



IV Sezione



Facoltà di Agraria

# ATTUALITÀ DELLA RICERCA NEL SETTORE DELLE ENERGIE RINNOVABILI DA BIOMASSA

ATTI DEL CONVEGNO

Ancona - Facoltà di Agraria

16 - 17 dicembre 2010

ISBN 978-88-906186-1-1

© 2011 CTI, Milano

finito di stampare nel mese di febbraio duemiladodici

presso Tipolitografia Trabella,  
Peschiera Borromeo (MI)

## Comitato scientifico ed editoriale

Gualtiero Baraldi  
Remigio Berruto  
Luigi Bodria  
Stefano Bona  
Enrico Cini  
Andrea Del Gatto  
Mario Di Candilo  
Ester Foppa Pedretti  
Andrea Galli  
Ilaria Mannazzu  
Antonio Pazzona  
Pietro Piccarolo  
Pier Riccardo Porceddu  
Giorgio Provolo  
Paolo Ranalli  
Giovanni Riva  
Oriana Silvestroni  
Franco Sotte  
Paolo Tarolli  
Marco Toderi  
Gianpietro Venturi

Atti a cura di:  
Ester Foppa Pedretti  
Chiara Mengarelli

*I contributi contenuti negli Atti sono stati oggetto di peer-review da parte del comitato scientifico sulla base dell'intero testo e rappresentano una selezione delle relazioni presentate al convegno.*

## Indice

Prefazione .....	1
Premesse .....	3
<i>Produzione di biomassa dedicata</i> .....	5
Valutazione di ibridi di girasole ( <i>Helianthus annuus</i> L.) alto oleico per uso energetico in Italia centro-orientale .....	7
Riduzione della lavorazione su girasole ( <i>Helianthus annuus</i> L.) alto oleico per uso energetico.....	17
Il sorgo coltivato a fini energetici e l'efficienza di utilizzazione dell'acqua in ambiente mediterraneo .....	25
Tecniche di propagazione della canna comune ( <i>Arundo donax</i> L.) a confronto .....	32
Potenzialità produttiva di sorgo e girasole a destinazione energetica in un ambiente a sussidio idrico limitato.....	40
Un biennio di prove di valutazione agronomica di varietà commerciali di <i>B. napus</i> e <i>B. carinata</i> .....	50
Valutazione delle caratteristiche produttive di varietà di sorgo da biomassa in Centro Italia.....	59
Concimazione azotata e densità di semina in colza ( <i>B. Napus</i> L.) .....	68
Individuazione di varietà di vite ibride ( <i>Vitis</i> Sp.) idonee alla produzione di bioetanolo e cellulosa da impiegare come fonti di bioenergie .....	75
<i>Utilizzo di biomassa residuale</i> .....	81
Caratterizzazione energetica del materiale ritratto da diradamenti in impianti di <i>Pinus</i> spp. in Italia centrale .....	83
Prove di combustione di pollina in un impianto termico sperimentale.....	91
Caratteristiche energetiche di sottoprodotti ottenuti dalla coltivazione di lino da fibra .....	99
Valorizzazione dei cascami della filiera vinicola.....	108
<i>Gestione e controllo dei residui delle filiere</i> .....	119
L'impiego della frazione separata solida del liquame digerito e non per l'alimentazione dei digestori anaerobici .....	121
Livelli di IPA nelle emissioni prodotte da stufe domestiche alimentate a pellet di legno.....	129
Prove di strippaggio dell'azoto da reflui ottenuti da impianti di D.A.....	138

---

Produzione di pannello e di olio a partire da girasole decorticato con una spremitrice a pressione graduale .....	146
Impiego di farine di disoleazione provenienti dalla filiera biodiesel e di compost da f.o.r.s.u. nell'ammendamento di melanzana e scarola .....	154
<i>Caratterizzazione e qualità delle biomasse</i> .....	161
Produzione di bio-etanolo da biomasse di patata dolce .....	163
Produzione e caratterizzazione energetica di biomasse erbacee irrigate con acque reflue .....	171
La barbabietola da zucchero come coltura dedicata per il biogas.....	181
Il controllo della qualità della biomassa nelle centrali di trasformazione energetica: caso applicativo .....	191
Tracciabilità del cippato in una logica di filiera corta.....	197
Valutazione della capacità di idrolisi e saccarificazione di biomasse lignocellulosiche da parte di isolati di <i>Trichoderma</i> spp. per la filiera del bioetanolo.....	205
La determinazione del contenuto di carbonio biogenico in combustibili ibridi.....	210
Il campionamento delle biomasse solide.....	216
Impiego di additivi inorganici per il miglioramento del comportamento termico delle ceneri nella combustione delle biomasse .....	224
<i>Meccanizzazione della raccolta della biomassa</i> .....	231
Valutazione di un prototipo per la raccolta di colture da biomassa a destinazione energetica .....	233
Sviluppo ed analisi operativa di un'attrezzatura per la raccolta di impianti di pioppo da biomassa lignocellulosica a breve turno di ceduazione.....	241
Raccolta dei sarmenti di vite in cippato: disponibilità potenziale e tecnica in provincia di Treviso .....	249
<i>Valutazioni tecniche, economiche e territoriali</i> .....	259
Diritti di proprietà ed organizzazione dell'afferta di biomassa: inquadramento teorico ed indagine empirica .....	261
Produzione di biomassa a fini energetici da un primo diradamento in impianto di pino nero ( <i>Pinus nigra</i> Arnold), tempi di lavoro, produttività e costi.....	271
Analisi del processo decisionale della filiera energetica dell'olio vegetale.....	279
Filieri agro-energetiche: modello per il calcolo dei costi economici, energetici e ambientali a bocca impianto.....	286
Opportunità e riflessi economico-fiscali della produzione di energie rinnovabili nell'impresa agricola.....	296
Utilizzazione di un ceduo di eucalipto per produzione di biomassa con impiego di meccanizzazione spinta: aspetti tecnici ed economici .....	304

