



Accordo di Programma MSE-ENEA



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO



Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.1.1

Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

Obiettivi C.2 e C.3

Matteo Caldera

ENEA, Unità Tecnica Tecnologie di Saluggia

Laboratorio Energia

Roma, 25 giugno 2015



c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi e riduzione dell'impatto ambientale

c.3 Sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) nelle emissioni gassose

Principali collaborazioni	Attività
<ul style="list-style-type: none">• Università di Salerno, Dipartimento Ingegneria Industriale• Politecnico di Torino, Dipartimento Energia	<ul style="list-style-type: none">• Sistemi catalitici per il clean-up di biocombustibili e la riduzione dell'impatto ambientale

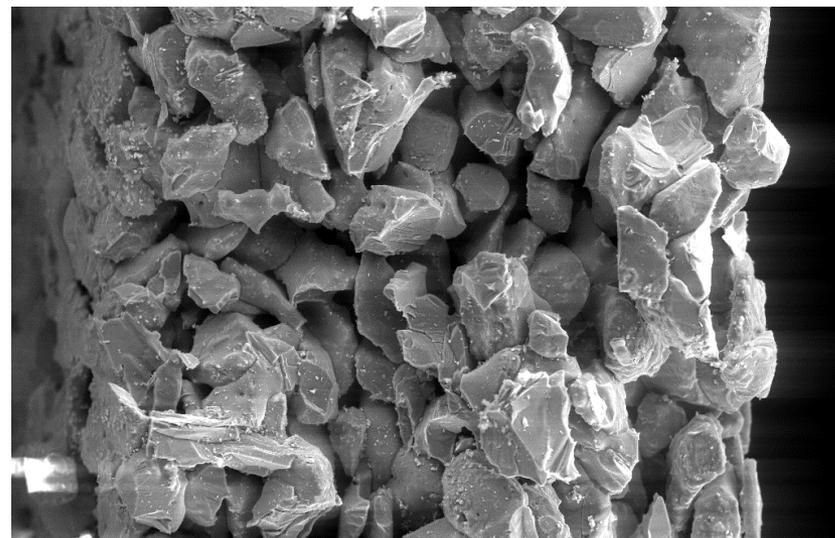
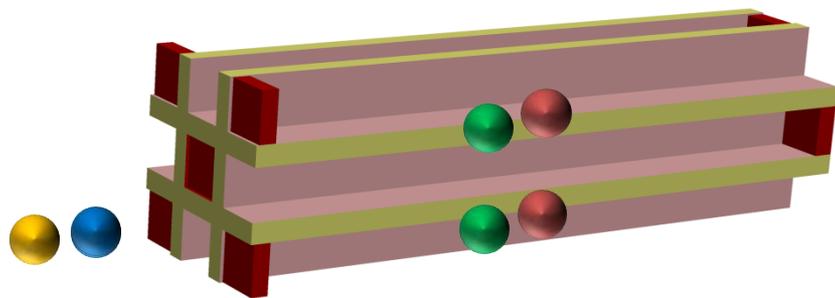


Soluzione impregnante di catalizzatore e filtro wall flow

Linea sperimentale per l'analisi del particolato (ENEA UTTS-ENE)



- Obiettivo: abbattimento del particolato carbonioso emesso da generatori di calore a biomassa.
- Punto di partenza: sistemi di filtrazione del particolato emesso dai motori diesel
 - Filtri monolitici di tipo Wall Flow con matrice in carburo di silicio (SiC)
 - Specie attiva depositata: ferrite di rame (FeCu_2O_4)

