno a tali energie è, in particolar modo, l'innalzamento dei costi dei combustibili fossili, ormai in esaurimento.

## **2. IL PELLETT**

### ***2.1 Cos'è il pellet?***

“Il pellet è un combustibile ecologico densificato, di forma cilindrica, derivante da un processo industriale; la materia prima è costituita principalmente da trucioli e segatura ricavati dagli scarti di legno di qualunque provenienza e viene trasformata in piccoli cilindri con diametro variabile da 6 a 8 mm e lunghezza di 10-30 mm”(www.pelletgold.it). La densità del pellet è di circa 650kg/m<sup>3</sup>, è realizzato senza l'utilizzo di collanti, in quanto all'interno della legna è già naturalmente la lignina che funge da legante.

### ***2.2 Storia del pellet.***

Il pellet di legno nasce nel 1983 in Idaho negli Stati Uniti, quando, a seguito della crisi petrolifera, un ingegnere mise a punto questo nuovo tipo di combustibile legnoso. Ideato inizialmente per l'impiego industriale, ben presto venne immesso sul mercato delle caldaie domestiche in rapida espansione. Questa tipologia di combustibile legnoso si è affermata anche in Europa dove in alcuni paesi, in particolare in Austria, la sua diffusione è già molto ampia; a Salisburgo, ad esempio, il 30% delle nuove abitazioni sono riscaldate con caldaie a pellet.

### ***2.3 Caratteristiche del pellet.***

Utilizzare il pellet come combustibile per il riscaldamento domestico comporta una serie di vantaggi sia a livello economico che a quello ambientale.

Il pellet è una risorsa che può definirsi rinnovabile, in quanto per la sua produzione non è previsto l'abbattimento di alberi per il solo scopo di bruciarli, ma si realizza mediante il riciclo di scarti provenienti dalla lavorazione del legname. In questo modo oltre a non favorire la distruzione della flora, già seriamente a rischio nel nostro pianeta, risolve il problema legato allo smaltimento degli scarti, riducendo così



anche i costi che le aziende devono affrontare per il trasporto e lo stoccaggio.

Il pellet è un combustibile ecologico le sue emissioni di CO<sub>2</sub> sono quasi nulle in quanto la quantità prodotta durante la combustione è la stessa che viene sottratta all'atmosfera durante la crescita della pianta.

Oltre a queste caratteristiche invidiabili da qualsiasi altro tipo di combustibile, il pellet risulta essere anche più economico rispetto ai tradizionali combustibili. Il costo per kw del pellet è più basso di quello del gasolio e del metano, riducendo i costi per il riscaldamento di circa il 30%.

Per quanto riguarda il suo stoccaggio e trasporto il pellet, si può considerare come gli altri combustibili liquidi, in quanto avendo un elevato peso specifico (650kg/m<sup>3</sup>) può essere immagazzinato in piccoli spazi avendo comunque un'ampia autonomia.

Il processo di produzione del pellet non prevede l'utilizzo di collanti ed altri componenti chimici e di conseguenza risulta essere completamente atossico, incentivando così la sua caratteristica di combustibile ecologico.

I residui del combustibile pellet sono assai ridotti, nel pellet di buona qualità inferiori anche al 1%. Questo è dato dal fatto che al suo interno la quantità di corteccia e impurità sono relativamente basse.

Combustibile	Prezzo unitario	Valore energetico	Prezzo per kWh	Confronto %
Gasolio	1,360 €/l	10 kWh	0,136 €	100%
Gas liquido (in cisterna)	2,516 €/kg	12,8 kWh	0,197 €	145%
Gas metano	0,896 €/m <sup>3</sup>	9,8 kWh	0,091 €	67%
Pellets	0,255 €/kg	4,8 kWh	0,053 €	39%
Minuzzoli di legno	0,148 €/kg	5,5 kWh	0,027 €	20%
Legna spezzata (mista)	0,151 €/kg	4,3 kWh	0,035 €	26%
Teleriscaldamento (incl. eventuale tassa fissa annuale)	0,094 €/kWh	1 kWh	0,094 €	69%

Figura 1 Tabella confronto prezzo combustibili per riscaldamento.  
Fonte: [www.centroconsumatori.it](http://www.centroconsumatori.it)

## 2.4 Le caldaie a pellet.

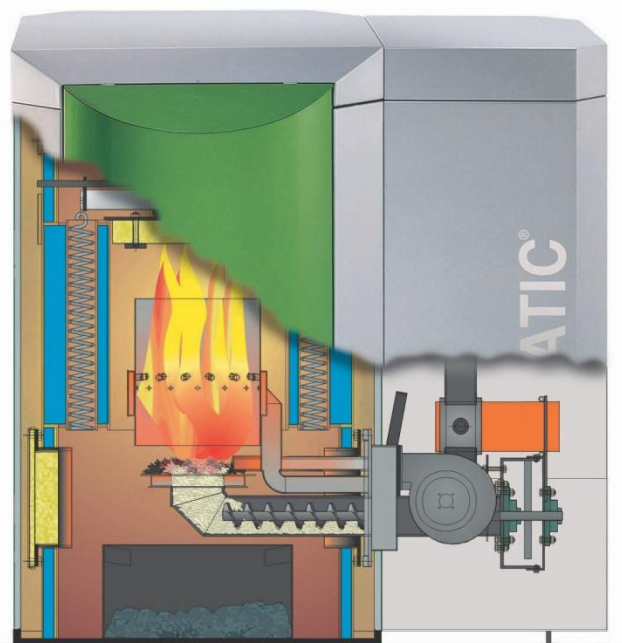


Figura 2. Caldaia a pellet con sottoalimentazione a spinta.  
Fonte: [www.oekofen.it](http://www.oekofen.it)

La caldaia a pellet presenta lo stesso sistema di funzionamento delle altre tipologie di caldaia. Essa può essere disponibile sia nella versione per il solo riscaldamento che nella versione combinata per la produzione di acqua calda.

L'energia prodotta dalla combustione del pellet viene sfruttata per cedere calore a un fluido vettore mediante uno scambiatore di calore.

Il funzionamento di una caldaia a pellet è il seguente:

- dal serbatoio di capacità variabile, il pellet viene inserito all'interno del bruciatore mediante un dosatore. La capacità del serbatoio varia secondo le dimensioni della caldaia; vi sono caldaie che hanno serbatoi stagionali e un preserbatoio adiacente alla caldaia, mentre altre hanno serbatoi a capacità giornaliera.
- l'accensione avviene in maniera automatica grazie ad una resistenza elettrica che, scaldandosi, innesca la combustione del pellet.

- i fumi caldi passano attraverso uno scambiatore di calore dotato di pulizia manuale o meccanica e cedono calore al fluido vettore, in questo caso acqua.
- mediante un aspiratore fumi, l'aria (il comburente) entra nella camera di combustione passando dal braciere e fornisce al combustibile la giusta quantità di ossigeno necessaria per la combustione. La regolazione viene effettuata grazie ad una sonda lambda posta nella canna fumaria.

Nel mercato odierno esistono diversi sistemi per la produzione di acqua calda che presentano lo stesso principio di base della combustione. Ciò che li differenzia è il modo di bruciare il pellet. Secondo il tipo di alimentazione e combustione ci sono 5 tecnologie di funzionamento.

1) Alimentazione con griglia a lamelle girevoli: i pellets cadono dall'alto su numerose lamelle in acciaio che girano lentamente e hanno un piccolo spazio tra di loro. Un pettine pulisce a ogni giro gli spazi, in modo che la cenere possa cadere senza impedimento e l'aria di combustione salire verso l'alto.

2) Sottoalimentazione a spinta: i pellets sono trasportati dal basso tramite una coclea in un braciere; qui avviene la combustione e la cenere rimanente cade dai bordi nel cassetto cenere.

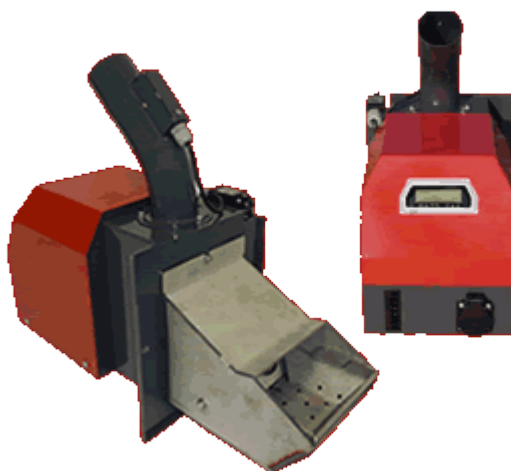
3) Alimentazione laterale: questo funzionamento è simile a quello della sottoalimentazione a spinta, solo che il combustibile entra lateralmente trasportato sempre da una coclea. Sia il braciere sia l'alimentazione dell'aria possono avere forme speciali per adeguarsi a funzionamenti particolari.

4) Alimentazione per caduta dall'alto: in questo sistema di funzionamento, i pellets cadono dall'alto tramite un condotto di caduta nel braciere che, grazie al suo dimensionamento, permette di controllare esattamente la combustione. Questa tecnica, rispetto alle altre, produce minor quantità di cenere, allontanata dal braciere dal sistema di pulizia.

5) Alimentazione per aspirazione: la totale sicurezza contro incendi o ritorno di fiamma in collegamento a un aspiratore completamente in metallo impedisce al rivestimento il contatto con la polvere del ciclone

o della turbina d'aspirazione. Il ciclone ripulisce l'aria di ritorno dalla polvere, garantendo intervalli di funzionamento più lunghi della turbina. Il letto delle braci è regolabile e, grazie al principio di caduta, permette assieme alle alte temperature della camera di combustione capacità di modulazione uniche.

Oltre alle caldaie vi sono anche bruciatori a pellet, che, applicati ad una caldaia esistente, possono trasformarla. Sono elementi aggiuntivi simili ai bruciatori a metano o gasolio (figura 3).



**Figura 3. Bruciatori a pellet.**

Le caldaie a pellet sono di norma utilizzate come uniche fonti di calore, ma possono essere anche combinate con altri sistemi di produzione di calore, come collettori termici, caldaie a metano e termocamini.

Per assicurare una certa autonomia di funzionamento delle caldaie, è indispensabile prevedere un sistema per lo stoccaggio del pellet, che dipende dalla taglia della caldaia e dall'autonomia di funzionamento prevista per l'impianto. Per impianti di grande taglia, è spesso opportuno prevedere un'apposita stanza-silo adiacente al locale caldaia (figura 4), da cui il pellet viene automaticamente prelevato per essere bruciato in caldaia. In questo caso, risulta conveniente adibire a silo una stanza preesistente oppure realizzare una struttura esterna in legno. Per le caldaie di taglia medio-piccola, esiste un'alternativa molto economica alla stanza-silo dedicata: si tratta di serbatoi per pellet realizzati in

tessuto (di norma poliestere), particolarmente pratici in fase di montaggio e di installazione.

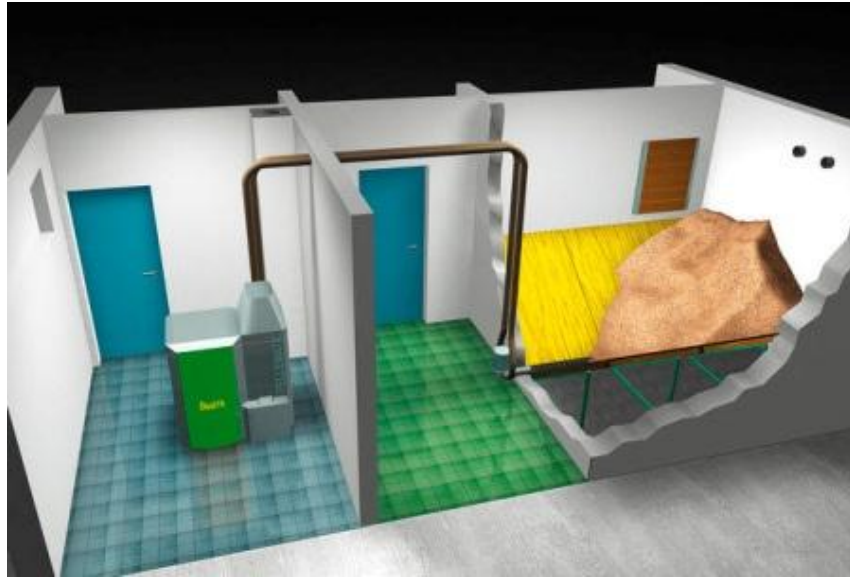


Figura 4. Sistema di stoccaggio realizzato con stanza-silo.  
Fonte: [www.oekofen.it](http://www.oekofen.it)

#### 2.4.1 Vantaggi e svantaggi delle caldaie a pellet.

I vantaggi delle caldaie a pellet sono i seguenti:

- Economicità del combustibile;
- Ampia autonomia.

Gli svantaggi sono, invece:

- Necessità di un locale per il posizionamento della caldaia;
- Necessità di un locale per lo stoccaggio del pellet;
- Necessità di una canna fumaria in muratura;
- Impossibilità di posizionare la caldaia all'esterno.

### **3. UNA CALDAIA A PELLETT CON COLLOCAZIONE ESTERNA.**

Visto gli ingombri delle caldaie a pellet in commercio, la loro scarsa estetica e la difficoltà di pulizia delle ceneri interne alle caldaie stesse, ho provveduto alla progettazione di una nuova caldaia che potesse colmare le inefficienze riscontrate dai prodotti già presenti sul mercato odierno.