---

Esperienze in atto sulla conversione agricola verso le colture energetiche .....	311
Localizzazione e dimensionamento di un impianto di digestione anaerobica per la produzione di biogas nella Sicilia sud-orientale .....	318
Metodologia e applicazione territoriale per la valutazione di filiere bio- energetiche .....	326
Modelli previsionali della biomassa a fini energetici ritraibile da eucalitteti della .....	336
<i>Sostenibilità</i> .....	347
Applicazione di liquami bovini alle colture dedicate da energia: implicazioni energetiche e sul bilancio del carbonio .....	349
Coltivazione di sorgo per bioenergia e ciclo del C del suolo .....	355
Effetto della conversione da colture agricole a colture legnose per energia sull'emissione di gas climalteranti: primi due anni di sperimentazione .....	361
Sostenibilità delle filiere bioenergetiche in Italia .....	371
Un modello di impiego sostenibile delle biomasse forestali in provincia di Nuoro .....	381
Un software per la valutazione di sostenibilità delle filiere agro-energetiche .....	391

---

## **Prefazione**

*La necessità di trovare alternative alle risorse energetiche fossili per fare fronte a problemi di approvvigionamento e ai dissestati equilibri ambientali, ha portato anche allo studio ed allo sfruttamento delle fonti rinnovabili, con l'intento di valorizzare nei differenti ambiti ed ambienti le risorse di maggiore interesse.*

*Analisi delle potenzialità e affinamento delle tecniche per il loro sfruttamento sono attività che coinvolgono direttamente la ricerca, di base e applicata: da un approfondimento condotto nel 2008 (Kajikawa et Al., 2008), che ha analizzato la bibliografia citata dall'Institute for Scientific Information (ISI) dal 1970 al 2005, si rileva che i lavori pubblicati in ambito scientifico e relativi ad argomenti energetici sono stati oltre 150 mila, distribuiti in 68 riviste. Da questa selezione si evidenzia che la grande maggioranza di lavori relativi alla produzione energetica riguarda ancora i combustibili di natura fossile, petrolio e carbone, e le tecniche di combustione.*

*Un inizio di interesse per le energie rinnovabili, interesse crescente negli anni seguenti, è segnalato solo a partire dall'ultimo decennio del secolo scorso. Ad oggi, l'attenzione anche a livello scientifico internazionale è ancora "tiepida", essendo la numerosità delle pubblicazioni sulle energie rinnovabili circa il 3% delle complessive e, comunque, rivolta soprattutto allo sfruttamento diretto dell'energia solare (2/3 delle pubblicazioni sulle rinnovabili sono riconducibili a questo soggetto).*

*Nell'ambito descritto, le risorse rinnovabili da biomasse rappresentano un'ulteriore nicchia, trattata in circa il 10% degli scritti. Da queste riflessioni emerge che, pur essendoci una certa vivacità nella comunità scientifica internazionale, ci sia la necessità di potenziare le ricerche nel settore, sperimentando vie nuove per trarre energia, diretta o indiretta, dalle risorse energetiche rinnovabili e, nello specifico, dalla biomassa.*

*In questo spaccato internazionale si inserisce, un po' ambiziosamente, il contenuto di questo volume di Atti, in cui si raccolgono i lavori di ricercatori di istituzioni ed enti italiani, operanti soprattutto in ambito agricolo, e centrati sulla produzione di biomassa, coltivata o residuale, ad utilizzo energetico e sulla sua trasformazione. Le 46 memorie raccolte, sottoposte a peer review, rappresentano le principali attività di ricerca nel settore attualmente in atto nel Paese. L'augurio, per il futuro, è che questo contributo possa essere da stimolo per intraprendere altri studi e ricerche di approfondimento.*