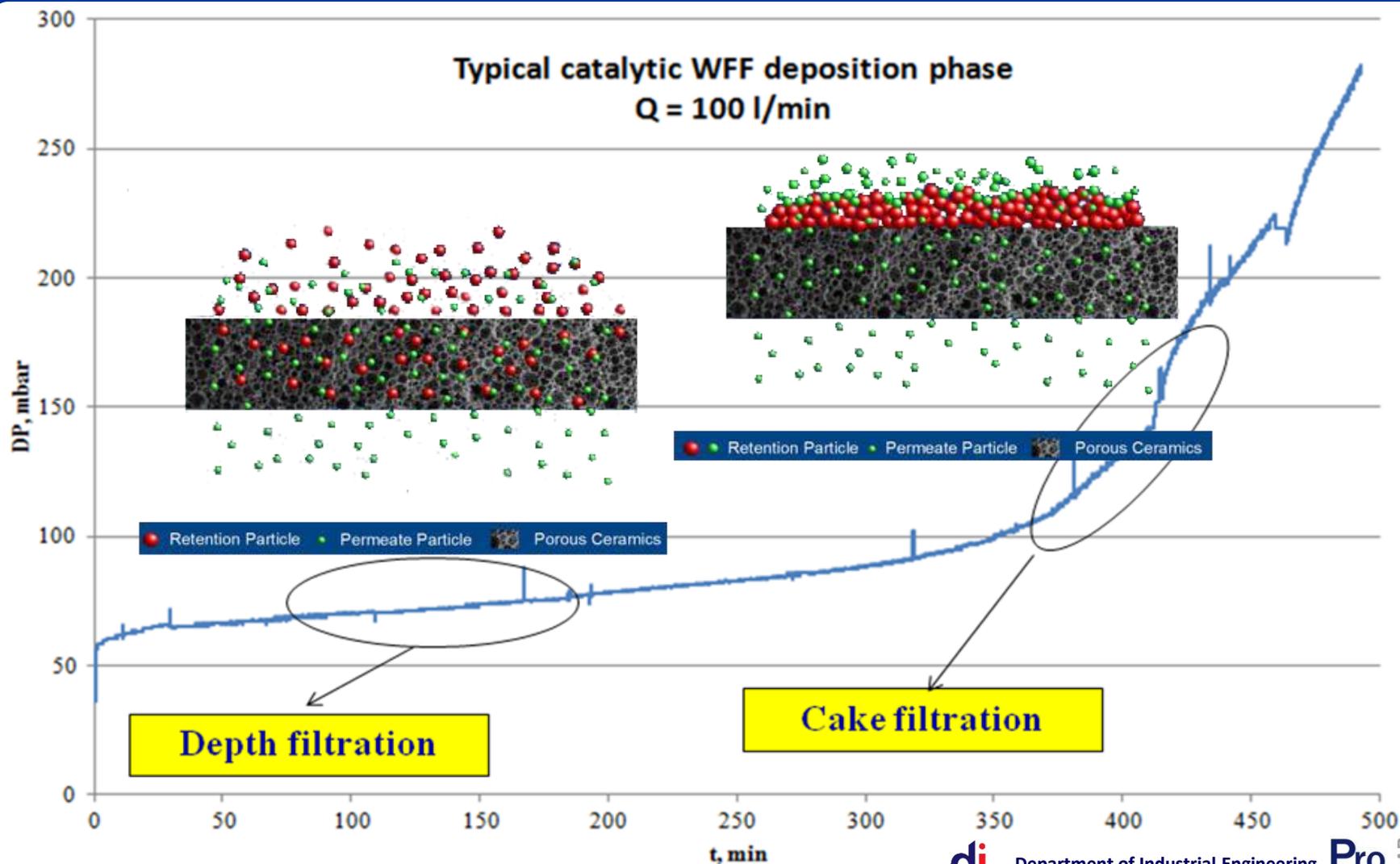


100μm

Filtro non catalitico

Mag = 500 X

Dinamica di deposizione del particolato sui filtri wall-flow

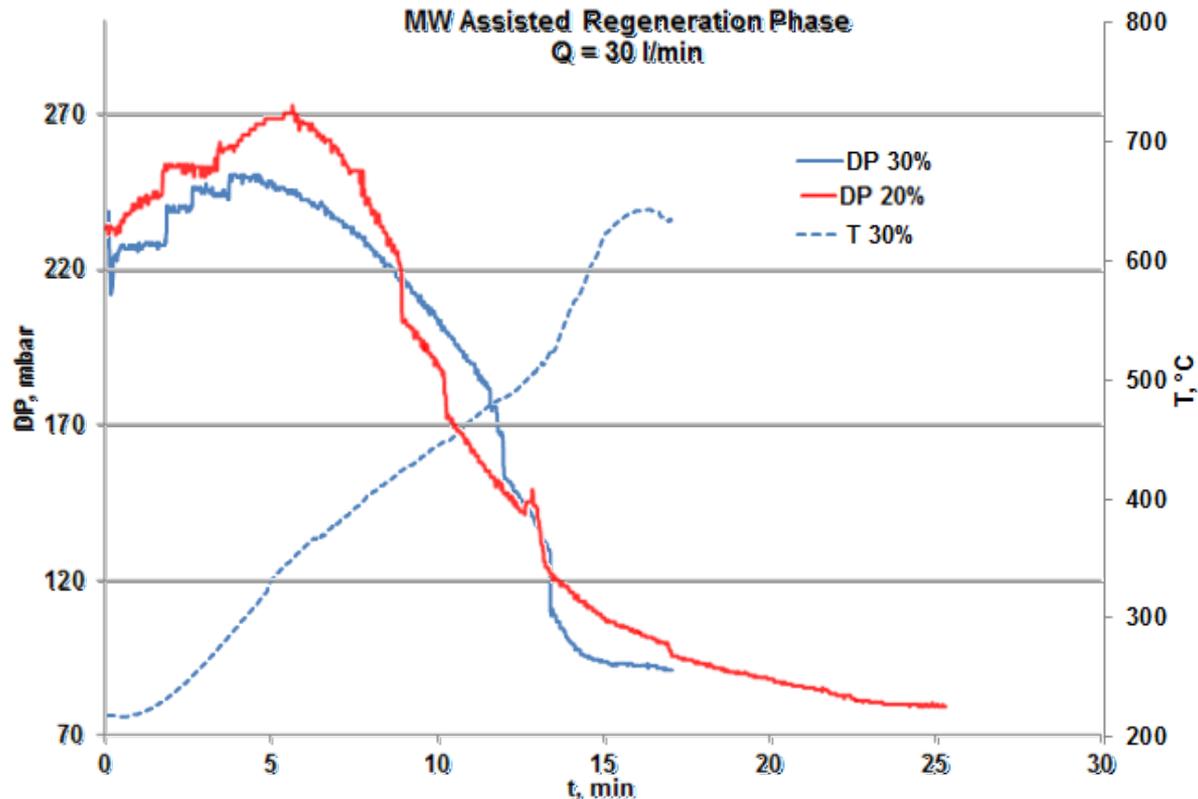


- Specie attiva: CuFe_2O_4
 - ✓ catalizzatore;
 - ✓ assorbitore delle microonde a 2,45 GHz.
- Rigenerazione con sistema di riscaldamento a microonde:
 - ✓ estremamente rapido;
 - ✓ selettivo, in funzione delle proprietà dielettriche dei materiali.
 - ✓ attivabile e disattivabile istantaneamente;
 - ✓ risparmi energetici derivabili principalmente dal fatto che viene riscaldato direttamente il filtro;