Normalmente le caldaie a pellet richiedono un locale interno all'abitazione ("locale caldaia") e, in alcuni casi, una stanza con la funzione di deposito per il pellet per l'intera stagione di utilizzo; tali spazi, nella maggior parte delle abitazioni in Italia, sono assenti o hanno dimensioni ridotte.

Il presente studio si propone come obiettivo di realizzare una caldaia solamente per gli spazi esterni, sono state nella progettazione a non trascurate le prestazioni.

L'idea di base è stata quella di realizzare una caldaia che potesse soddisfare i fabbisogni delle abitazioni che non avevano la possibilità, in termini di spazio, di installare le normali caldaie a pellet presenti sul mercato. E' stato necessario creare un sistema di coibentazione differente rispetto a quello già presente in tutte le caldaie in commercio, prestando particolare attenzione all'assorbimento di energia termica dei fumi e sfruttandola, in primo luogo, per cedere calore a un fluido vettore per la produzione d' acqua per il riscaldamento domestico. Successivamente, l'energia termica ancora posseduta dai fumi è stata utilizzata per realizzare un sistema di coibentazione naturale, mediante l'utilizzo degli stessi. In ultimo luogo, i fumi sono stati utilizzati per riscaldare il flusso d'aria in ingresso nella camera di combustione, evitando così una riduzione delle prestazioni di combustione del pellet.

#### **3.1 Presentazione caldaia.**

In seguito alle precedenti considerazioni relative all'utilizzo della caldaia in ambienti esterni, si è provveduto alla progettazione di una

caldaia che si adattasse a tali condizioni. In commercio non esistono tipologie che hanno questa potenzialità, in quanto il sistema di coibentazione che presentano non è sufficiente a garantirne un giusto funzionamento a causa delle perdite che si hanno dovute alle basse temperature.

Si procede ora con l'esposizione del progetto mediante i disegni costruttivi.

### 3.2 Lo sviluppo del progetto.

La caldaia è stata progettata per generare una potenza termica pari a 8kW e per essere utilizzata con combustibile legnoso pellet; può essere installata in abitazioni di medie e piccole dimensioni. Non ha problemi di posizionamento in quanto, essendo compatta, può occupare qualsiasi spazio di dimensioni sufficienti per i suoi ingombri e collegata mediante due semplici attacchi al sistema di riscaldamento dell'abitazione.

L'impianto è formato da due componenti: il corpo caldaia e il serbatoio di approvvigionamento.

La caldaia assume una forma cilindrica, poiché le intelaiature interne ed esterne sono state realizzate con barili industriali, riducendo così i costi di produzione.

La progettazione del serbatoio è avvenuta in maniera tale da garantire l'approvvigionamento per l'intera stagione invernale e un costo ridotto di ricarica del pellet. Il corpo caldaia ed il serbatoio sono collegati mediante un sistema di trasporto pellet a coclea, che ha il compito di assicurare l'afflusso di combustibile durante il funzionamento della caldaia; il tutto è movimentato da un motoriduttore elettrico.

Il sistema di alimentazione dell'aria di combustione è posto all'interno della camera coibentata, la stessa all'interno della quale è presente anche la canna fumaria; questo permette in fase di regime di recuperare parte del calore in uscita dalla canna fumaria e di reintrodurlo all'interno della caldaia aumentando così l'efficienza

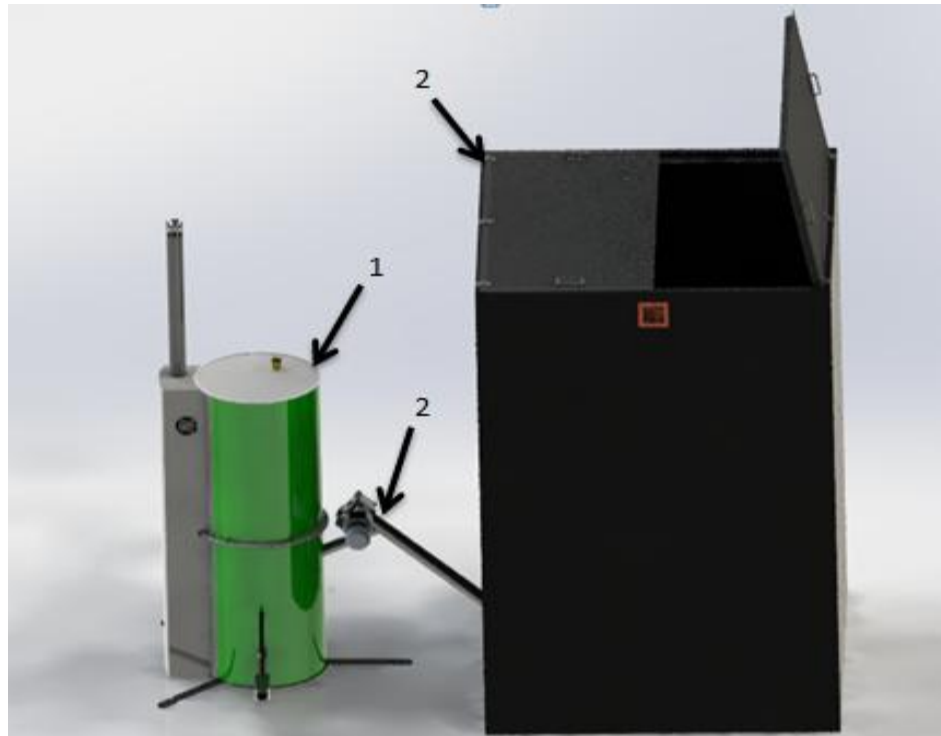


Figura 5. Impianto caldaia:  
1. Corpo caldaia.  
2. Serbatoio di stoccaggio.  
3. Sistema di trasporto a coclea.

L'afflusso d'aria è generato mediante un ventilatore.

Durante la fase di combustione del pellet, essendo un combustibile legnoso, le impurità presenti al suo interno si ossidano producendo ceneri; la caldaia è stata dunque dotata di un sistema automatico di aspirazione della stessa.

L'interno della caldaia è stato suddiviso in due ambienti distinti, la camera di combustione, all'interno della quale è presente sia il bruciatore che lo scambiatore di calore, ed una camera esterna chiamata camicia, all'interno della quale affluiscono i fumi in uscita dallo scambiatore. In questo modo, tutta la camera interna viene scaldata da aria calda con una temperatura inferiore a quella presente nella camera di combustione; così facendo, la temperatura della parete esterna risulta essere calda, anche se non alla stessa temperatura della camera di combustione. Questo accorgimento permette di ridurre lo spessore del coibentante esterno, rispetto al caso in cui vi fosse una sola camera di



combustione. Per evacuare i fumi da questa camera la caldaia è stata dotata di un aspiratore fumi, mentre per trasferire calore al fluido vettore la caldaia è stata fornita di uno scambiatore a tubo di fumi; è stata scelta

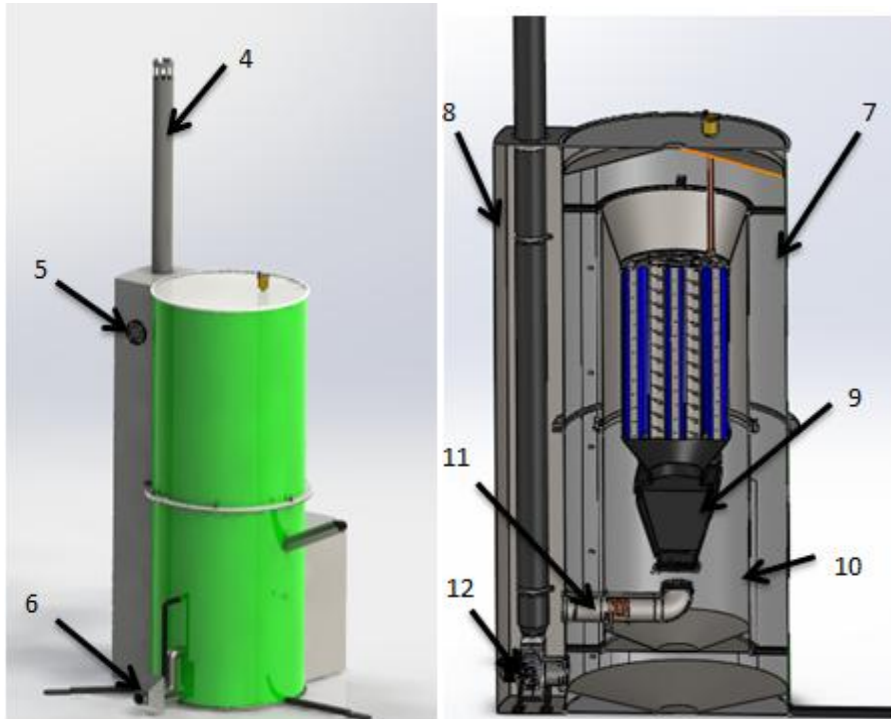


Figura 7. Vista anteriore della caldaia.  
 4. Canna fumaria  
 5. Ventilatore per l'aspirazione.  
 6. Sistema di recupero ceneri.

Figura 6. Interno caldaia.  
 7. Camicia esterna  
 8. Camera coibentata  
 9. Bruciatore  
 10. Camera di combustione  
 11. Condotto d'aria  
 12. Aspiratore fumi.

questa tipologia perché di facile progettazione e minor costi di produzione. Lo scambiatore è stato dotato inoltre di un sistema di pulizia automatico realizzato mediante spirali pulitrici inserite all'interno dei tubi di scambio, questo sistema permette di mantenere continuamente pulite queste condotte in maniera tale da non far ridurre lo scambio termico.

Il bruciatore è stato realizzato secondo la tipologia a "caduta dall'alto", perché di facile realizzazione inoltre i materiali per realizzarlo sono relativamente bassi, in quanto il sistema per il trasporto pellet non viene a trovarsi a temperature elevate e quindi può essere costruito con materiali commerciali a basso costo. L'afflusso d'aria dalla camera

coibettata verso la camera di combustione è permesso da una condotta, chiamata conduttura d'aria, che termina sotto il braciere, in questo i fumi in uscita sono sottoposti ad una ventilazione forzata facilitando così il loro afflusso all'interno dell'acamicaia.

La caldaia è dotata di un sistema idrico che ha lo scopo di far circolare il fluido vettore, in maniera tale da convogliare il calore accumulato nello scambiatore interno alla caldaia ad un secondo scambiatore, che a sua volta cederà calore al circuito di riscaldamento dell'abitazione. Questa scelta di separare i due circuiti è stata presa affinché il sistema caldaia fosse completamente indipendente e, conseguentemente, evitare eventuali danni al circuito di riscaldamento, nel caso in cui sorgessero problemi.

Il circuito si sviluppa sia internamente che esternamente alla caldaia; la

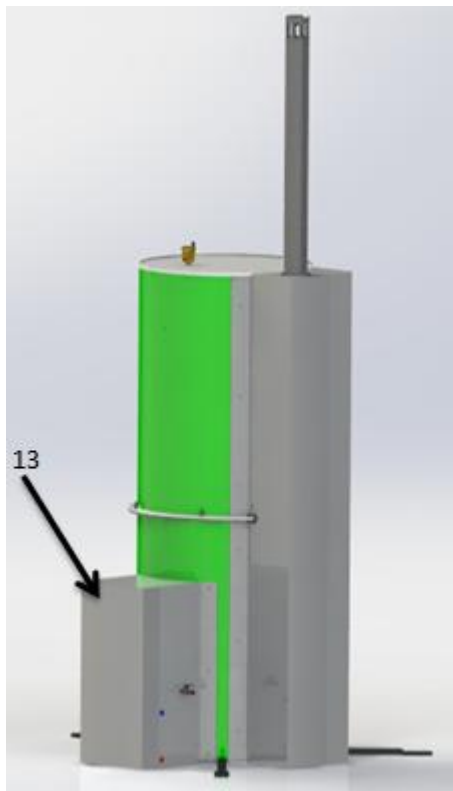


Figura 8. Vista posteriore della caldaia.  
13. Contenitore del circuito idrico.

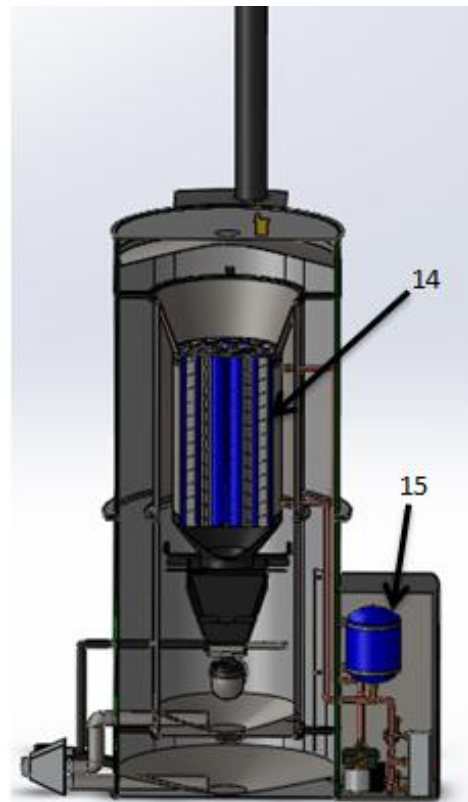


Figura 9. Vista interna della caldaia.  
14. Scambiatore di calore a fascio di fumi.  
15. Circuito idrico.

parte esterna è stata racchiusa in un apposito contenitore coibentato, per

proteggerlo così dagli agenti atmosferici. È stato, inoltre, dotato il vano di appositi attacchi per il collegamento alla rete domestica di riscaldamento.