*Prof. Gualtiero Baraldi  
Presidente IV Sezione AIIA*

*Ancona, dicembre 2011*

## Prove di combustione di pollina in un impianto termico sperimentale

Toscano Giuseppe <sup>(1)</sup>, Riva Giovanni <sup>(2)</sup>, Foppa Pedretti Ester <sup>(2)</sup>, Pizzi Andrea <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Dipartimento SAIFET – Università Politecnica delle Marche – g.toscano@univpm.it

<sup>(2)</sup> Dipartimento SAIFET – Università Politecnica delle Marche

*Parole chiave: pollina, combustione, energia, emissioni, caldaia*

### Abstract

The land disposal of waste from poultry industry and its environmental implications have stimulated the interest into a cleaner and more useful disposal such as the direct combustion. In this work, studies on pelletized poultry manure combustion were undertaken in an experimental boiler. Before the combustion test, the characterization of the fuels – poultry manure and poultry litter - was carried out. Gas (CO and NO<sub>x</sub>) and dust emissions produced by the combustion of poultry manure were determined. Bottom ash, fly ash and particles were also analyzed to determine the levels of heavy metals and to evaluate the environmental impact and disposal solution. The main conclusions of the results are: i) the optimizing of combustion allow low CO emission; ii) NO<sub>x</sub> and particulate emissions for poultry manure are higher than wood combustion; iii) the filter bag reduce considerably the particulate emission from boiler.

### 1. Introduzione

Lo smaltimento della pollina rappresenta attualmente una delle maggiori problematiche del settore avicolo, soprattutto in diverse aree del nord Italia in cui vi sono numerosi allevamenti intensivi. Tale prodotto può essere costituito dalla sola deiezione, nel caso di provenienza da allevamenti di ovaiole, o miscelata con lettiera nel caso degli allevamenti di broiler. Entrambi i componenti – deiezione e lettiera – hanno un elevato valore nutrizionale e per questo sono considerati buoni fertilizzanti organici ed ammendanti. Tuttavia, l'utilizzo di questo sottoprodotto direttamente in campo può causare fenomeni di eutrofizzazione, la diffusione di agenti patogeni, la produzione di sostanze fitotossiche, inquinamento ambientale ed emissioni di gas serra [1] ed infine provocare inquinamento da nitrati di falde acquifere [2]. Lo spandimento agronomico, quindi, risulta ormai in via di abbandono proprio per l'esistenza di limiti dettati dalla normativa ambientale, ma anche per ragioni legate ai costi connessi a questo sistema di smaltimento, rendendo necessario individuare altri possibili impieghi per questo sottoprodotto della filiera avicola. Attraverso il DLgs n. 4/2008 art.185 e la legge n.129 del 18 agosto 2010, si introducono elementi normativi importanti per considerare la pollina come un sottoprodotto destinabile alla produzione di energia e trasportabile ed utilizzabile al di fuori del luogo di produzione.

La conversione energetica della pollina può avvenire attraverso processi biochimici o termochimici, tra questi ultimi la combustione è probabilmente la via più fattibile in termini economici ed impiantistici, ma offre meno garanzie da un punto di vista dell'impatto ambientale. Per valutare l'entità di quest'ultimo aspetto e verificare l'idoneità di alcune soluzioni impiantistiche, da trasferire poi su impianti termici di serie, sono stati eseguiti dei test di combustione su una caldaia sperimentale di limitata potenza (circa 20 kWt). In particolare, l'impianto sperimentale è stato alimentato con pollina di ovaiole considerata, tra le deiezioni da avicoli, la matrice più complessa in conseguenza degli elevati contenuti in ceneri e delle alte concentrazioni di alcuni elementi chimici inquinanti. Per favorirne l'uso in caldaia, il prodotto è stato pelletizzato assumendo una serie di benefici in termini di proprietà fisiche ed energetiche, conseguenti soprattutto alla riduzione del contenuto di umidità, e consentendo una migliore modulazione di alimentazione della caldaia. Durante i test sono state costantemente monitorate le emissioni, gassose e particolato, prodotte dall'impianto allo scopo di ridurne



l'impatto ambientale, agendo dapprima sulla regolazione del processo di combustione e successivamente utilizzando tecniche per l'abbattimento delle emissioni.

## 2. Materiali e metodi

L'attività sperimentale di questo lavoro è stata condotta in due sedi distinte: i test di combustione sono stati realizzati presso un'azienda del nord Italia costruttrice di caldaie, mentre le analisi chimico-fisiche delle matrici solide, prodotte nel corso della sperimentazione, sono state condotte presso il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche. Per valutare l'idoneità dei materiali alla combustione in caldaia, sono state eseguite delle analisi mirate alla determinazione dei principali parametri fisico-energetici, solitamente analizzati per i biocombustibili solidi (*analisi energetiche*). Inoltre, la qualità delle emissioni e la composizione dei sottoprodotti (ceneri) sono stati monitorati principalmente per definire l'impatto ambientale derivante dalla combustione di pollina, ma anche per determinare le eventuali modifiche impiantistiche volte alla riduzione delle emissioni di sostanze inquinanti (*analisi ambientali*).