Settore industriale	Applicazioni
Chimico e farmaceutico	Essiccazione polveri, fusione resine, polimerizzazione
Agroalimentare	Essiccazione, cottura, scongelamento, pastorizzazione, sterilizzazione
Tessile	Asciugatura bobine, abiti, dosaggio tinte
Legno e sughero	Asciugatura, essiccazione, sterilizzazione
Ceramica e laterizio	Essiccazione manufatti
Gomma e plastica	Preriscaldamento, essiccazione, vulcanizzazione, fusione di materiali

Rigenerazione dei filtri catalitici: effetto del carico di specie attive

MW Assisted Regeneration Phase
 $Q = 30 \text{ l/min}$



- L'aumento del carico di specie attive dal 20% al 30% in peso comporta:
1. maggiore velocità di reazione;
 2. minore tempo per la rigenerazione del filtro (da 25' a 15' circa);
 3. minore energia necessaria per la rigenerazione (da 1185 kJ a 816 kJ)

Ob.	Risultati ottenuti PAR 2013	Risultati attesi PAR 2014
c.3	<ul style="list-style-type: none">Studio, valutazione e confronto di differenti sistemi di abbattimento delle emissioni prodotte dalla combustione di biomassa solida mediante prove sperimentali su prototipi in scala di laboratorio di filtri catalitici tipo wall flow, con dimostrazione di elevata efficienza di abbattimento del particolato ad opera dei filtri in carburo di silicio attivati con ferrite di rame	<ul style="list-style-type: none">Verifica della fattibilità tecnica di rigenerazione dei filtri mediante un sistema a microonde, tramite la progettazione e l'allestimento di una nuova linea di derivazione fumi dedicata con integrato un sistema di rigenerazione a microondeSvolgimento di prove sperimentali per la valutazione della durata e dell'efficienza di rigenerazione dei filtri, in termini di capacità di abbattimento del particolato e di riduzione delle perdite di carico

Divulgazione dei risultati

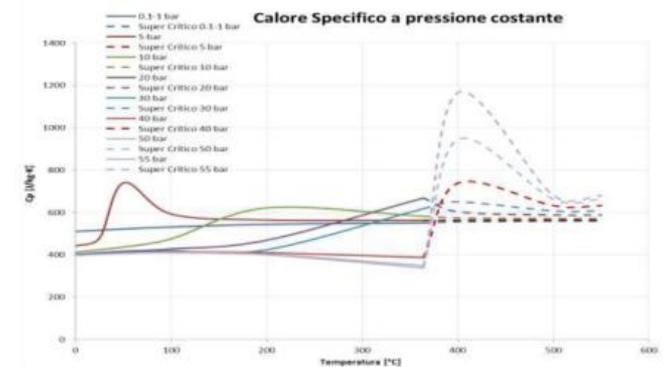
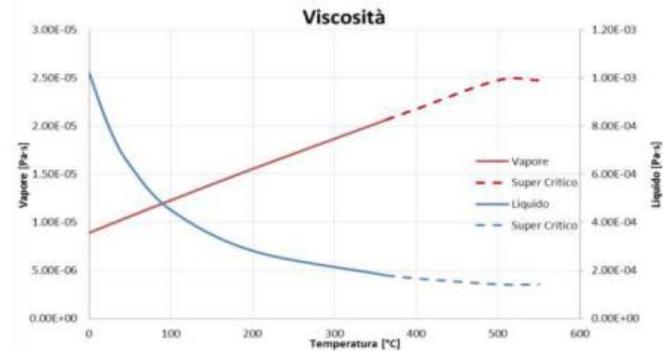
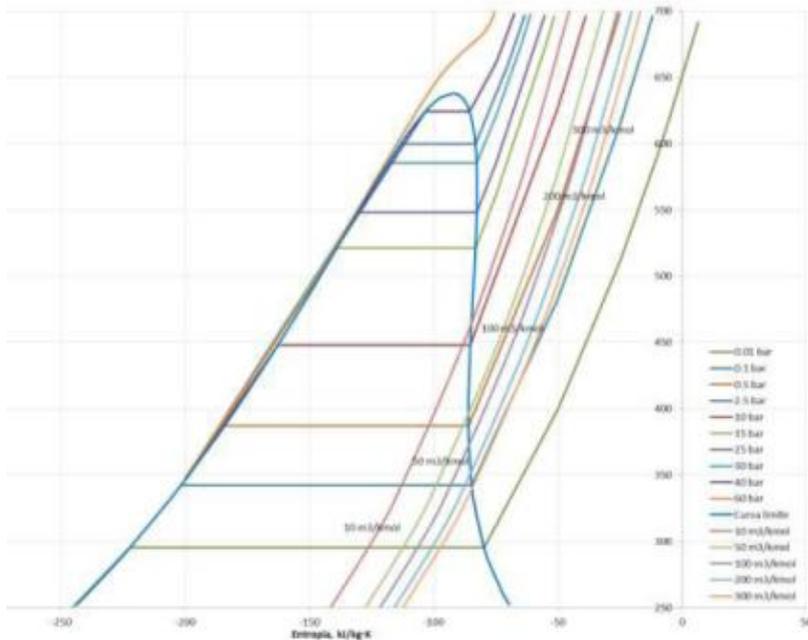
- ✓ V. Palma, E. Meloni, *Sviluppo di sistemi filtranti catalitici per l'abbattimento del particolato fine e l'ossidazione del CO*, Report RdS/PAR2013/238
- ✓ E. Ghisolfi, *Caratterizzazione di supporti ceramici ed analisi IPA derivanti da prove sperimentali con caldaia a biomasse*, Report RdS/PAR2013/243
- ✓ G. Stoppiello, *Filtri catalitici di tipo wall flow per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida*, Report RdS/PAR2013/239
- ✓ G. Stoppiello, M. Gualtieri, F. Hugony, *Verifica sperimentale di filtri ceramici di tipo wall flow per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida*, Report RdS/2013/184