L'intera struttura è stata realizzata per essere completamente aperta per facilitare eventuali manutenzioni.

### 3.3 Funzionamento della caldaia.

#### 3.3.1 Processo di combustione.

All'avviamento della caldaia, un ventilatore immette l'aria dell'ambiente esterno all'interno di una camera ermetica e coibentata; da qui l'aria passa attraverso un apposito condotto dove una resistenza elettrica la riscalda per facilitare l'avviamento della combustione del pellet. L'aria riscaldata giunge alla camera di combustione dove si trova il bruciatore nel quale il sistema di alimentazione a coclea ha nel contempo immesso il pellet prelevato dalla cisterna di stoccaggio. All'interno del bruciatore si accende una resistenza elettrica, la candeletta, che riscalda il pellet con il quale entra a diretto contatto fino alla temperatura di 350°C, temperatura che permette l'innesco della combustione.

La combustione genera fumi che escono dal bruciatore ad una temperatura di 400°C attraverso la condotta di evacuazione fumi e, mediante un diffusore, giungono allo scambiatore di calore a fascio di fumi, dove cedono la loro energia, sotto forma di calore, al fluido vettore che sta scorrendo nello scambiatore prevalentemente per convezione.

E' necessario un corretto dimensionamento dello scambiatore affinché i fumi in uscita abbiano una temperatura non inferiore ai 200°C. Essi arrivano alla camicia esterna e fungono da cappotto termico per la camera di combustione, avvolgendola in modo che sia sempre circondata da aria calda alla temperatura di 170°C. La funzione del cappotto è creare un'intercapedine che separa la camera di combustione dall'ambiente esterno; la parete esterna avrà una temperatura minore

rispetto alla camera di combustione e, conseguentemente, la coibentazione esterna risulterà essere minore rispetto al caso in cui non vi fosse questo spazio.

I fumi, esaurito il loro percorso nella camicia esterna, vengono aspirati da un aspiratore fumi posto verso il fondo della caldaia e immessi nella canna fumaria, dove affluisce l'aria di alimentazione della combustione. In questo modo, i fumi riscaldano tale aria, sgravando totalmente da questo ruolo la resistenza elettrica, per poi fuoriuscire nell'ambiente esterno. Grazie al recupero fumi, parte dell'energia termica dispersa può essere recuperata e immessa nuovamente all'interno della caldaia, aumentando l'efficienza di quest'ultima. Per avere un buon tiraggio della canna fumaria è necessario che la temperatura dei fumi che fuoriescono dalla caldaia non sia inferiore ai 150°C.

Le ceneri contenute nei fumi, invece, si depositano sul fondo della camicia, dove vengono aspirate da un sistema di raccolta ceneri.



Figura 10. Ingresso e uscita dell'aria dalla caldaia

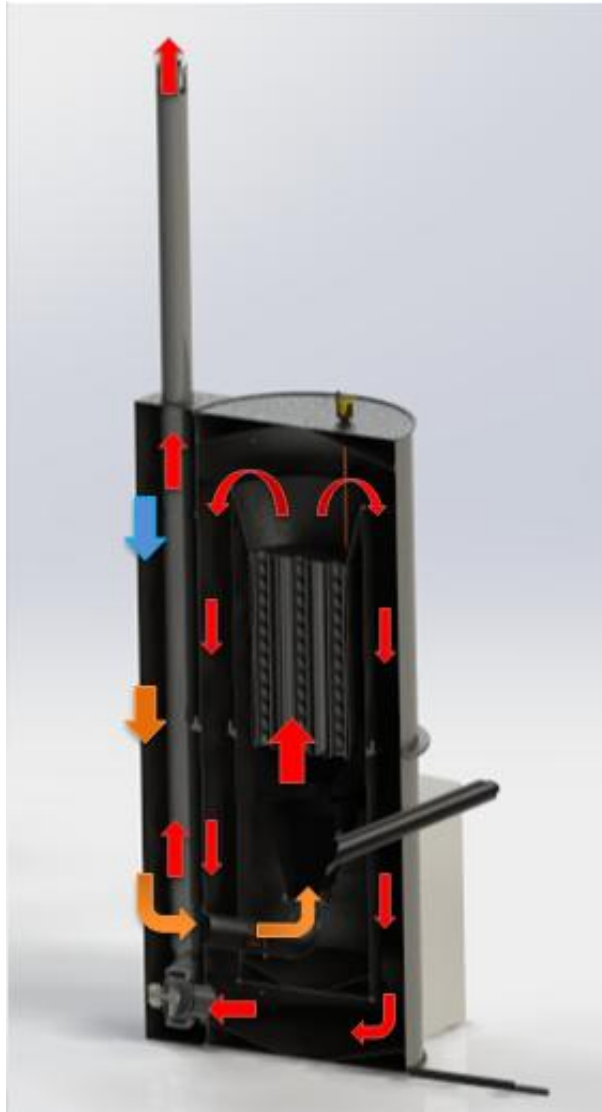


Figura 11. Flusso dell'aria all'interno della caldaia.

### 3.3.2 Percorso del fluido vettore.

Il fluido vettore scorre all'interno di un circuito idraulico chiuso grazie all'ausilio di una pompa di circolazione. Tale circuito passa all'interno di uno scambiatore dove il fluido assorbe calore dai fumi, prevalentemente per convezione, passando da una temperatura media di 50°C a una temperatura di 80°C.

Il liquido scorre nel circuito fino a raggiungere uno scambiatore a piastre dove cede calore a un secondo fluido che scorre all'interno del circuito di riscaldamento dell'abitazione.

Sono stati progettati due distinti circuiti idraulici collegati da uno scambiatore, per assicurarsi che un guasto locale non si ripercuota su tutto il sistema di riscaldamento.

Nel circuito del fluido vettore sono stati, inoltre, inseriti un vaso di espansione con la funzione di regolare la pressione interna del circuito e una valvola di sicurezza con lo scopo di aprire il circuito all'esterno della caldaia nel caso in cui la pressione del fluido superi i 3bar.

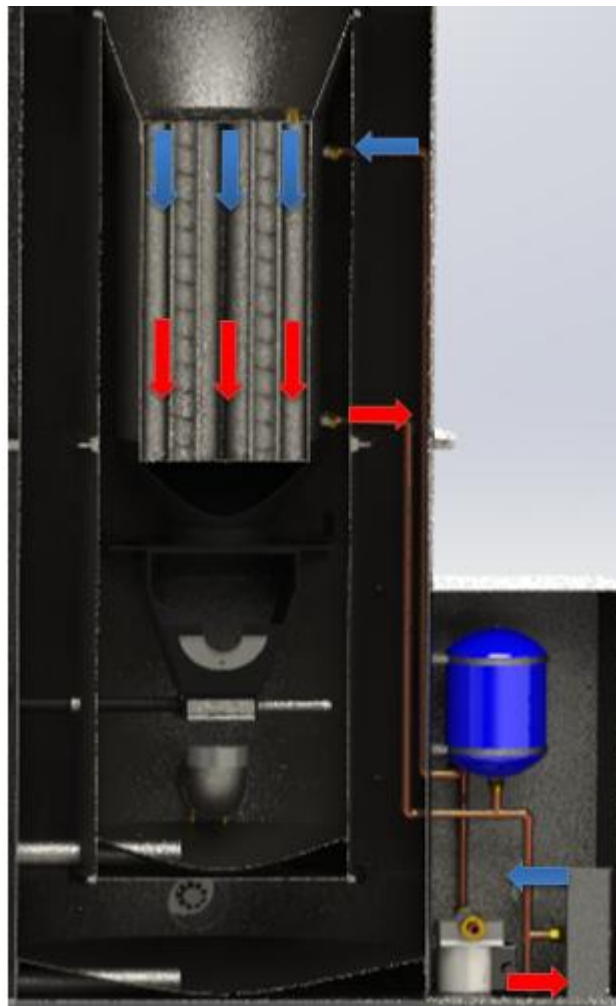


Figura 12. Percorso del fluido vettore.

### 3.3.3 Il sistema di coibentazione e recupero fumi.

La caldaia è pensata per essere collocata all'esterno, perciò occorre, in primo luogo, ridurre il più possibile l'influenza delle basse temperature ambientali e isolarla termicamente riducendo così le perdite energetiche. Come già precedentemente accennato, una possibile soluzione è

suddividere l'interno della caldaia in due ambienti distinti: la camera di combustione e la camicia esterna, che avvolge quest'ultima.

All'interno della camicia vengono fatti affluire per ventilazione forzata i fumi provenienti dallo scambiatore di calore, prima di essere immessi in ambienti tramite la canna fumaria. (condotto scarico fumi).

Si considera di avere una temperatura fumi in questa zona di circa 170°C, rispetto ai 400°C stimati per la zona della camera di combustione.

In tal modo, la parete della caldaia a contatto con l'ambiente esterno si trova ad una temperatura non di 400°C, ma di 170°C;  
in base ai principi della termodinamica, all'aumentare della variazione di temperatura aumentano anche le dissipazioni di energia,

$$q=S*K*\frac{\Delta T}{\Delta t}$$

dove:

S=superficie di scambio

K=coefficiente globale di scambio termico

$\Delta T$ =variazione di temperatura

$\Delta t$ =intervallo di tempo

per cui nel presente caso, la variazione di temperatura con l'esterno sarà notevolmente inferiore e, di conseguenza, anche il calore dissipato risulta essere minore.

Un secondo vantaggio in termini di efficienza energetica è dato dall'intercapedine stessa, camicia, che interrompe la continuità di scambio termico per conduzione con un tratto di convezione, avendo così dall'interno verso l'esterno, camera di combustione – conduzione – convezione – conduzione -ambiente esterno.

Tale soluzione richiede evidentemente uno spessore minore di isolante sulla superficie esterne a parità di efficienza.

Lo scambio termico non avviene solamente tra l'interno della caldaia e il suo esterno, ma, vista la differenza di temperatura, avviene anche tra

l'interno della camera di combustione e la camicia unendosi così al flusso d'aria che verrà immesso all'interno della canna fumaria. Parte di questo calore può essere recuperato grazie al sistema di recupero fumi, che consiste nel preriscaldamento dell'aria esterna immessa a servizio della combustione; tale scambio avviene all'interno della camera coibentata ed isolata, dove l'aria in ingresso, immessa dalla ventola, viene scaldata facendola fluire sulla superficie esterna della canna fumaria all'interno della quale fluiscono i fumi di fine ciclo ad una temperatura di circa 150°C. Il sistema di recupero fumi si comporta allo stesso modo di uno scambiatore di calore tubo in tubo controcorrente.

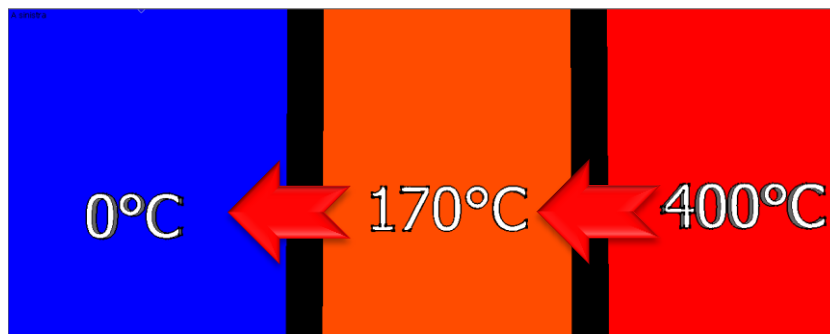


Figura 13. Variazione di temperatura all'interno della caldaia.

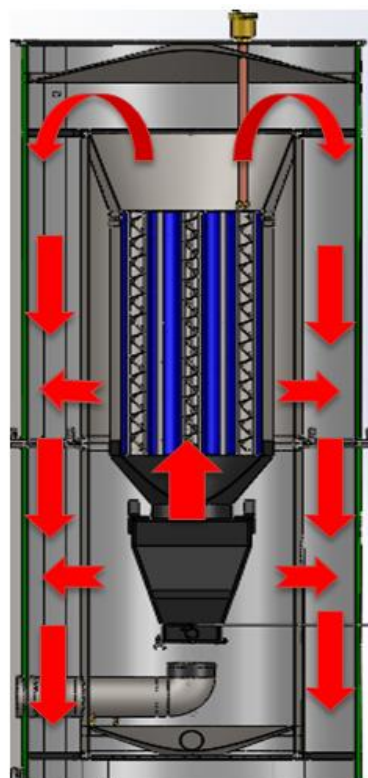


Figura 14. Flusso all'interno della camicia.