### 2.1 Analisi energetiche

Inizialmente sono state caratterizzate le potenziali tipologie di pollina da impiegare come biocombustibile solido, in particolare sono stati analizzati: pellet di pollina di ovaiole e pellet di pollina di broiler. Le metodologie adottate hanno fatto riferimento alle attuali norme standard europee sulla biomassa combustibile solida (tabella 1). Alla luce dei risultati ottenuti dalle analisi di laboratorio sui materiali, il piano sperimentale è stato impostato utilizzando solo pellet di pollina di ovaiole come combustibile in quanto, come i risultati evidenzieranno, particolarmente ricco in ceneri e quindi più adatto alla valutazione delle potenzialità dell'impianto termico in esame.

### 2.2 Analisi ambientali

Le ceneri prodotte dalla combustione sono suddivise in: ceneri pesanti o ceneri di fondo caldaia (*ceneri caldaia*), costituite dal residuo inorganico pesante raccolto nella parte inferiore del corpo caldaia; ceneri leggere, rappresentano la componente volatile della frazione inorganica e tendono ad allontanarsi dalla camera di combustione, seguendo il percorso dei fumi e depositandosi lungo la linea di emissione, come lo scambiatore di calore (*ceneri scambiatore*), oppure captate dall'elemento filtrante (*ceneri filtro a manica*). Una parte delle ceneri leggere, non trattenuta dal filtro, viene emessa in ambiente (*polveri*). Su tutte queste frazioni è stata eseguita un'analisi inorganica più approfondita ricercando elementi chimici di interesse ambientale. In particolare, le analisi hanno riguardato i seguenti elementi: As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Ca, Mg, Mo, Zn, K, Al, B, Ba, Na e P. Gli stessi sono stati determinati anche su un campione di pollina del lotto impiegato per le prove di combustione, per cui è stato previsto il recupero delle ceneri da sottoporre ad indagine analitica. Ciò ha consentito di verificare la distribuzione degli elementi chimici nelle diverse frazioni a seguito della combustione.

Il quantitativo di polveri emesso dall'impianto è stato determinato per via gravimetrica, prelevando isocineticamente i fumi direttamente in camino tramite campionatore isocinetico automatico (Isostack basic, TECORA) [3]. Per ogni campionamento sono stati determinati umidità, temperatura e velocità dei fumi come richiesto dalla normativa [4]. Parallelamente sono stati costantemente monitorati: ossigeno (O<sub>2</sub>), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), monossido di carbonio (CO) ed ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) mediante analizzatore di gas (Vario Plus, MRU). In aggiunta, al fine di disporre di elementi di confronto delle prestazioni dell'impianto termico, sono stati condotti test anche con pellet di legno (tabella 2).

Tabella 1 - Metodi di analisi per la caratterizzazione energetica dei biocombustibili solidi

Analisi	Norma	Strumento
Preparazione del campione	UNI CEN/TS 14780:2005 Biocombustibili solidi - Metodi per la preparazione del campione	Mulino macinatore
Contenuto di umidità	UNI EN 14774-2:2010 Biocombustibili solidi - Determinazione dell'umidità - Metodo di essiccazione in stufa - Parte 2: Umidità totale - Metodo semplificato	Stufa per T = 105° C
Contenuto in ceneri	UNI EN 14775:2010 Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto di ceneri	Muffola per T = 550° C
Potere calorifico netto Potere calorifico superiore Potere calorifico inferiore	UNI EN 14918:2010 Biocombustibili solidi - Determinazione del potere calorifico	Calorimetro - Analizzatore elementare
C,H,N,O	UNI CEN/TS 15104:2005 Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto totale di carbonio, idrogeno e azoto - Metodi strumentali	Analizzatore elementare
Cloro e Zolfo	UNI CEN/TS 15289:2006 Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto totale di zolfo e di cloro	Bomba di Mahler - Spettrofotometro ICP
Cr, Cu, Mn, Ni, As, Cd, Hg	UNI CEN/TS 15297:2006 Biocombustibili solidi - Determinazione dei microelementi	Mineralizzatore microonde - ICP-OES
Sodio e potassio	UNI CEN/TS 15290:2006 Biocombustibili solidi - Determinazione dei macroelementi	Mineralizzatore microonde - ICP-OES

Tabella 2 - Programma dei test di combustione per la misura delle emissioni gassose

Test	Biocombustibile	Tempo di misurazione (h)	Numero di misure (n)	Gas analizzati
1	Pellet di legno	2	3	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub>
2	Pellet di ovaiole	2	3	

Specificatamente per le emissioni di polveri in atmosfera, oltre la determinazione dei fattori di emissione per i due combustibili – pollina di ovaiole e legno – è stato eseguito anche un confronto per valutare l'efficacia di alcuni sistemi di abbattimento del particolato. Nello specifico sono stati utilizzati: una massa filtrante, ovvero materiale inerte a diversa granulometria, simile a ghiaietto; dei filtri a maniche (tabella 3).