- R&D:
 - Estesa campagna di test sperimentali:
 - Correlazione tra la potenza del magnetron e i tempi e gli effetti della rigenerazione;
 - Effetto cumulativo dei cicli di rigenerazione sulle prestazioni dei filtri;
 - Influenza del tipo di biomassa sulla capacità di rigenerazione con sistema a microonde;
 - Analisi dati finalizzata all'ottimizzazione del filtro in abbinamento al sistema di rigenerazione;
 - Upscaling del sistema di filtrazione con rigenerazione a microonde;
- Possibili trasferimenti all'industria:
 - Caratteristiche dei filtri di tipo wall-flow con matrice ceramica e deposizione di specie attiva per l'abbattimento del particolato prodotto dalla combustione di biomassa;
 - Valutazione della competitività del sistema di riscaldamento a microonde per la rigenerazione di filtri utilizzati per la riduzione delle emissioni e del particolato prodotti dalla combustione della biomassa

c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi e riduzione dell'impatto ambientale

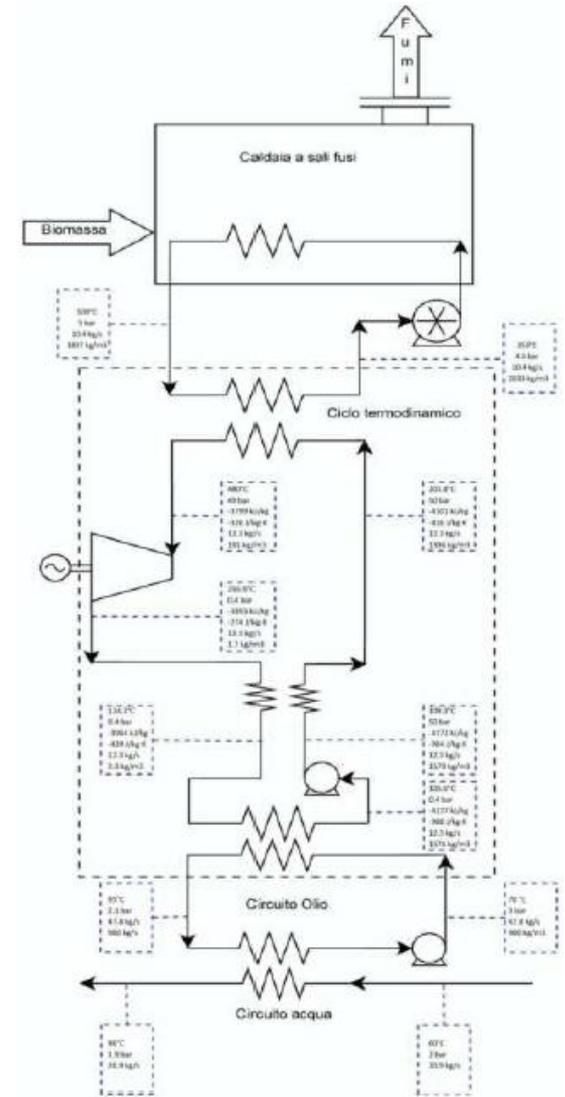
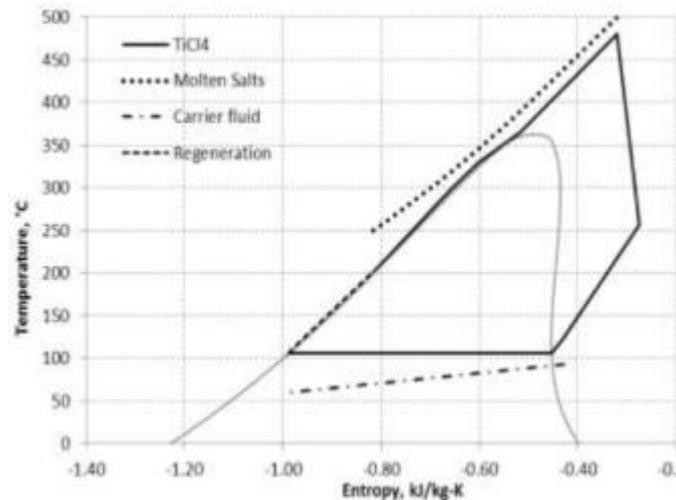
c.2 Verifica del comportamento del $TiCl_4$ come possibile fluido di lavoro