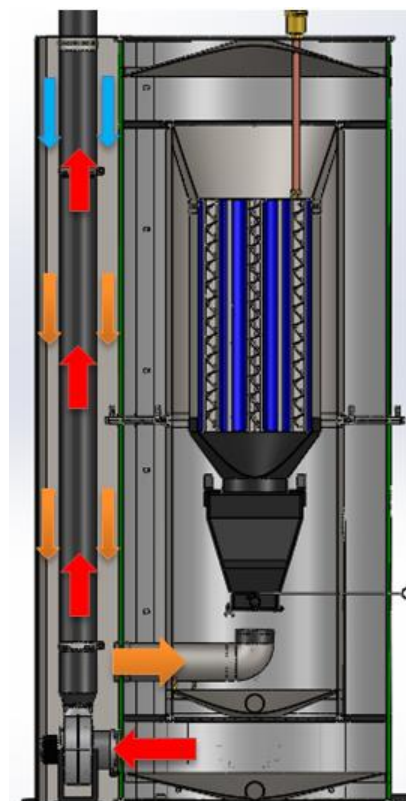


Figura 15. Recupero calore attraverso i fumi in uscita.



Questo principio ha preso come idea da un sistema già preesistente chiamato “sistema coassiale”, caratterizzato da una canna fumaria realizzata come uno scambiatore di calore tubo in tubo dove, l’aria in ingresso affluisce nel tubo esterno e viene riscaldata dal flusso d’aria interno generato dai fumi di scarico.

Per la coibentazione esterna è stato scelto come materiale la lana di roccia in quanto è l’unico coibentante che ha la capacità di resistere ad uno sbalzo di temperatura di 170°C. Lo spessore del coibentante scelto è pari a 50 mm. In questo modo conoscendo la conducibilità termica del coibentante e la conducibilità termica dell’acciaio riusciamo a determinare la potenza termica dispersa.

La conducibilità termica della lana di roccia  $\lambda=0,037\text{W/mK}$  mentre quella dell’acciaio assume un valore pari  $\lambda=22\text{W/mK}$ . Conoscendo lo spessore dei due materiali e la loro superficie riusciamo a determinare il valore della resistenza termica R.

R si determina dalla seguente formula:  $R = \frac{S}{\lambda * A}$  ; dove S rappresenta lo spessore del materiale mentre A rappresenta la superficie di scambio.

Essendo la parete formata da due materiali è necessario calcolare la resistenza termica totale, che si determina allo stesso modo della resistenza elettrica.

$$R_{tot} = R_1 + R_2$$

Nel nostro caso otteniamo  $R_{tot}=0,907\text{K/W}$ . È possibile ora andare a determinare la potenza dissipata che equivale a:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{tot}}$$

si ottiene dunque un valore pari a  $Q=187\text{ W}$ .

A parità di condizioni senza intercapedine quindi con una temperatura interna di 400°C avremmo ottenuto un valore di  $Q= 441\text{W}$  di gran lunga superiore.

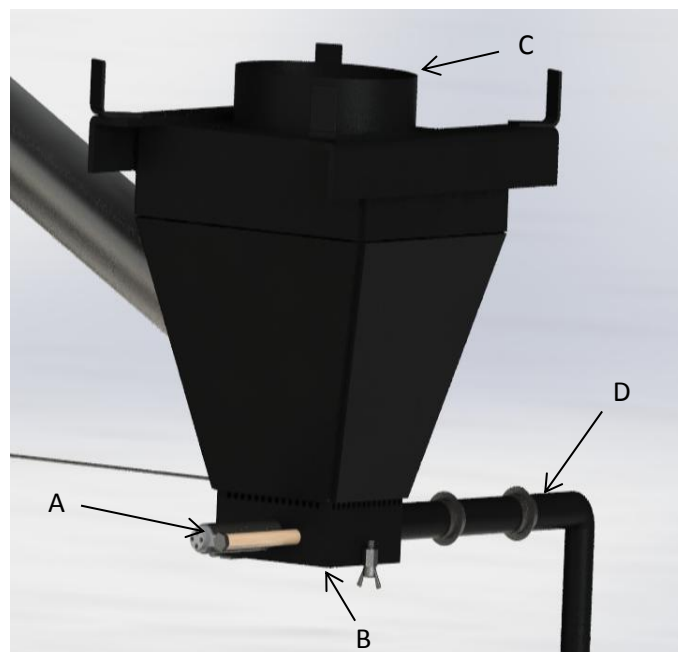
Si noti che la perdita di potenza non risulta essere molto elevata durante la fase di regime, il coibentante avrà maggiore valenza nella fase di avvio della caldaia dove ha il principale scopo di ridurre la fuoriuscita di calore per raggiungere così più facilmente le condizioni di regime.

### 3.4 Dimensionamento dei componenti.

In questo capitolo verranno esposti i dimensionamenti degli organi della caldaia dei quali si è già parlato in precedenza in occasione dell'esposizione dello sviluppo del progetto.

#### 3.4.1 Il bruciatore.

Il bruciatore è un componente di fondamentale importanza per il funzionamento della caldaia: al suo interno avviene la combustione del pellet da cui si sviluppano i fumi che andranno, grazie a uno scambiatore a fascio di fumi, a cedere calore al fluido vettore.



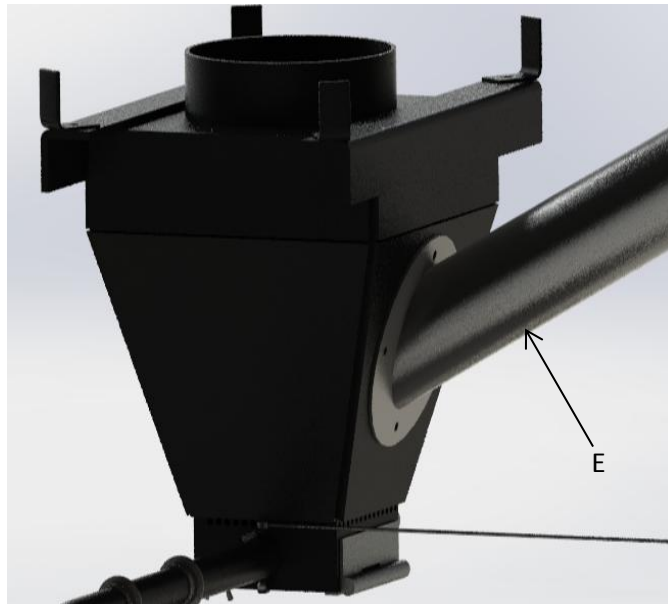


Figura 16. Il bruciatore

Il bruciatore è formato da:

- A. Candeletta di accensione.
- B. Crogiolo.
- C. Condotta evacuazione fumi.
- D. Condotta spirazione pellet incombusto.
- E. Condotta alimentazione pellet.

Per il dimensionamento del bruciatore è sufficiente che la portata di pellet necessaria a sviluppare una potenza termica di 8Kw, equivalente ad una portata di pellet pari a 2Kg/h, possa essere contenuta al suo interno.

La sua forma è stata studiata per far sì che il pellet in ingresso, attraverso la condotta di ricarica pellet, caschi esattamente nel punto di combustione, evitando così una eventuale dispersione. Questa sua conformazione, inoltre, favorisce l'afflusso dei fumi di combustione verso la condotta di evacuazione fumi, quest'ultima collegata a sua volta allo scambiatore a fascio di fumi mediante un diffusore, evitando così grosse perdite di energia.

Nella parte inferiore del bruciatore, luogo in cui avviene la combustione, troviamo il crogiolo, il quale è dotato nella superficie

laterale e inferiore di piccoli forellini che hanno lo scopo di far affluire l'aria proveniente dalla condotta d'aria, per ottenere in fase di combustione una perfetta alimentazione di comburente. Il crogiolo è dotato di una comoda apertura rapida che facilita i lavori di manutenzione senza necessità di smontare l'intera struttura.

L'accensione avviene per mezzo di una resistenza elettrica a cartuccia (candeletta) posta nel crogiolo, la quale si trova direttamente a contatto con il pellet; l'inizio della combustione non avviene affinché la temperatura locale non raggiunge i 350°C.

Tale progetto è partito dallo studio di un bruciatore già preesistente sul mercato, modificato appositamente per questa caldaia. Il bruciatore esaminato appartiene alla categoria "ad alimentazione per caduta dall'alto": i pellets cadono dall'alto tramite un condotto di caduta nel braciere che permette di controllare esattamente la combustione.

Nella realizzazione, il bruciatore è stato dotato di una particolare condotta che, collegata direttamente al crogiolo, ha lo scopo di svuotarlo nel caso in cui la combustione non dovesse innescarsi. Normalmente la condotta rimane chiusa ed è possibile aprirla grazie ad un apposito tirante in caso di necessità; il sistema è collegato direttamente ad un

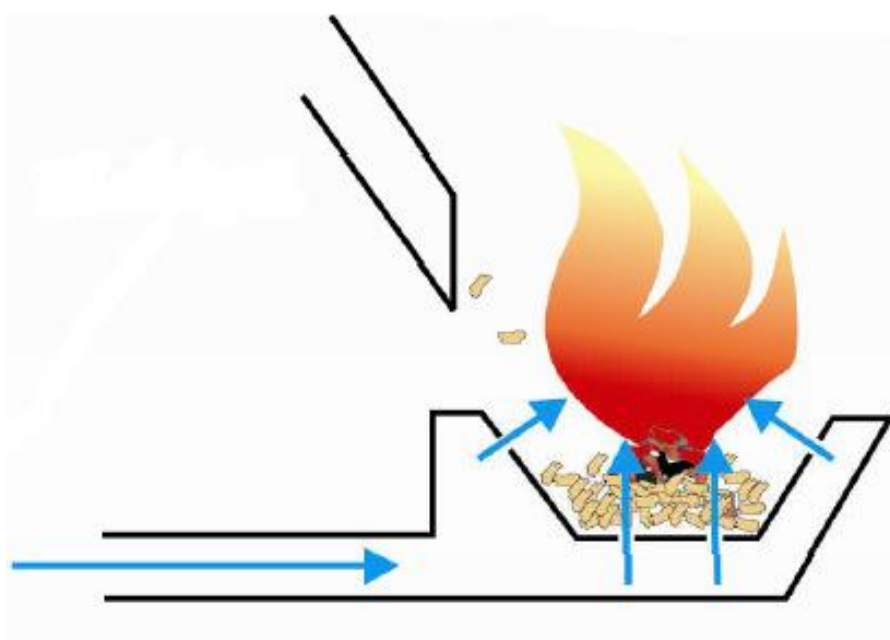


Figura 17. Schema bruciatore a caduta dall'alto.

ciclone posto al di fuori della caldaia che ha anche lo scopo di ripulirla da ceneri dovute alla combustione.

L'intero bruciatore è stato costruito mediante lamiere di ferro fe36 di spessore 5mm opportunamente saldate tra di loro.

#### 3.4.2 il sistema di ventilazione.

Il condotto dell'aria collega la camera di combustione con la camera ermetica; all'interno della camera ermetica è presente la canna fumaria, che ha lo scopo di preriscaldare il flusso d'aria in ingresso nel bruciatore al fine di non diminuire il rendimento della caldaia. Il diametro interno della condotta è paria a 80mm; la sua dimensione è stata scelta per motivi costruttivi cercando però allo stesso tempo di non influenzare negativamente le prestazioni della caldaia.

All'interno della condotta troviamo una resistenza elettrica che ha lo scopo principale di preriscaldare l'aria in ingresso nella camera di combustione e di facilitare l'accensione in fase di avvio.

L'afflusso d'aria all'interno della camera di combustione è di fondamentale importanza, perché garantisce la corretta combustione del pellet con la giusta quantità di ossigeno in base alla potenza richiesta.

Come è noto, durante la combustione è necessaria una massa d'aria superiore a quella stechiometrica per far avvenire la combustione



Figura 18. Il condotto dell'aria



Figura 19. Ingresso dell'aria all'interno della caldaia.

completa del combustibile. Questa quantità d'aria in più viene definita "eccesso d'aria" e si indica con la lettera greca  $\lambda$ .

Osservando la figura possiamo subito notare come l'eccesso d'aria vari in funzione della porta di combustibile e, di conseguenza, della potenza richiesta in un determinato istante di tempo.

La regolazione dell'eccesso d'aria è effettuata dal ventilatore che immette aria all'interno della camera ermetica ; il ventilatore ha velocità variabile, che viene regolata istante per istante dalla centralina.

L'aria teorica richiesta per la combustione corretta di un kg di pellet si determina:

$$At = \frac{8H + 2,667C + S - O}{0,232}$$

dove:

H= percentuale idrogeno presente nel combustibile

C= percentuale carbonio presente nel combustibile

S= percentuale di zolfo presente nel combustibile

O= percentuale di ossigeno presente nel combustibile.

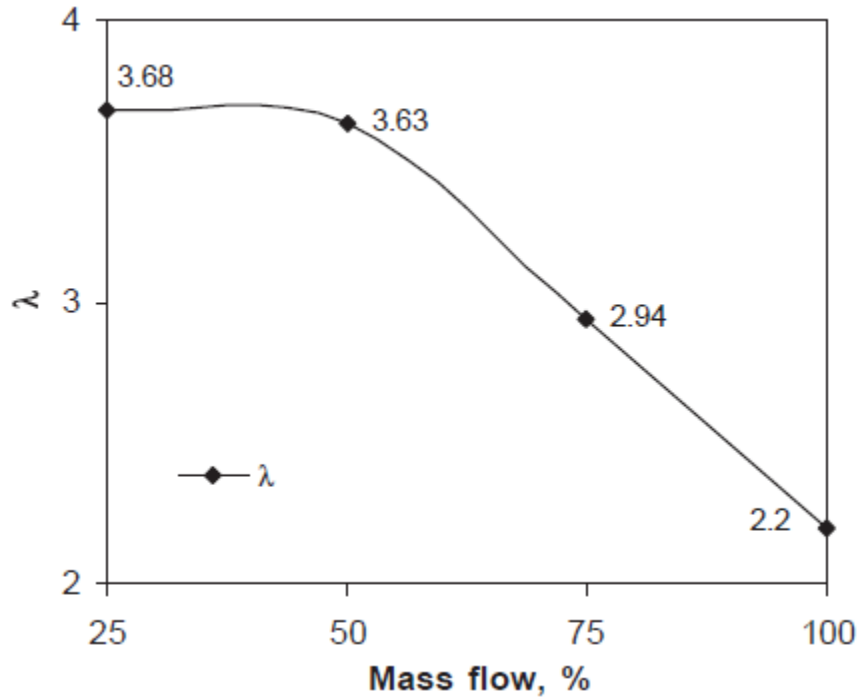


Figura 20. Diagramma dell'eccesso d'aria in funzione della portata di combustibile.