Tabella 3 - Programma dei test di combustione per la misura delle polveri

Test	Combustibile	Elemento filtrante	Tempo campionamento (min)	Numero di test
1	Pellet di legno	Nessuno	60	3
2	Pellet di ovaiole	Nessuno	30	3
3	Pellet di ovaiole	Massa filtrante	30	3
4	Pellet di ovaiole	Filtro a maniche	60	3

### 2.3 Caldaia sperimentale

La caldaia utilizzata nel corso dei test dispone di un particolare bruciatore da 20 kWt circa di potenza, adattato per gestire la combustione di materiale denso come il pellet. Nell'insieme, l'impianto è provvisto di un sistema di alimentazione del pellet, costituito dal serbatoio più la coclea, che fornisce combustibile alla caldaia. I fumi prodotti nella camera di combustione proseguono lungo la linea di emissione fino a raggiungere le eventuali unità di filtrazione. A valle di queste, prima dell'estrattore dei fumi, sono situate la porta di campionamento polveri e la porta per l'analizzatore dei gas. Lo schema del sistema utilizzato per l'esecuzione dei test è riportato in figura 1.

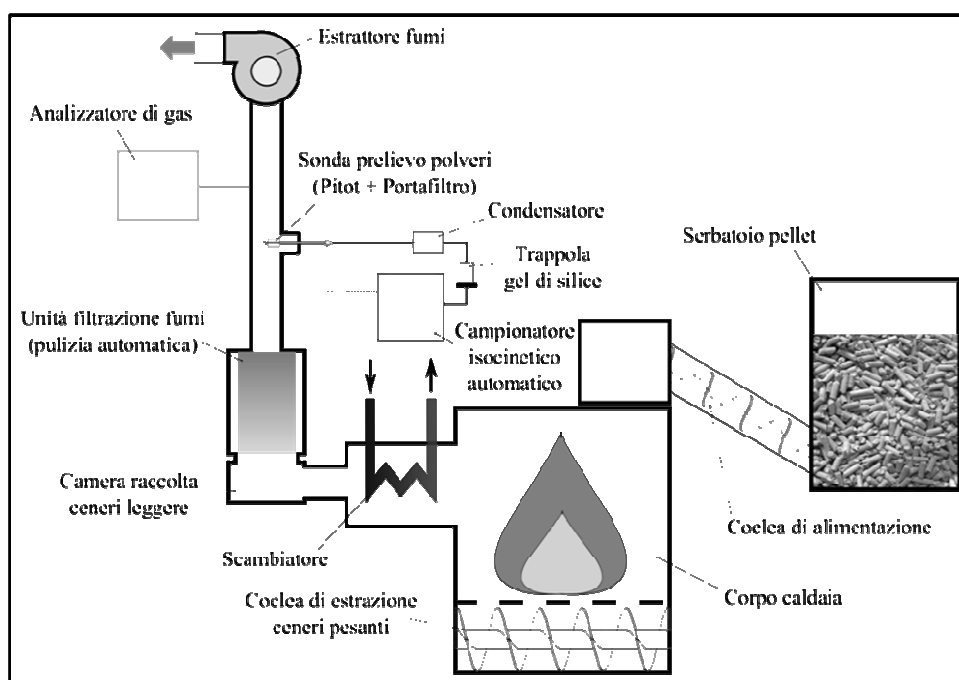


Figura 1 - Schema dell'apparato sperimentale di combustione

La caldaia consente, tramite una serie di componenti ed accessori, di modificare le condizioni operative mediante la regolazione di alcuni parametri (es. aria di combustione, portata del combustibile, temperatura di preriscaldamento aria, etc.). Questo ha reso possibile la fine regolazione della combustione, con conseguente riduzione delle emissioni inquinanti prodotte.