Principali collaborazioni	Attività
<ul style="list-style-type: none"> Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia 	<ul style="list-style-type: none"> Verifica del comportamento del $TiCl_4$ come possibile fluido di lavoro nei motori a ciclo Rankine



Simulazione di un impianto da 1 MWe con $TiCl_4$ come fluido motore e Sali fusi quale fluido termovettore nel generatore di calore, con e senza circuito ad olio per condensazione

Input		
P max	bar	50
T max	C	480
T max sali	C	500
T min sali	C	250
Output		
P turbina	kWe	1060
P netta	kWe	923,5
Q in ciclo	kWth	3718
Q utile	kWth	2621
η ciclo netto	%	29,51
η_{el} ciclo netto	%	26,90
η_{el} netto impianto	%	19,87
η_{th} impianto	%	56,40
η_{tot} impianto	%	76,27



$TiCl_4$ in cilindro di prova in acciaio AISI316L e campioni di P91 e CuNi

- Problematiche di gestione circuito di prova;
- Stabilità termochimica del $TiCl_4$ fino a 550 C;
- Incompatibilità con CuNi;
- Trascurabile attacco intergranulare con P91;

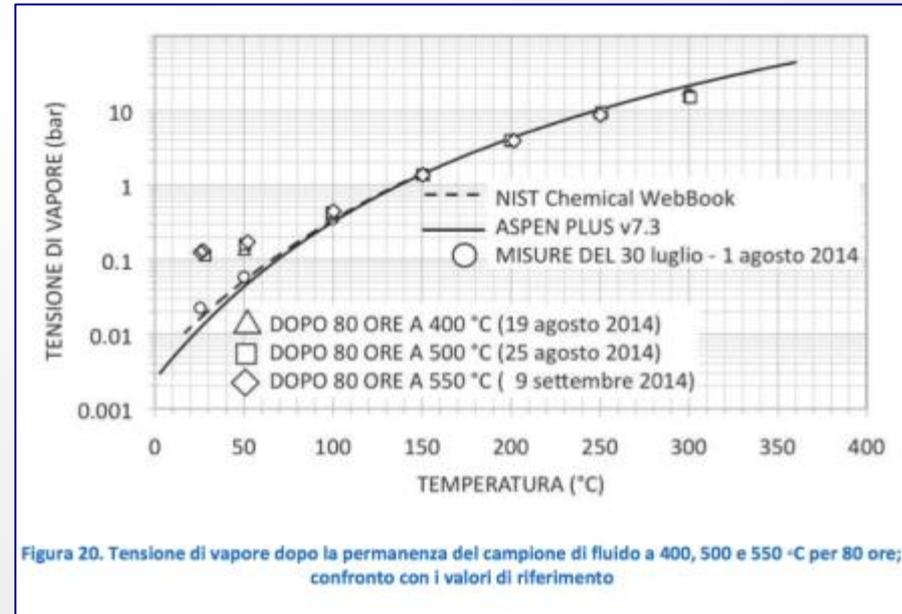
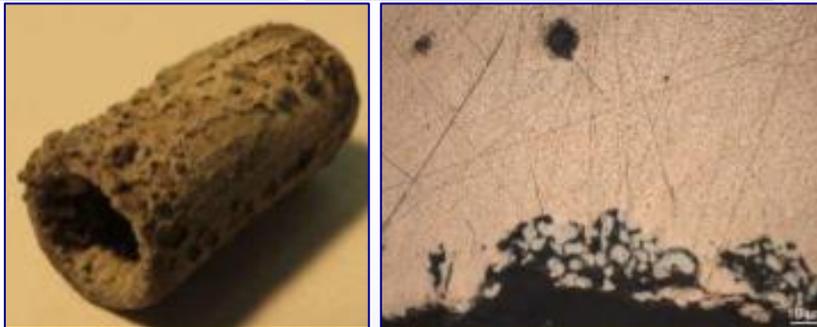


Figura 20. Tensione di vapore dopo la permanenza del campione di fluido a 400, 500 e 550 °C per 80 ore; confronto con i valori di riferimento