Prendendo in considerazione la composizione chimica del pellet realizzato con legame di faggio, si ottiene la corretta combustione di un kg di pellet, corrispondente a 15KgAria/KgComb.

Mediante questi dati e la portata oraria di combustibile, è possibile determinare la massa d'aria effettiva per la corretta combustione. Calcoliamo ora il flusso d'aria necessario per la potenza massima di 8Kw, ovvero la potenza massima sviluppata dalla caldaia.

Per sviluppare una potenza di 8Kw sono necessari 2Kg/h di pellet, perché il potere calorifero del pellet si aggira attorno a valori di 8000Kcal/m<sup>3</sup>, che e equivalgono a 5,2Kw. Quindi, considerando di avere un rendimento pari al 85% otteniamo:

$$\text{Portata pellet} = \frac{\text{Potenza termica sviluppata}}{\text{potere calorifero pellet} * 0,85} = 1,8Kg/h \cong 2Kg/h$$

Alla potenza massima, per una portata massima (100%), il valore dell'eccesso d'aria  $\lambda$  vale 2.2 (vedi figura 2). Mediante l'eccesso d'aria (rapporto tra la massa d'aria reale  $A_r$  e la massa d'aria stechiometrica  $A_s$ ), possiamo determinare la massa reale d'aria  $A_r$  equivalente a:

$$A_r = \lambda * A_t$$

Dai calcoli si ottiene che, per la combustione corretta di 1Kg di combustibile, sono necessari 33KgAria/KgComb. Di conseguenza, per determinare la portata d'aria massica per una certa portata di combustibile mc si utilizza la seguente relazione:

$$\dot{m}_{aria} = mc * At$$

Dai calcoli risulta che, per potenza massima di 8Kw, la portata di aria richiesta è pari a 66KgAria/h, equivalenti a 0,0183 kgAria/s.

Alla luce dei calcoli si dovrà scegliere un ventilatore che abbia una portata d'aria non inferiore a quella massima richiesta.



Figura 21. Ventilatore

### 3.4.3 il sistema di alimentazione mediante coclea.

Il sistema di alimentazione a coclea permette di prelevare il pellet dal silo di stoccaggio, portarlo verso la caldaia e, per caduta, alimentare il bruciatore.

Il sistema consiste in una spirale rigida metallica, contenuta in un apposito tubo metallico rettilineo (diametro interno 60mm e spessore 3mm), che viene movimentata da un motoriduttore. Il pellet viene convogliato dalla parte inferiore del silo fin sopra l'imbocco del bruciatore, per essere poi lasciato cadere per gravità attraverso un tubo anch'esso metallico. L'inclinazione di quest'ultimo per legge non deve essere inferiore ai 45°, in maniera tale da evitare che le fiamme si possano propagare fino a raggiungere la zona ove è contenuto il combustibile.

La coclea utilizzata è stata progettata appositamente per questa caldaia e dimensionata in base ai motoriduttori commerciali presenti sul mercato, al fine di garantire una portata nel bruciatore di 2kg/h di pellet.





Figura 22. Coclea

Per effettuare tale progetto sono necessari:

- Caratteristiche del materiale da trasportare
- Peso specifico del materiale
- Lunghezza del trasporto
- Altezza di sollevamento
- Inclinazione della coclea
- Potenzialità orarie della coclea

Partiamo con il dimensionamento della coclea.

La potenzialità oraria del trasportatore è data dalla relazione:

$$Q = k * A * V$$

con:

$K$ : coefficiente che dipende dall'unità di misura utilizzata

$A$ : sezione riempita dalla coclea:  $A = \emptyset * \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2)$  [m<sup>2</sup>]

- $D_e$  : diametro esterno dell'elica nel tratto di trasporto [m]
- $D_i$ : diametro interno dell'elica nel tratto di trasporto [m]
- $\emptyset$ : coefficiente di riempimento

Assumiamo come diametro esterno  $D_e=60mm$ , come diametro interno  $D_i=20mm$  e come coefficiente di riempimento  $\emptyset=0,9$ . Otteniamo così un valore della sezione di riempimento pari  $A=0,0025 m^2$ .

Per determinare la velocità di avanzamento utilizziamo la reazione della potenzialità oraria scritta precedentemente, assumendo un valore di  $Q$  derivante dalla formula:

$$Q = \frac{\text{portata massica combustibile}}{\text{peso specifico del combustibile}}$$

dove:

- la portata massica del combustibile è pari a 2Kg/h
- il peso specifico del pellet è pari a 650kg/m<sup>3</sup>,

ottenendo una portata volumetrica di pellet pari a 0,0031 m<sup>3</sup>/h.

Alla luce dei risultati ottenuti possiamo determinare il valore della velocità di avanzamento  $V=1,3m/h$ .

Imponiamo di avere una velocità di rotazione della coclea unitaria  $n=2\text{giri/min}$ . Così facendo possiamo ottenere dalla seguente relazione il passo trasversale:

$$Pt = \frac{V}{n} * 60$$

Il risultato ottenuto è pari a  $Pt= 10,8mm=11mm$ .

In definitiva otteniamo una coclea con le seguenti caratteristiche:

- Lunghezza: 1200mm
- Diametro interno: 20 mm
- Diametro esterno: 60 mm
- Passo: 11 mm

È necessario ora determinare la potenza resistente per la scelta del motoriduttore. Tutte le resistenti che devono essere superate per

assicurare il trasporto del materiale possono essere classificate in 2 termini:

$$P = Ph + Pst$$

dove:

- Ph è la potenza di avanzamento del carico
- Pst è la potenza di sollevamento del materiale alla quota H.

Nel calcolo sono state trascurate la potenza di estrazione, perché zona di estrazione relativamente piccola, e la potenza degli attriti a vuoto.

Ph: potenza di avanzamento del carico [kW]:

$$Ph = \frac{k * \emptyset * \frac{\pi}{4} * (De^2 - Di^2) * Pt * n * \gamma m * L * \lambda}{367}$$

con:

$\lambda$ : coefficiente di resistenza all'avanzamento; si assume come valore per materiali legnosi 1,9.

$\gamma m$ : peso specifico del materiale [t/m<sup>3</sup>]; si assume per il pellet 0,65[t/m<sup>3</sup>]

L: lunghezza del tratto di trasporto; si assume un valore pari a 1,2 [m]

Otteniamo in definitiva un valore di  $Ph=2*10^{-7}$  Kw.

Pst= potenza per il sollevamento del materiale alla quota H [Kw]:

$$Pst = \frac{k * A * V * \gamma m * H}{376}$$

con:

H:altezza in metri; si assume come valore 0,825m.

Otteniamo in definitiva un valore di  $Pst=1,28*10^{-6}$ [Kw].

Quindi la potenza persa assume un valore pari a  $P= 1,48*10^{-6}$ [Kw].

È necessario scegliere un motoriduttore che generi in uscita una potenza maggiore di P ed un numero di giri non inferiore a 2giri/min.



Figura 23. Motoriduttore

Si è scelto un motore elettrico ed un riduttore commerciale. Il motore elettrico selezionato dopo un'attenta valutazione è prodotto dall'azienda MGM S.p.A. Il motore è stagno da poter così essere posto anche all'aperto. Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche:

Serie= BA 71A8

Potenza = 0,08 [Kw]

Rpm= 660 [giri/min]

Nel caso del riduttore, invece, dopo un'attenta valutazione si è scelto il prodotto realizzato dall'azienda STM.

Si riportano le caratteristiche tecniche:

Serie= ORP71

Rapporto di riduzione= 1:342.9

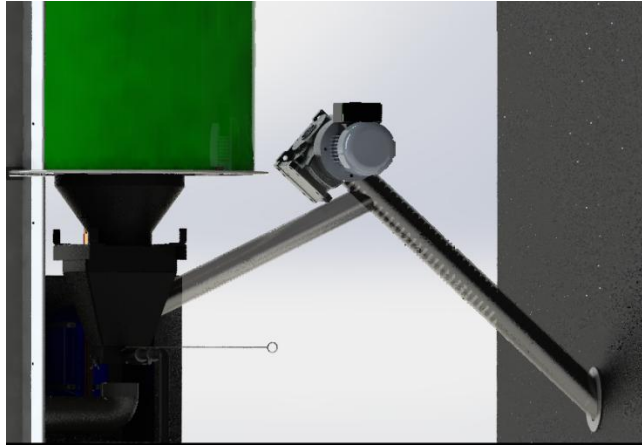


Figura24. Il sistema di trasporto a coclea.

#### 3.4.4 Lo scambiatore di calore .

Lo scambiatore di calore progettato per la seguente caldaia è a fascio di fumi, dove un fluido caldo, in questo caso i fumi prodotti dalla combustione del pellet, riscalda prevalentemente per convezione il fluido vettore, ovvero l'acqua contenuta all'interno dello scambiatore di calore.

Uno scambiatore di calore è comunemente una macchina in cui l'energia viene trasferita da un fluido ad un altro attraverso una superficie solida. I meccanismi che governano questo trasferimento di energia sono soprattutto quelli per convezione e conduzione.

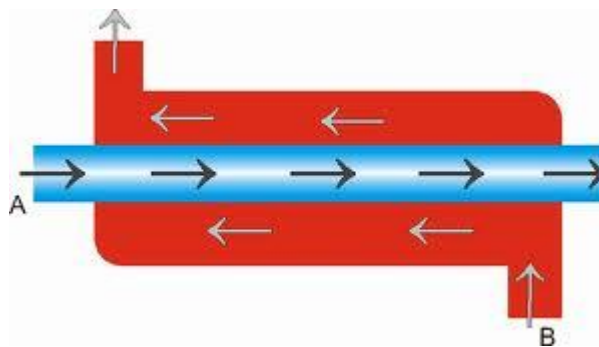
Lo scambiatore a fascio di fumi risulta essere uguale ad uno scambiatore a fascio tubiero, costituito da un corpo cilindrico, il mantello, al cui interno circola il fluido vettore e dove sono contenuti una serie di tubi nei quali circola il secondo fluido, nel nostro caso i fumi provenienti dalla combustione.

I due fluidi hanno temperature differenti in maniera tale che l'energia termica si sposti dal fluido a temperatura più alta a quello a temperatura più bassa; nel presente progetto, il primo risulta essere il fluido vettore mentre il secondo i fumi prodotti dalla combustione. Di fondamentale importanza è il senso di circolazione dei due fluidi all'interno dello scambiatore, flusso che può essere distinto in due differenti casi:

*Equicorrente*: i due fluidi scorrono uno parallelo all'altro nella stessa direzione; si tratta di una tipologia poco diffusa in quanto ha efficienza piuttosto ridotta.

*Controcorrente*: i due fluidi scorrono l'uno parallelo all'altro, ma in direzione opposta; si tratta della tipologia più diffusa in quanto ha efficienza più elevata.

Alla luce delle due tipologie, si è deciso di realizzare in tale progetto uno scambiatore di calore controcorrente che, avendo una efficienza più elevata, riduce notevolmente la superficie di scambio e, di conseguenza, gli ingombri e i costi dei materiali necessari.



Figur 25. Conformazione di uno scambiatore controcorrente tubo in tubo

Per effettuare il dimensionamento, è necessario conoscere la potenza termica scambiata e la temperatura di ingresso ed uscita sia del fluido vettore che dei fumi.

Mediante la seguente equazione è possibile determinare la superficie di scambio:

$$A = \frac{Q}{K * \Delta T_{ml}}$$

dove:

- Q rappresenta la potenza termica scambiata
- K rappresenta il coefficiente globale di scambio termico
- A la superficie di scambio
- $\Delta T_{ml}$  variazione di temperatura con il metodo della media logaritmica

È quindi necessario delineare i dati per la risoluzione del problema.

La potenza termica scambiata risulta essere pari a 8 kW equivalenti a 8000W.

Le temperature dei due fluidi, imposte dai dati di progetto, sono le seguenti:

*caratteristiche del fluido caldo:* temperatura di ingresso  $T_1=400^\circ\text{C}$

temperatura di uscita  $T_2=200^\circ\text{C}$

*caratteristiche del fluido freddo:* temperatura di ingresso  $t_1=50^\circ\text{C}$

temperatura di uscita  $t_2=80^\circ\text{C}$

Grazie a questi dati è ora possibile determinare la variazione della temperatura con la media logaritmica:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

La determinazione del coefficiente globale di scambio termico per convezione è di difficile scelta, dato che esso è in funzione della forma geometrica, del liquido e del gas, della velocità e delle proprietà termiche della superficie; tali circostanze portano a effettuare una approssimazione e ad assumere un valore da tabella pari a  $30 \text{ w/m}^2\text{k}$ .