## 3. Risultati

### 3.1 Analisi energetiche

La tabella 4 riporta i risultati delle analisi di laboratorio svolte sui campioni di pollina. Il primo aspetto da evidenziare riguarda l'elevato contenuto in ceneri dei materiali, ben al di sopra dei normali valori tipici per le biomasse lignocellulosiche [5-6]. In bibliografia, relativamente al contenuto in ceneri, si nota una certa discordanza nei valori riportati da differenti autori, probabilmente associata all'elevata eterogeneità del materiale, la cui composizione è fortemente legata alla tipologia di allevamento: Ihnat riporta un 32% in ceneri per una pollina di ovaiole [7], contro il 20,7% di Bock [8]. Nell'ambito della sperimentazione la scelta del combustibile è ricaduta sulla sola pollina di ovaiole poiché, tra le due esaminate, presenta un maggior contenuto in ceneri (27,9%), rendendola la più problematica per il processo di combustione e di trattamento delle emissioni, quindi la più adatta alla valutazione delle capacità dell'impianto termico.

I risultati dell'analisi della composizione elementare della pollina di ovaiole sono molto simili a quelli ottenuti da Dávalos [9]: 34,7% C, 5,2% H, 5,6% N e 0,13% S. Henihan [10] invece

riporta i seguenti valori per una pollina con lettiera: ceneri 16,42%, C 39,57%, H 5,11%, N 5,31%. Per ciò che concerne la composizione chimica dei macroelementi l'azoto è l'elemento più critico dal punto di vista ambientale poiché strettamente collegato alla quantità di NO<sub>x</sub> prodotti in combustione [6], nelle matrici analizzate il contenuto arriva a superare il 5% su base secca.

*Tabella 4 - Confronto tra le caratteristiche chimico-fisiche di pollina di ovaiole e boiler*

<b>Parametro</b>		<b>Pollina ovaiole</b>	<b>Pollina boiler</b>
Umidità	%	8,1	11,1
Ceneri	%	27,9	19,2
Potere calorifico superiore	<i>kJ/kg</i>	14756	17107
Potere calorifico inferiore	<i>kJ/kg</i>	13824	15910
Potere calorifico netto	<i>kJ/kg</i>	12512	13878
Carbonio	%	34,65	41,39
Idrogeno	%	4,39	5,64
Azoto	%	5,55	4,15
Zolfo	%	0,16	0,27
Ossigeno	%	27,35	29,35
Cloro	%	0,19	0,36
Arsenico	<i>mg/kg</i>	1,97	0,72
Cadmio	<i>mg/kg</i>	0,87	0,70
Cromo	<i>mg/kg</i>	7,55	6,45
Rame	<i>mg/kg</i>	84,48	107,98
Mercurio	<i>mg/kg</i>	<0,2	<0,2
Manganese	<i>mg/kg</i>	615,76	635,72
Nichel	<i>mg/kg</i>	8,53	9,92
Piombo	<i>mg/kg</i>	6,01	3,80
Sodio	<i>mg/kg</i>	3497,1	2588,9
Potassio	<i>mg/kg</i>	35623,1	52288,7

Relativamente all'analisi dei metalli pesanti, in generale, si evidenzia la presenza di elevate concentrazioni di rame e manganese, che raggiungono concentrazioni importanti su entrambe le matrici. La presenza di elevate quantità di questi metalli nelle deiezioni è dovuta principalmente alla somministrazione di particolari additivi nella dieta degli avicoli (es. solfato di rame) [11]. Abelha riporta un contenuto in rame e manganese pari a 71 mg/kg e 596 mg/kg rispettivamente [12].

### *3.2 Analisi ambientali*

Un'analisi più esaustiva degli elementi chimici contenuti nel pellet di pollina di ovaiole conferma l'elevata presenza di rame e manganese, associata anche a quantità importanti di zinco, nichel e piombo (tabella 5). La distribuzione di questi elementi presenta delle variazioni nelle diverse frazioni di ceneri. Il rame si ritrova in concentrazioni simili in tutte e tre le frazioni nelle diverse parti del sistema di combustione: filtro a maniche, scambiatore e ceneri di fondo caldaia. In quest'ultima frazione, invece, il manganese tende ad accumularsi in misura particolare, assumendo concentrazioni superiori a 3000 mg/kg. Alcuni elementi pesanti quali cadmio, cromo, nichel e piombo stranamente assumono valori elevati solo nella frazione di polveri prelevata sullo scambiatore interno alla caldaia. L'ipotesi è che ci sia stato un rilascio di tali elementi da parte del materiale della superficie di deposito dello scambiatore, interferendo con l'analisi. Per lo zinco, l'aumento di concentrazione è ben evidente per la frazione leggera delle ceneri (parte alta della caldaia, scambiatore e filtro a manica) mentre si ritrova in minore quantità nelle ceneri di fondo caldaia. Questo comportamento è dovuto alla spiccata volatilità dello zinco, rispetto agli altri metalli pesanti investigati ad esclusione di

mercurio e cadmio, alle relativamente basse temperature della fiamma [13]. Comunque questo elemento è presente ad elevate concentrazioni su tutte le frazioni.