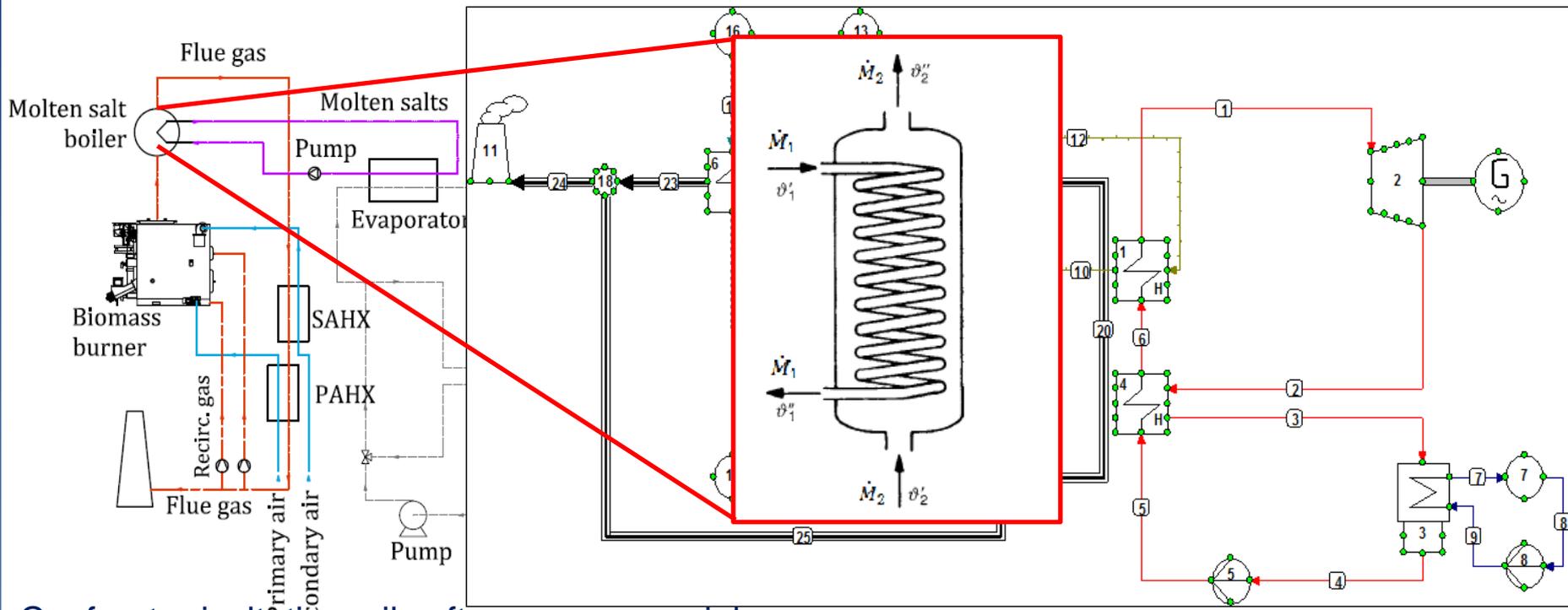
Ob.	Risultati ottenuti PAR 2013
c.2	<ul style="list-style-type: none">▪ Analisi teorica delle proprietà $TiCl_4$▪ Valutazioni di tipo tecnico - economico mediante simulazione di un impianto con e senza circuito ad olio per condensazione▪ Approfondimento degli aspetti di carattere normativo▪ Indagine su materiali idonei a operare con $TiCl_4$ alle alte temperature termica e chimica del $TiCl_4$ ad alte temperature▪ Individuazione e verifica sperimentale delle criticità a operare con $TiCl_4$ (alta reattività con acqua)

Divulgazione dei risultati

- ✓ D. Bonalumi, M. Astolfi, R. Roberto, M. Caldera, M. C. Romano, D. M. Turi, P. Silva, A. Giuffrida, C. Invernizzi, E. Macchi , *High efficiency ORC for high temperature molten salt boiler for biomass applications*, Proc. ASME ORC 2013, Amsterdam, 2013
- ✓ E. Macchi, D. Bonalumi, *Proprietà chimico-fisiche del $TiCl_4$, aspetti normativi e autorizzativi, compatibilità dei materiali*, Report RdS/PAR2013/151
- ✓ E. Macchi, D. Bonalumi, C. Invernizzi, P. Iora, *Risultati termica del $TiCl_4$, scelta dei materiali, approfondimento tecnico-economico*, Report RdS/PAR2013/1269
- ✓ E. Macchi, M. Astolfi, D. Bonalumi, A. Giuffrida, C. M. Invernizzi, M. C. Romano, P. Silva, D. M. Turi, R. Roberto, V. Gerardi, M. Caldera, *Valutazione di cicli termodinamici innovativi per applicazioni con caldaie a sali fusi alimentate a biomassa legnosa*, Report RdS/2013/178

c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi e riduzione dell'impatto ambientale