Essendo ora a disposizione di tutti i dati, è possibile determinare la superficie di scambio che assumerà un valore pari a  $A=1,18\text{m}^2$ .

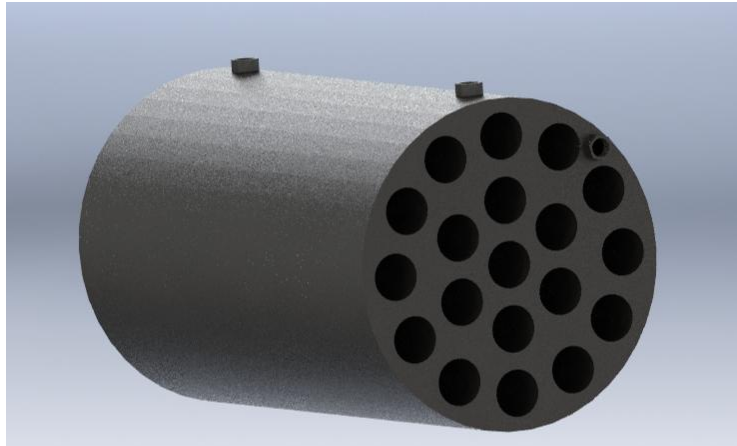
Per la costruzione dello scambiatore si utilizzano tubi di diametro di due pollici (equivalenti a 40mm) e si impone una lunghezza di scambio pari a 500mm.

Il numero di tubi necessario per realizzare lo scambiatore si ottiene dal seguente calcolo:

$$N = \frac{\text{Area di scambio}}{\text{Supeficie interna tubo}}$$

Risulta che  $N=19$ , quindi sono necessari 19 tubi per realizzare lo scambiatore.

Per mezzo di altri calcoli, non inseriti volontariamente in tale spiegazione, si determina il diametro esterno dello scambiatore, che assume un valore pari a 280mm.



**Figura 26. Scambiatore di calore ottenuto**

L'intero scambiatore è in acciaio inossidabile AISI 314L adatto per saldature, ed è stato realizzato mediante l'utilizzo di tubi commerciali di spessore 2mm, per ridurre notevolmente i costi di produzione. La struttura è completamente ermetica in modo tale da evitare perdite di fluido vettore.

Lo scambiatore è stato dotato di un sistema innovativo di spirali pulitrici realizzate in acciaio e poste all'interno dei tubi di scambio. Il principio su cui si basano è molto semplice: durante la fase di combustione, con l'innalzamento delle temperature, il materiale ferroso tende ad espandersi provocando così un allungamento naturale delle spira che, essendo direttamente a contatto con la superficie interna dei tubi, gratta via le incrostazioni provocate dal passaggio dei fumi di combustione. La loro presenza porta anche ad un aumento della superficie di scambio e, conseguentemente, ad un aumento delle prestazioni dello scambiatore di calore.



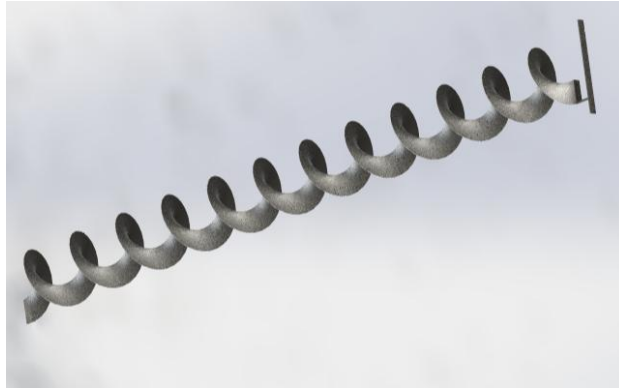


Figura 27. Spirale pulitrice

### 3.4.5 *L'impianto idraulico*

L'impianto idrico ha la funzione di trasferire l'energia termica dalla caldaia al circuito di riscaldamento; ciò avviene attraverso un fluido vettore che scorre in un circuito chiuso di tubazioni che collegano lo scambiatore a fascio di fumi della caldaia allo scambiatore a piastre del circuito di riscaldamento.

Il fluido vettore è composto da acqua arricchita da glicole, il quale abbassa la temperatura di solidificazione del liquido impedendo il suo congelamento nei momenti di inutilizzo della caldaia.

Nell'intero impianto circolano 25 litri d'acqua derivante dalle dimensioni dell'impianto.

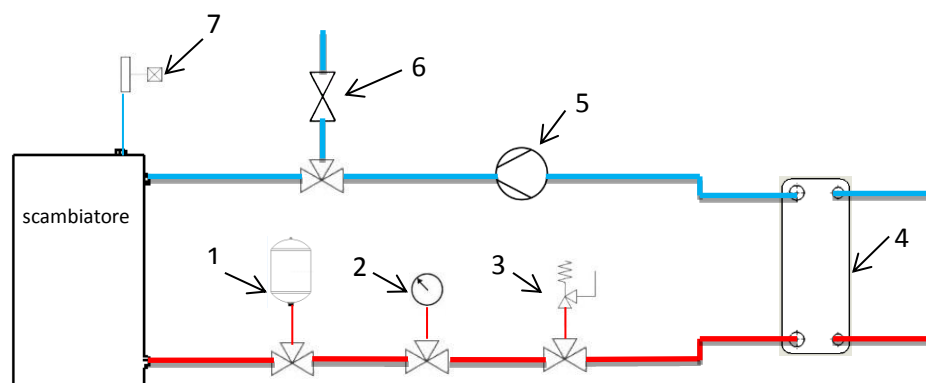
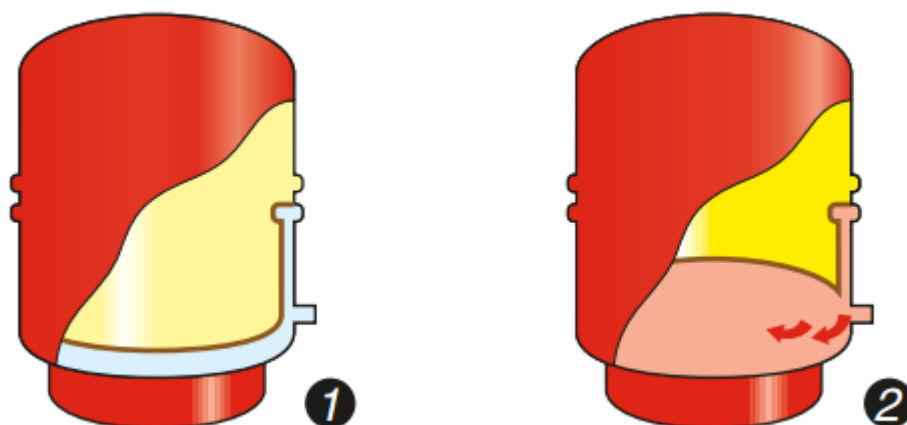


Figura 28. schema impianto idrico

L'impianto è composto da:

1. Vaso di espansione chiuso. E' un dispositivo atto alla compensazione del volume del fluido vettore che viene utilizzato sia negli impianti di riscaldamento che in quelli di produzione di acqua calda e sanitaria. Il vaso di espansione chiuso a membrana (diaframma) è costituito da un contenitore chiuso suddiviso in due parti da una membrana che separa l'acqua dal gas (in genere azoto) e che agisce da compensatore della dilatazione. A seguito dell'incremento di temperatura, nel vaso si produce un aumento di pressione rispetto al valore iniziale (fig. 1), fino a raggiungere il valore corrispondente alla massima dilatazione (fig. 2).



Per la scelta del vaso di espansione è necessario calcolare la sua capacità, che si determina dalla seguente formula:

$$V = \frac{e * c}{1 - \frac{P_i}{P_f}}$$

V = Volume del vaso [Litri].

e = coefficiente di espansione dell'acqua. Calcolato in base alla massima differenza tra la temperatura dell'acqua a impianto freddo e quella massima d'esercizio. Per il riscaldamento, si assume il valore convenzionale di 0,035.

C = contenuto di acqua dell'impianto [Litri].

Pi= pressione assoluta iniziale (bar) alla quota in cui è installato il vaso.  
E' rappresentata da pressione idrostatica + 0,3 bar + pressione atmosferica (1 bar); è la pressione di precarica del vaso aumentata di 1 bar.

Pf= pressione assoluta finale (bar). E' rappresentata dalla pressione massima di esercizio dell'impianto + pressione atmosferica (1 bar), ovvero la pressione di taratura della valvola di sicurezza aumentata di 1 bar.

2. Manometro. È lo strumento che ha lo scopo di rilevare la pressione all'interno del circuito idrico; viene utilizzato per controllare e regolare la pressione durante la fase di ricarica e di esercizio del impianto.

3. Valvola di sicurezza. E' la valvola che, automaticamente, con l'ausilio di una molla scarica all'esterno della caldaia una quantità di fluido tale da impedire che, all'interno del circuito, venga superata la pressione di sicurezza prefissata. Essa si richiude quando si ristabiliscono le condizioni normali di pressione di esercizio.

La valvola di sicurezza va scelta in maniera tale da garantire una portata minima di scarico P pari a

$$P = \frac{Q}{0,58} \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

dove Q è la potenza termica generata dalla caldaia.

E' stata, quindi, adottata una valvola di sicurezza commerciale adatta per impianti di riscaldamento con taratura 3bar.

In questo progetto, secondo le norme vigenti, la valvola di sicurezza è posta a meno di un metro dallo scambiatore di calore.

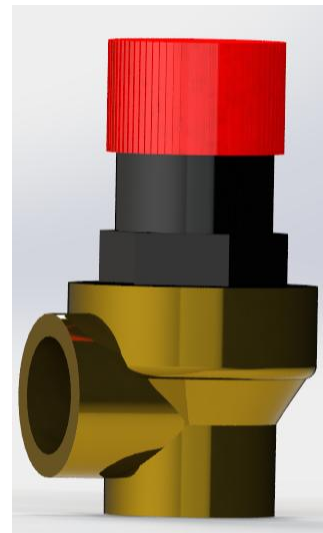
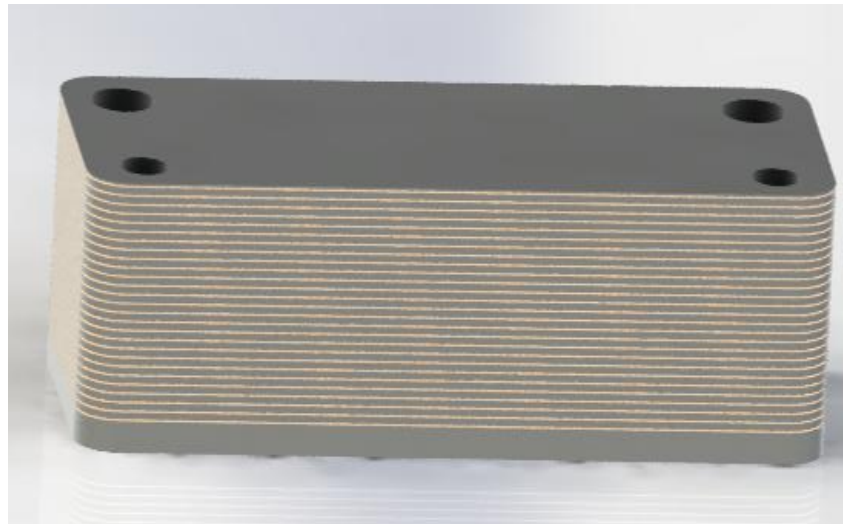


Figura 30. Valvola di sicurezza

4. Scambiatore a piastre. E' costituito da una sequenza di piastre corrugate, con lo scopo di aumentare la loro superficie di scambio e la turbolenza ed evitare la loro flessione, dello spessore (circa 0,5mm); tali piastre, sono separate l'una dall'altra di circa 1,5mm da una guarnizione

in gomma o in altro materiale, capace di garantire la tenuta idraulica verso l'esterno e intorno ai fori di passaggio. Ciascuna coppia di piastre delimita una camera di passaggio per il fluido caldo o per il fluido freddo: ciascuna piastra è a contatto da un lato con il fluido caldo e dall'altro lato con il fluido freddo, in maniera alternata. Ogni piastra presenta quattro fori, due di alimentazione e due di scarico, agli angoli. Normalmente, questi tipi di scambiatori a piastre sono montati all'interno della caldaia e hanno la funzione di produrre acqua sanitaria, mentre nel nostro caso cedono calore all'acqua del circuito di riscaldamento.



**Figura 31. Scambiatore a piastre.**

5. Pompa di circolazione. È necessaria per movimentare il fluido all'interno del circuito e vincere le perdite causate dagli attriti e superare i salti entalpici. La pompa di circolazione è una pompa centrifuga ; il fluido viene messo in rotazione da una girante, aspirato assialmente e rinviato in direzione periferica all'estremità delle pale della girante stessa. Una pompa è caratterizzata da due parametri: portata e prevalenza. La scelta della portata si determina in base alla potenza termica sviluppata mediante la seguente formula:

$$P = \frac{Q}{Cp * \rho * \Delta T}$$

dove:

$Q$ = potenza termica della caldaia

$C_p$ = calore specifico del fluido vettore

$P$ = densità del fluido vettore

$\Delta T$ = variazione di temperatura del fluido vettore

Successivamente, si passa alle perdite di carico del circuito e all'individuazione della sua curva caratteristica; in base alle perdite di carico, si riporta la curva su un diagramma  $P/h$  (portata/entalpia) assieme a quella caratteristica della pompa, determinando così il punto di funzionamento.