Tabella 5 - Composizione chimica delle diverse frazioni di ceneri e del combustibile

Elemento	Pollina ovaiole	Ceneri			Polveri *
		Caldaia	Scambiatore	Filtro Manica	
mg/kg					
As	1,26	n.r.	3,96	n.r.	19,5-25,1
Cd	n.r.	1,497	89,42	2,46	2-5,2
Cr	5,2	10,55	674,7	161,4	6,1-16,8
Cu	59,8	373,4	296,1	200,8	245,6-263,2
Mn	505,8	3183	1508	60,81	68-102,6
Ni	7,86	44,96	179,3	54,31	11,4-13,9
Pb	6,11	15,96	122,2	57,98	53,9-76,9
Ca	63610	80650	56730	1882	903,7-3430
Mg	4939	17060	5596	687	143,2-482,6
Mo	7,58	91,42	58,08	46,46	30,2-40,2
Zn	529,7	2011	15170	20290	17590-24450
K	31510	99570	584400	707600	560200-761900
Al	3206	1894	144300	2768	1742-3595
B	437,9	1219	1417	575,8	545,2-1939
Ba	248,8	1388	2130	64,44	n.r.-3700
Na	36310	124200	162800	189400	190300-228500
P	17070	71670	9828	415,9	493,1-954,5

\* Intervalli di concentrazione determinati su più campioni; n.r. : non rilevabile

I maggiori costituenti delle polveri e delle ceneri del filtro a manica sono potassio e sodio, la cui somma rappresenta almeno il 70% della massa totale. Infatti, la presenza nel combustibile di elevate quantità dei suddetti metalli alcalini volatili comporta una produzione maggiore di polveri quando sottoposti a combustione [8].

Nella tabella 6 sono riportati gli intervalli minimo e massimo dei valori medi di concentrazione ottenuti dai gas di emissione utilizzando pellet di pollina di ovaiole e pellet di legno come combustibili. I valori di concentrazione del monossido di carbonio sono mediamente superiori nella combustione con pellet di pollina, appena 40 – 60 mg/Nm<sup>3</sup>, rispetto al pellet di legno. Le differenze sono più evidenti nel confronto degli ossidi di azoto, decisamente superiori per il pellet di pollina.

Tabella 6 – Analisi dei gas per i test di combustione con pellet di ovaiole e pellet di legno

Parametro		Pollina ovaiole	Pellet di legno
Ossigeno (O <sub>2</sub> )	%	6 - 8	12 - 13
Anidride carbonica (CO <sub>2</sub> )	%	13,5-16,5	8,5-10
Monossido di carbonio (CO) *	mg/Nm <sup>3</sup>	150 – 240	90-200
Ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> ) *	mg/Nm <sup>3</sup>	700-1330	310-410

\* Valori riferiti all'11% di O<sub>2</sub>

Infine, in tabella 7 si riportano i valori delle emissioni di polveri ottenute per la combustione del pellet di legno e del pellet di pollina senza abbattimento, più le emissioni di polveri per la pollina con diversi sistemi filtranti, al fine di confrontare i due diversi combustibili tra loro e valutare anche l'efficacia di abbattimento degli elementi filtranti utilizzati. In generale, alla combustione da pellet di pollina è associata un'elevatissima produzione di polveri, circa 35-40 volte superiore ai valori ottenuti con il pellet di legno, legata principalmente all'elevato contenuto inorganico del combustibile. Solo l'utilizzo dei filtri a maniche ha consentito di

contenere le emissioni di polveri, raggiungendo livelli confrontabili con quelli ottenuti per il pellet di legno.

Tabella 7 – Fattori di emissione polveri

Combustibile pellet	Elemento filtrante	Emissione* mg/Nm <sup>3</sup>
Legno	Nessuno	50
Pollina	Nessuno	1870-1950
Pollina	Massa Filtrante	1180-1340
Pollina	Filtro Manica	15-35

\* Valori riferiti all'11% di O<sub>2</sub>

#### 4. Conclusioni

La sperimentazione evidenzia la possibilità di recuperare energia dalla pollina in forma pellettizzata attraverso la combustione in caldaia. Le modifiche introdotte nell'impianto termico sperimentale, orientate sulla base delle indicazioni ottenute dalle misure analitiche delle emissioni, hanno prodotto un sistema con prestazioni ambientali sempre più comparabili ai dispositivi termici alimentati a biomasse legnose (a parità di classe di potenza). Da un'analisi energetica iniziale il sottoprodotto presenta delle caratteristiche non idonee al recupero energetico per combustione diretta, quali elevata umidità del materiale, elevato contenuto in ceneri ed azoto. Tuttavia, il processo di pellettizzazione consente di aumentare l'omogeneità del prodotto e abbassarne il contenuto di umidità, notoriamente elevato per questo materiale [11], favorendo così il processo di combustione negli impianti termici.