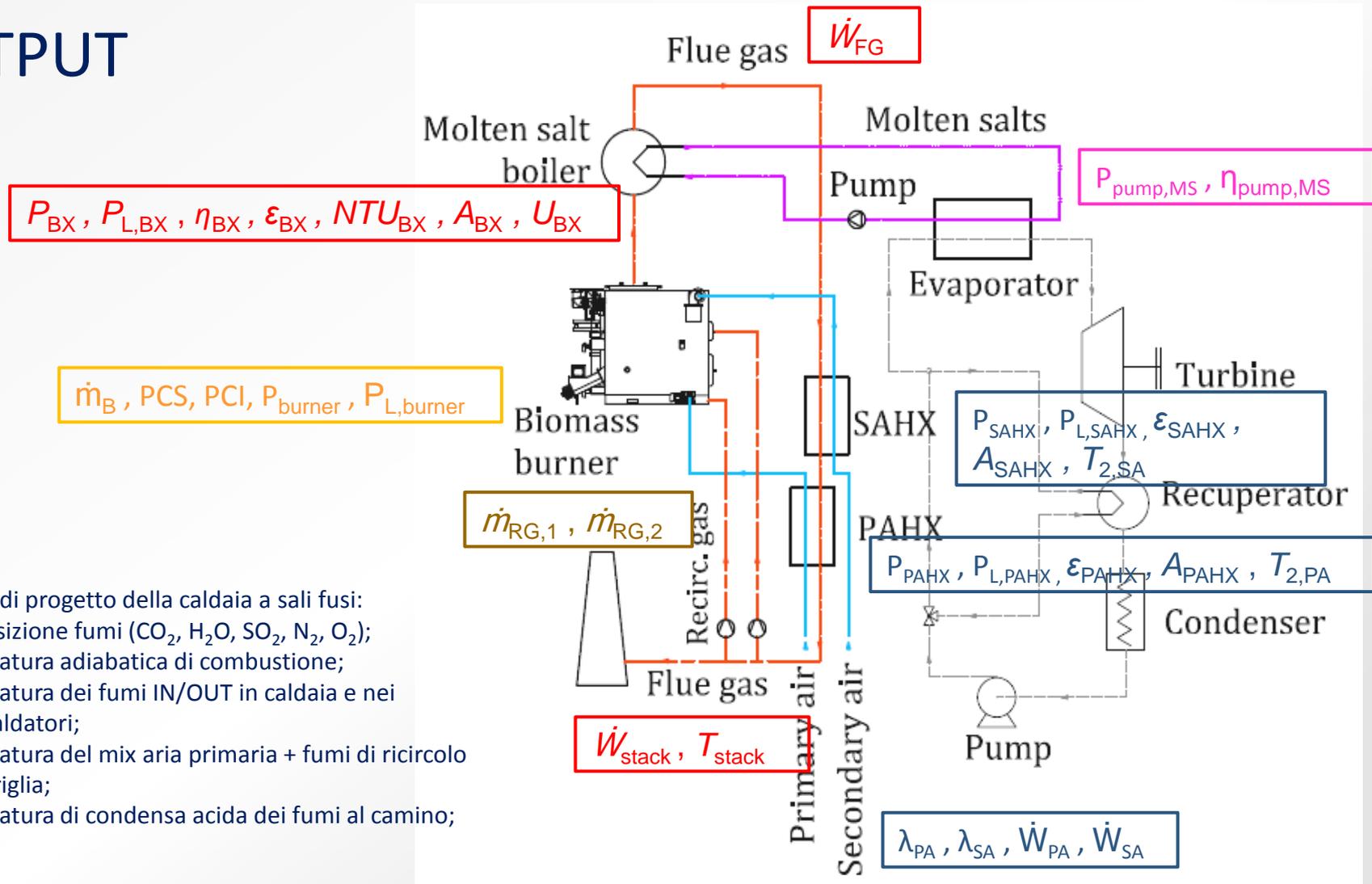
c.2 Sviluppo di un strumento di calcolo per la valutazione energetica ed economica dei sistemi cogenerativi



Confronto risultati con il software commerciale
Cycle Tempo® della TU Delft

- ✓ Obiettivo: calcolo delle prestazioni di un generatore di calore alimentato a biomassa solida, abbinato a una caldaia a sali fusi, in impianti di cogenerazione;
- ✓ Sviluppo di uno strumento di calcolo composto da due gruppi di funzioni customizzate in ambiente MATLAB e Scilab, per il calcolo delle prestazioni in condizioni nominali e in condizioni regolate dell'impianto;
- ✓ Basi teoriche:
 - ✓ Principio di conservazione dell'energia e della massa;
 - ✓ Modello di combustione semplificato (combustione completa);
- ✓ Lo strumento di calcolo considera:
 - ✓ Combustore a griglia mobile alimentato a biomassa;
 - ✓ Eccesso d'aria nei fumi di combustione;
 - ✓ Ricircolo dei fumi sotto e sopra griglia;
 - ✓ Suddivisione dell'aria di combustione (aria primaria e secondaria);
 - ✓ Recupero termico con preriscaldamento dell'aria.