6. Valvola di reintegro. Collega l'impianto con l'impianto idrico esterno. Ha lo scopo di caricare l'impianto la prima volta e di ricaricarlo ogni qualvolta si abbiano perdite di fluido causate da guasti o apertura della valvola di sicurezza. Mediante questa valvola è possibile regolare la pressione iniziale dell'impianto, nel nostro caso equivalente a 1bar.

7. Valvola automatica di sfogo aria. Svolge la funzione di evacuare l'aria contenuta nei circuito idrico. Tale dispositivo ottimizza il funzionamento dell'impianto, limitando fenomeni di rumorosità, corrosione e cattiva circolazione. Deve essere posizionata nel punto più alto dell'impianto, nel nostro caso è collegata diretta allo scambiatore di calore e posizionata nella parte più elevata della caldaia.

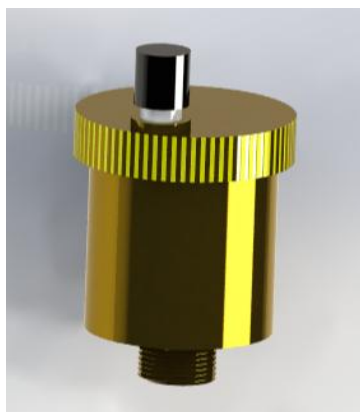


Figura 32. valvola di sfogo automatico aria

### Scelta diametro delle condotte.

La scelta delle condotte del circuito idrico è stata fatta in maniera tale da garantire il trasferimento di energia del fluido il più veloce possibile. Di norma, le velocità all'interno delle condotte non devono superare gli 1,5m/s, altrimenti si rischia di avere grosse perdite di carico e quindi grossi dispendi di energia che devono essere colmati dalla pompa. Per determinare il diametro della condotta è prima di tutto necessario calcolare la portata d'acqua che si determina secondo la seguente relazione:

$$P = \frac{Q}{(Cp * \Delta T)}$$

Dove:

Q= potenza termica della caldaia, che nel nostro caso vale 8000 W equivalenti a 6908,44Kcal/h

Cp= calore specifico del fluido vettore, nel caso dell'acqua vale  $1 \cdot 10^{-3}$  kcal.

$\Delta T$ = variazione di temperatura del fluido vettore, nel nostro caso  $T_i=50^\circ\text{C}$   $T_f= 80^\circ\text{C}$  quindi si ottiene un  $\Delta T=30$ .

A seguenti di tali calcoli, otteniamo una portata pari a 230Kg/h equivalenti a 0,230m<sup>3</sup>/h. Per determinare quindi il diametro:

$$d = \sqrt{\frac{p * 4}{\pi * v}}$$

Si ottiene un diametro pari a 7mm. Per sicurezza si assume un diametro paria a 12mm.

Per proteggere l'impianto dagli agenti atmosferici, lo si è posto all'interno di un contenitore esterno alla caldaia opportunamente coibentato, il quale è dotato di appositi attacchi per collegare la caldaia all'impianto di riscaldamento.



Figura 33. Assieme del circuito idraulico



Figura 34. Il contenitore esterno del circuito idraulico

#### 3.4.6 Il serbatoio di stoccaggio.

Il serbatoio di stoccaggio è stato realizzato per garantire l'approvvigionamento per l'intera stagione e ridurre i costi di ricarica. Per determinare la quantità di combustibile che garantisca questa funzione, il dimensionamento è stato determinato in base ai consumi massimi generati dalla caldaia. E' quindi è necessario stabilire alcuni dati fondamentali:

- Portata massica di combustibile oraria consumata dalla caldaia; essa dipende dalla potenza termica sviluppata dalla caldaia. Supponiamo di avere la caldaia alla sua potenza massima, cioè 8Kw; conoscendo la capacità del potere calorifero del pellet che si aggira intorno ai 4500Kcal/kg,

equivalenti a 5,2kw, è possibile determinare la quantità di pellet necessaria a sviluppare tale potenza:

$$\dot{m}_{\text{pellet}} = \frac{P_{\text{caldaia}}}{\text{Calore specifico pellet} * \eta} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

dove:

$\eta$  rappresenta il rendimento dello scambiatore e risulta essere uguale a 0,85.

Quindi dall'equazione è possibile determinare il valore della portata massica  $\dot{m}_{\text{pellet}} = 1,8 \simeq 2 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$ .

- Tempo di attività della caldaia. Si suppone che il tempo giornaliero di attività della caldaia si aggiri intorno alle 10 ore giornaliere e che la caldaia rimanga attiva ogni giorno del periodo invernale, normalmente dall'inizio di novembre alla fine di marzo. Per 5 mesi totali di attività le ore accumulate per l'intera stagione invernale ammontano a 1500.
- Densità del combustibile pellet. La densità di un comunissimo combustibile pellet si aggira intorno ai  $650 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$ .

Alla luce dei dati forniti, è possibile andare a determinare la quantità di pellet per l'intera stagione e di conseguenza il volume del serbatoio da realizzare. La quantità di combustibile per l'intera stagione, si ottiene mediante un semplice calcolo ed equivale a  $m=3000$  [kg].

Conoscendo la densità del pellet e la quantità di combustibile per l'intera stagione, si ottiene il volume della cisterna mediante la seguente formula:

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{pellet}}} = \frac{3000}{650} = 4,6 \text{ [m}^3\text{]}$$

Quindi il serbatoio non deve avere una dimensione inferiore a quella ottenuta per garantire l'approvvigionamento stagionale.



Si è dunque realizzato un serbatoio avente un volume pari a 5 m<sup>3</sup> e con dimensioni di ingombro pari a 1600X1600X2800mm. L'intera struttura è stata progettata mediante tubolari quadrati di ferro fe36 di dimensione 40X40X2 e lamiera in ferro fe00 di spessore 1.5mm.

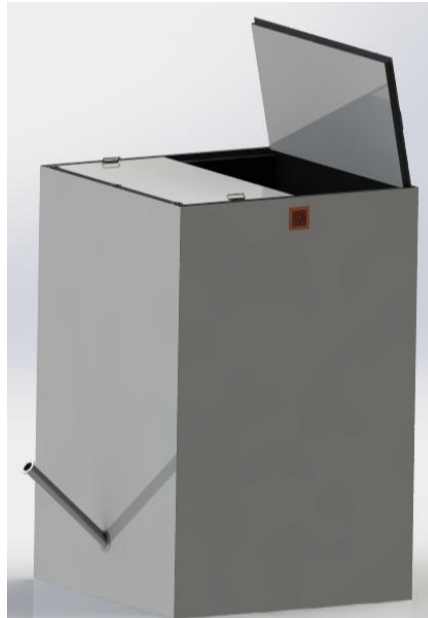


Figura 35. Il serbatoio di stoccaggio

Per garantire un perfetto isolamento dall'ambiente esterno e mantenere inalterate le proprietà fisiche del pellet, si è provveduto a realizzare un sistema di isolamento con pannelli di lana di roccia spessi 20mm e interposti nell'intercapedine tra la lamiera interna e la lamiera esterna. I portelloni di apertura sono stati dotati di apposite guarnizioni per impedire che l'acqua piovana entri all'interno. La cisterna di stoccaggio è collegata alla caldaia mediante un sistema di trasporto a coclea che ha il compito di convogliare il combustibile all'interno del bruciatore. Per garantire l'afflusso di combustibile a tale sistema, è necessario realizzare sul fondo della cisterna una sorta di imbuto con una inclinazione delle pareti non inferiore ai 30°.



Figura 36. Pareti inclinate fondo cisterna

### 3.5 Valutazione del costo della caldaia

Sono stati stimati i costi per la realizzazione della caldaia, tenendo in considerazione solamente i costi dei materiali utilizzati e trascurando quelli della manodopera necessaria per la realizzazione.

Nella tabella (figura 37) sono indicati quantità e costi dei singoli componenti.

Il costo della caldaia risulta essere relativamente alto, quindi sarà necessario effettuare un'attenta valutazione dei materiali utilizzati per riuscire così a ridurre i costi.

Componente	unità di misura	quantità	commerciale	costo complessivo
<b>Serbatoio</b>				
Lamiera zincata spessore 0.8mm	m <sup>2</sup>	7,90	€ 12,00	€ 94,80
Lamiera zincata spessore 1,5mm	m <sup>2</sup>	11,40	€ 20,65	€ 235,41
Tubi in ferro fe 36 quadrati 40x40 spessore 2mm	m	33,75	€ 2,67	€ 90,11
Tubi in ferro fe 36 quadrati 40x40 spessore 1,5mm	m	11,56	€ 2,18	€ 25,20
Tubi di alluminio quadrati 40X40 spessore 2mm	m	8,93	€ 13,85	€ 123,65
Lana di roccia spessore 40mm	m <sup>2</sup>	6,32	€ 3,22	€ 20,35
cerniere	n	6	€ 6,00	€ 36,00
maniglie	n	4	€ 3,00	€ 12,00
guarnizioni	n	2	€ 3,18	€ 6,36
grata in rame	n	1	€ 12,55	€ 12,55
<b>TOTALE</b>				<b>€ 656,44</b>
<b>Sistema di trasporto a coclea</b>				
Tubo in acciaio zincato Ø 60mm spessore 3mm	m	1,70	€ 5,76	€ 9,79
coclea lunghezza 1200mm	n	1	€ 55,00	€ 55,00
riduttore	n	1	€ 130,00	€ 130,00
motore elettrico ermetico 8 poli	n	1	€ 75,00	€ 75,00
<b>TOTALE</b>				<b>€ 269,79</b>
<b>Telaio caldaia</b>				
Fusto Ø 590X859mm	n	2	€ 38,05	€ 76,10
Fusto Ø 380x590mm	n	2	€ 31,48	€ 62,96
lamiera acciaio spessore 1,5mm	m <sup>2</sup>	1,39	€ 97,00	€ 134,83
Tubo in ferro fe 36 30X20mm	m	0,95	€ 2,40	€ 2,27
Sostegno interno	n	2	€ 6,00	€ 12,00
<b>TOTALE</b>				<b>€ 288,16</b>
<b>Componenti caldaia</b>				
aspiratore fumi	n	1	€ 139,00	€ 139,00
ventilatore	n	1	€ 10,00	€ 10,00
canna fumaria 1m	n	2	€ 29,50	€ 59,00
tubo acciaio Ø80 spessore 0,6mm	m	0,25	€ 35,00	€ 8,75
tubo acciaio Ø40 spessore 1mm	m	0,74	€ 1,78	€ 1,31
lamiera spessore 1mm	m <sup>2</sup>	0,37	€ 66,00	€ 24,29
resistenza elettrica	n	1	€ 25,00	€ 25,00
<b>TOTALE</b>				<b>€ 267,35</b>
<b>Scambiatore di calore</b>				
Tubo acciaio Ø280mm	m	0,50	€ 128,00	€ 64,00
Tubo acciaio zincato 1"	m	9,50	€ 6,00	€ 57,00
spirali pulitrici	n	19	€ 0,53	€ 10,07
<b>TOTALE</b>				<b>€ 131,07</b>
<b>Bruciatore</b>				
lamiera in ferro fe 36 spessore 5mm	m <sup>2</sup>	0,48	€ 48,00	€ 23,04
diffusore	n	1	€ 1,97	€ 1,97
candelletta di accensione	n	1	€ 25,00	€ 25,00
<b>TOTALE</b>				<b>€ 50,01</b>
<b>Impianto idrico</b>				
Lunghezza tubo rame Ø12mm	m	3,00	€ 6,00	€ 18,00
Lunghezza tubo rame Ø8mm	m	0,46	€ 4,30	€ 1,98
vaso di espansione chiuso	n	1	€ 25,00	€ 25,00
scambiatore a piastre	n	1	€ 56,00	€ 56,00
pompa di circolazione	n	1	€ 75,00	€ 75,00
valvola di sicurezza	n	1	€ 4,80	€ 4,80
manometro	n	1	€ 50,00	€ 50,00
valvola sfogo aria automatica	n	1	€ 5,70	€ 5,70
raccordo	n	8	€ 1,60	€ 12,80
<b>TOTALE</b>				<b>€ 249,28</b>
<b>TOTALE GENERALE</b>				<b>€ 1.912,10</b>

Figura 37. Tabella dei costi

## **4. REALIZZAZIONE DI UNA NUOVA TIPOLOGIA DI PELLETT.**

### *4.1 Introduzione alla combustione del pellet.*

#### *4.1.1 La combustione del pellet.*

La combustione del pellet consiste in una serie di reazioni chimiche che prevedono per ultimo l'ossidazione del carbone vegetale.

Il pellet durante il processo di combustione subisce un graduale riscaldamento. La prima fase è l'essiccamento, seguito dal rilascio di una serie di componenti volatili. Tali sostanze vengono a formarsi a causa delle trasformazioni chimiche che avvengono a livello strutturale nel pellet, questa fase si definisce pirolisi oppure devolatilizzazione. La fase successiva alla pirolisi consiste nella combustione dei gas sprigionati grazie all'ossigeno presente in camera di combustione.