La caldaia sperimentale si è dimostrata idonea alla combustione del pellet di pollina: difatti con la sola ottimizzazione del processo di combustione, intervenendo sui parametri operativi principali (aria primaria/secondaria, portata di alimentazione del combustibile etc.), si è riusciti ad ottenere dei bassi valori di CO, comparabili con quelli ottenuti con un combustibile di pregio quale il pellet di legno o se paragonati ai limiti di emissioni previsti dal testo unico ambientale [14] per la classi di impianto termico di potenza bassa. Diversamente avviene per gli ossidi di azoto, per i quali si rilevano delle criticità: il livello misurato non è comparabile con quello ottenuto dalla combustione del legno. L'elevato contenuto in azoto del combustibile condiziona fortemente questo aspetto. Risulta pertanto necessaria l'applicazione di un sistema di abbattimento degli NO<sub>x</sub>, come ad esempio l'SNCR (Selective non-catalytic reduction) processo che sfrutta ammoniaca o urea per ridurre gli ossidi di azoto formati dalla combustione. Prendendo la migliore condizione evidenziata nel corso della sperimentazione e considerando la resa minima per questo sistema di abbattimento (30-40%) [15-16] è pensabile di raggiungere valori di emissioni inferiori ai 500 mg/Nm<sup>3</sup> richiesti dai limiti legislativi [14].

Infine, per ciò che concerne il sistema di filtrazione delle polveri, elemento critico sin dalle prime fasi di questo lavoro, si ritiene che la soluzione del filtro a maniche sia la più adeguata alle condizioni delle emissioni prodotte, considerato il raggiungimento di prestazioni in termini di concentrazioni di emissioni simili a quelle ottenute con il pellet di legno. L'abbattimento delle polveri, ed il raggiungimento di bassi fattori di emissione, rende complessivamente limitata l'emissione di elementi chimici e metalli pesanti in atmosfera a queste associate. Rimane altresì aperto l'aspetto dello smaltimento delle ceneri prodotte durante la combustione di questo materiale, caratterizzate da elevate quantità di metalli pesanti.

Alla luce di questa esperienza, l'opinione è che vi sono ulteriori margini di miglioramento significativi delle prestazioni del dispositivo di combustione. Difatti, occorre considerare che la caldaia target di questo studio dovrà essere caratterizzata, presumibilmente, da potenze termiche di scala superiore (circa 1 MWt) rispetto a quella utilizzata nelle sessioni sperimentali di questo lavoro. Ciò al fine di rendere economici gli investimenti necessari per l'abbattimento degli inquinanti discussi nel lavoro (polveri ed ossidi di azoto).

**Bibliografia**

- [1] Kelleher BP, Leahy JJ, Henihan AM, O'Dwyer TF, Sutton D, Leahy MJ. *Bioresource Technology* **2002**, 83, 27-36.
- [2] Bitzer CC, Sims JT. *J Environ Qual* **1988**, 17, 47-54.
- [3] UNI EN 13284-1. Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Manual gravimetric method, <http://www.uni.com/>; **2003**.
- [4] UNI 10169. Emission measurement - Determination of velocity and flow rate in conveyed gas flow by Pitot tube, <http://www.uni.com/>; **2001**.
- [5] Toscano G, Corinaldesi F. *Journal of Agricultural Engineering* **2010**, 2, 13-19.
- [6] Sjaak van Loo, Koppejan J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, **2008**, Earthscan, London.
- [7] Ihnat M, Fernandes L. *Bioresource Technology* **1996**, 57, 143-156.
- [8] Bock BR, 1999. Poultry litter to energy: technical and economic feasibility. [http://www.brbock.com/RefFiles/PoultryLitter\\_Energy.doc](http://www.brbock.com/RefFiles/PoultryLitter_Energy.doc). Consultato il 23/02/2011.
- [9] Dávalos JZ, Roux MV, Jiménez P. *Thermochimica Acta* **2002**, 394, 261-266.
- [10] Henihan AM, Leahy MJ, Leahy JJ, Cummins E, Kelleher BP. *Bioresource Technology* **2003**, 87, 289-294.
- [11] Quiroga G, Castrillón L, Fernández-Nava Y, Marañón E. *Waste Management* **2010**, 30, 880-884.
- [12] Abelha P, Gulyurtlu I, Boavida D, Seabra Barros J, Cabrita I, Leahy J, et al. *Fuel* **2003**, 82, 687-692.
- [13] Li J, Yan J, Chi Y. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China* **2007**, 1, 359-364.
- [14] Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera: 2006.
- [15] Mahmoudi S, Baeyens J, Seville JPK. *Biomass and Bioenergy* **2010**, 34, 1393-1409.
- [16] Kaplan M, 1991. The use of SNCR as BACT for NOx control in boilers and municipal solid waste incinerators. <http://www.epa.gov/nscep/index.html>. Consultato il 24/02/2011.