Durante tutto il processo di pirolisi si ha una trasformazione dei componenti in carbone definito "char". Il carbone durante la sua combustione non rilascia più componenti volatili, quindi la combustione non avviene più grazie alla combustione gas, ma il suo consumo avviene per ossidazione eterogenea prodotta dall'ossigeno che passando all'interno suo interno reagisce con il carbonio presente. Grazie alla volatilizzazione durante il processo nel carbone vengono a formarsi forellini che durante il processo di ossidazione facilitano l'afflusso dell'ossigeno al suo interno aumentando così la superficie di scambio generando un'ossidazione più uniforme e completa.

Riassumendo le fasi della combustione otteniamo quindi:

- Riscaldamento del solido
- Essiccamento
- Pirolisi con rilascio dei gas
- Combustione dei gas
- Combustione secondaria eterogenea gas-solido

#### 4.1.2 La composizione del pellet

La composizione chimica media del combustibile pellet consiste circa 30% lignina e 75% di carboidrati, che vengono definiti dalla cellulosa e dall'emicellulosa, nel legno solitamente è presente il 50% del primo e il 25% del secondo. La cellulosa costituisce le fibre che danno alle piante la loro resistenza, mentre la lignina ha la funzione di collante.

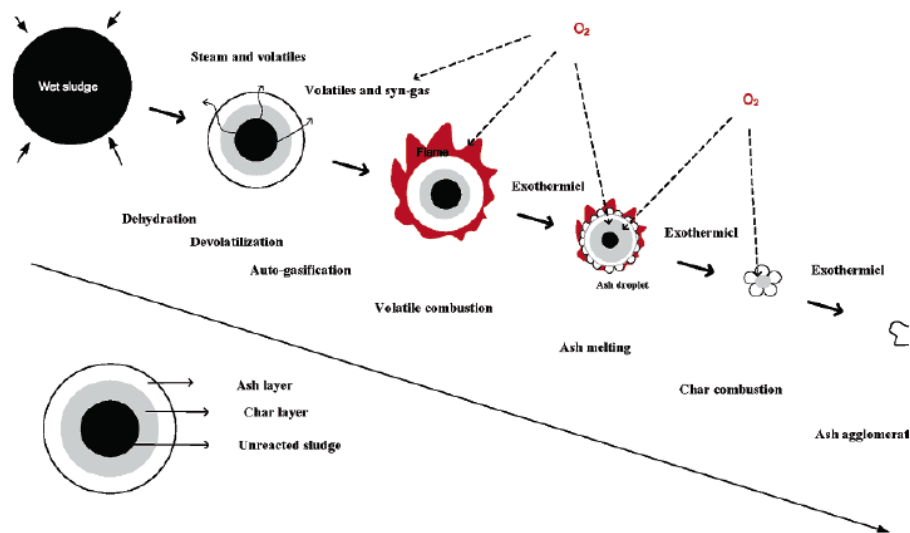


Figura 38. Il processo di combustione del pellet

#### 4.1.3 Il processo di pirolisi

Il pellet a contatto con il calore subisce un riscaldamento iniziando così a perdere acqua nei propri tessuti. I processi che avvengono in questa fase sono reversibili e la temperatura interna del pellet non supera i 70°C. All'aumentare delle temperature l'acqua presente fuoriesce completamente fino ad arrivare alla temperatura di 100°C. Da questa temperatura in poi i processi che precedentemente erano stati definiti reversibili diventano irreversibili a causa dell'innescarsi del processo di pirolisi.

Le temperature raggiungono velocemente i 150°C e a tale temperatura i tessuti legnosi incominciano ad imbrunirsi, avviene l'emissione di vapore acqueo, anidride carbonica e di altri gas tra cui l'ossido di carbonio.

Alla somministrazione di altro calore fino alla temperatura di 280°C, le trasformazioni si trasferiscono anche nella zona interna del pellet mentre nella zona superficiale avviene l'evaporazione di vapori condensabili e l'emissione di gas, principalmente anidride carbonica e ossido di carbonio.

Le trasformazioni che fino ad ora erano endotermiche diventano esotermiche con la formazione di prodotti catraminosi sotto forma di piccole goccioline.

Il processo di evaporazione avvenuto solamente fino ad ora in superficie si sposta verso l'interno, la temperatura aumenta considerevolmente fino alla temperatura di 450-500°C, si ha una grande emissione di gas altamente combustibili e vapori (ossido di carbonio, metano, formaldeide, acido acetico, metanolo, idrogeno). L'emissione di anidride carbonica e di vapore acqueo continua ma in quantità minori.

Quando tutto il pellet è stato sottoposto alla degradazione termica, il processo ritorna endotermico e alla temperatura di 500°C termina il processo di pirolisi. Il residuo rimasto non è altro che carbone vegetale definito anche "char", al suo interno sono contenute ancora grosse quantità di idrogeno che portano il composto a raggiungere temperature fino a 1500°C senza però emissione di altri gas.

I processi di pirolisi non interessano allo stesso tempo tutti componenti del pellet. I primi a subire la decomposizione, alla temperatura di 100°C, sono le emicellulose in quanto risultano essere i componenti più degradabili; la maggior parte dell'acido acetico si forma in questa fase a causa dei gruppi acetileni presenti nelle emicellulose. Il secondo componente a degradarsi è la cellulosa, alla temperatura di circa 150°C; nella prima fase si assiste alla progressiva depolimerizzazione, seguita dalla rottura dei legami carbonio-carbonio a causa delle elevate temperature, portando alla produzione di acido acetico, acetone, fenolo, acqua, ossido di carbonio e anidride carbonica.

La lignina è il componente più stabile anche se una esatta definizione del comportamento non è facile da identificare dato che la degradazione delle emicellulose, e di parte della lignina stessa, ad opera degli acidi formati durante il processo provoca la formazione di sostanze che impediscono una chiara interpretazione dei risultati.

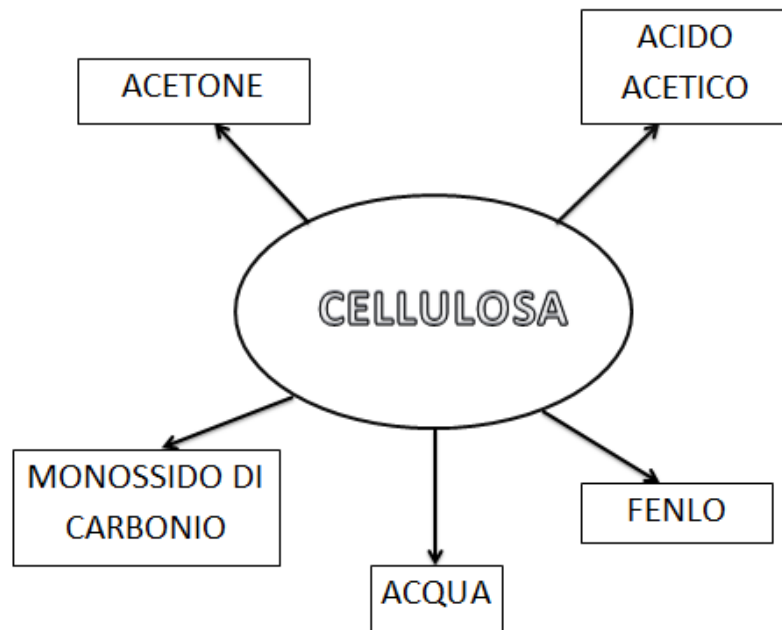


Figura 39. Prodotti ottenuti dalla pirolisi della cellulosa

In sintesi il processo di pirolisi si può descrivere nel seguente modo; emicellulose sono i primi composti a degradarsi, seguite all'inizio della fase esotermica dalla cellulosa, con un incremento considerevole intorno ai 300°C, mentre la degradazione della lignina avverrebbe tra 250 e 500°C con un massimo intorno a 400°C.

## 4.2 Produzione del pellet.

### 4.2.1 L'idea di partenza.

Vista la funzione della cellulosa all'interno della combustione e la sua produzione di acidi e gas infiammabili, dovuta all'innalzamento delle temperature, possiamo definire che un'aggiunta di cellulosa all'interno del composto per la produzione di pellet aumenta il quantitativo di componenti combustibili e, conseguentemente, l'energia sprigionata sotto forma di calore.

La cellulosa, in questo progetto utilizzata per lo scopo sopra descritto, non è altro che lo scarto proveniente dalla produzione di carta che normalmente verrebbe scaricata in discarica per il suo



Figura 40. Cellulosa

smaltimento. Sembra essere una buona idea poterla riutilizzare sia per ridurre i costi di smaltimento, sia per aumentare le prestazioni del combustibile.

### 4.2.2 Preparazione del composto per produzione pellet.

In questa fase si è iniziato a realizzare materiale per la produzione di pellet, attraverso la miscelazione di scarti provenienti dall'industria del legname (legno massello di faggio) e cellulosa opportunamente trattata e triturata. Il trattamento della cellulosa è stata suddivisa in due fasi:

- 1) Essiccazione: fase necessaria, dato che il materiale dalle cartarie presentava un alto livello di umidità;
- 2) Selezione del materiale: sono stati scartati i componenti finiti erroneamente all'interno del contenuto.

Nella fase di produzione del pellet, il legname e la cellulosa sono state miscelate in quantità differenti: 70% del primo e il rimanente 30% del secondo.



Successivamente, si è passati alla fase di pelletizzazione, dove il composto è stato introdotto all'interno di una macchina pellettatrice che, per estrusione ed effetto legante della lignina naturalmente contenuta nel legname, ha permesso di ottenere i cilindretti di pellet. In questo modo è stato possibile terminare la produzione del pellet.



Figura 41. estrusore macchina per produzione di pellet.



Figura 41. Il pellet realizzato.

#### 4.2.3 Prova di combustione

Dopo la pelletizzazione, è stata testata la capacità del pellet di ardere inserendolo in una comune stufa a pellet già in funzione. Si è notato nell'immediato che la combustione stava avvenendo con molta difficoltà e in maniera non uniforme tanto da generare zampilli.

#### 4.2.4 Valutazione dei risultati ottenuti

La prima realizzazione del nuovo tipo di pellet non è andata a buon fine, in quanto non ha permesso il risultato finale atteso. Tale risultato è da imputare alla conformazione del pellet prodotto.

La cellulosa, invece di essere distribuita in maniera uniforme nel cilindretto, si è depositata interamente sulla superficie esterna, creando una barriera che non ha consentito un adeguato afflusso di ossigeno verso l'interno. Inoltre, come è stato descritto precedentemente, affinché avvenga la decomposizione della cellulosa in elementi infiammabili, è necessaria una temperatura iniziale di 150°C; questo apporto di calore, a causa della mancata assenza di ossigeno all'interno, non è stato permesso e ha impedito una decomposizione della cellulosa stessa.

Verranno in futuro realizzate altre prove per testare se la realizzazione di questo tipo di pellet è possibile.

## CONCLUSIONI

L'elaborato si è posto come obiettivo realizzare una caldaia per esterni, attraverso un primo dimensionamento di tutti i suoi componenti e la progettazione di un sistema di recupero fumi e coibentazione.

L'idea iniziale ha gettato le basi per la futura realizzazione di un nuovo prodotto, richiedendo, tuttavia, ulteriori studi approfonditi, quali lo studio dei flussi e dell'efficienza del sistema di coibentazione e recupero fumi, non analizzati e svolti nel presente progetto a causa di mancanza di dati reali.

Si è cercato, inoltre, di produrre una nuova tipologia di pellet, ottenendo però risultati non propriamente positivi, poiché il privato richiedente del progetto non ha fornito materiale sufficiente per lo svolgimento dello stesso.

È stato valutato anche il costo complessivo della caldaia, insieme al serbatoio di stoccaggio, che ammonta ad un valore approssimativo di 2000 euro, costo relativamente basso che può, tuttavia, essere ridotto apportando opportune modifiche ai componenti utilizzati.

In conclusione, si può affermare che la caldaia ottenuta presenta un sistema di recupero fumi e coibentazione innovativo, nonché una facilità di installazione in ambienti privi di spazi sufficienti per il suo inserimento interno.

## **BIBLIOGRAFIA**

Anselmi, U., Lorenzi, A.,(1990), *Elementi di riscaldamento*, Milano, ESA

Cornetti, G., (3 edizione 1993), *Macchine a fluido*, Torino, Edizioni il capitello

Gentilni, M., (1995), *Impianti meccanici*, Bologna, Pitagora

Pividori, M., *Stufe a pellet: Tecnologie e funzionamento*, Tesi di laurea discussa alla Facoltà di Agraria, Università degli studi di Padova, A.A 2011/2012

## **SITOGRAFIA**

[amicopellet.eu](http://amicopellet.eu)

[www.pelletgold.it](http://www.pelletgold.it)

[www.caleffi.it](http://www.caleffi.it)

[www.centroconsumatori.it](http://www.centroconsumatori.it)

[www.endurodoc.net](http://www.endurodoc.net)

[www.leap.polimi.it](http://www.leap.polimi.it)

[www.oekofen.it](http://www.oekofen.it)

[www.pellesthome.it](http://www.pellesthome.it)

[www.tempcoblog.it](http://www.tempcoblog.it)

[www.tesaf.unipd.it](http://www.tesaf.unipd.it)