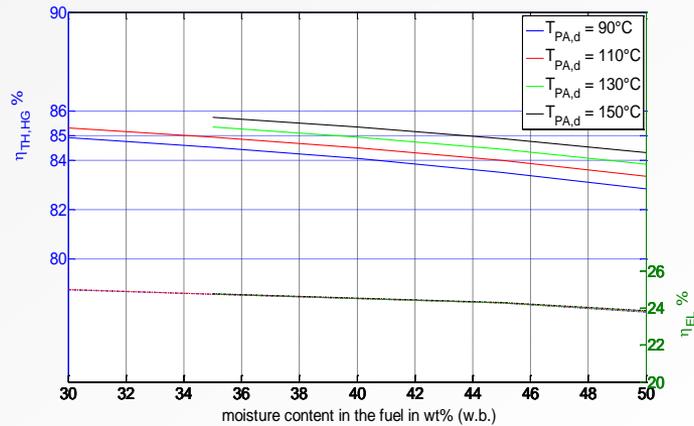
OUTPUT



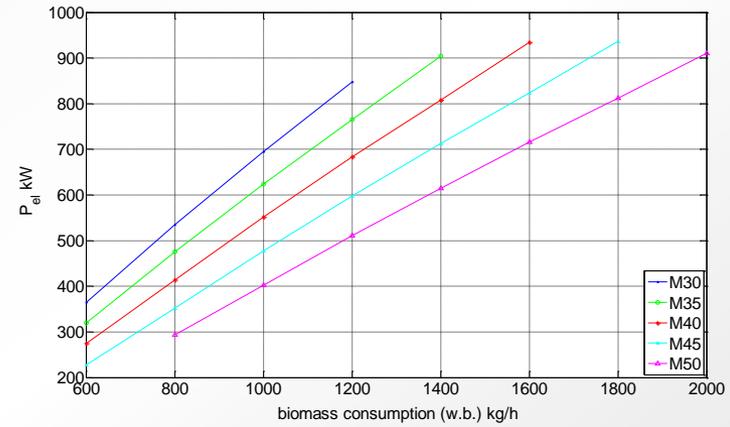
Parametri di progetto della caldaia a sali fusi:

- ✓ Composizione fumi ($CO_2, H_2O, SO_2, N_2, O_2$);
- ✓ Temperatura adiabatica di combustione;
- ✓ Temperatura dei fumi IN/OUT in caldaia e nei preriscaldatori;
- ✓ Temperatura del mix aria primaria + fumi di ricircolo sotto griglia;
- ✓ Temperatura di condensa acida dei fumi al camino;

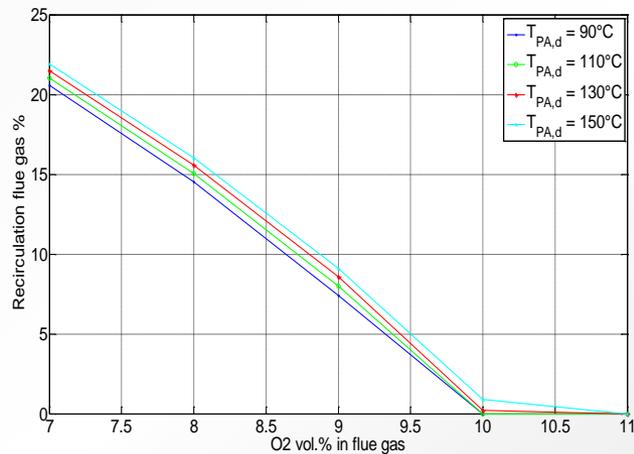
Rendimento elettrico e termico



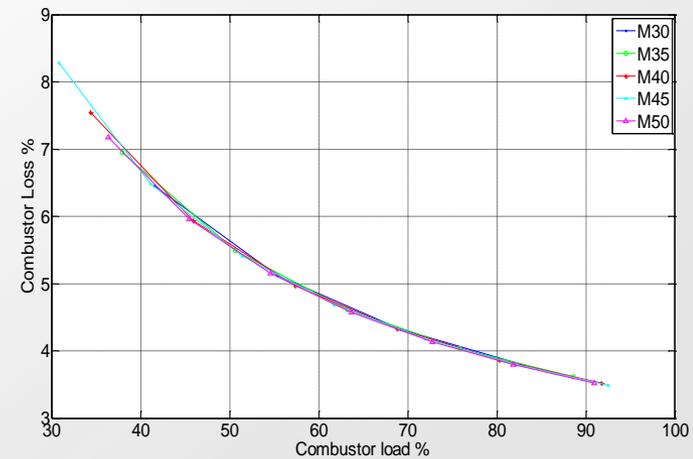
Potenza elettrica



Ricircolo dei fumi



Perdite di calore in camera di combustione



- Analisi degli incentivi per la produzione di energia da biomassa
 - ✓ tariffe incentivanti, premi, metodologie di calcolo – CAR, PES
- Implementazione fogli di calcolo per valutazioni economiche preliminari
 - ✓ Parametri tecnici impianto;
 - ✓ Calcolo PES;
 - ✓ Calcolo tariffa incentivante complessiva;
 - ✓ Costi di realizzazione ed esercizio;
 - ✓ Ricavi da vendita energia elettrica e calore;
 - ✓ Calcolo PBT, VAN e TIR.

	A	B	C	D
1	TARIFFA INCENTIVANTE E.E. DM 6/7/2012			
2	dati		valore	
3	Tipo di combustibile		b	
4	Potenza elettrica	1000	kW	
5	anno di riferimento	2014		
6	riduzione tariffa base	2,0%		
7	Tariffa incentivante base		204,8	€/MWh
8	Premio filiera	VERO	20	€/MWh
9	Premio emissioni	FALSO	0	€/MWh
10	Premio gas serra	FALSO	0	€/MWh
11	Premio CHP (equiv)		18,75	€/MWh
12	Tariffa totale		243,6	€/MWh

Figura 20. Foglio di calcolo "Tariffe"

Tabella 34. Calcolo della macchina virtuale e del PES (esempio di applicazione)

eta non CHP		17,9%
C eff		0,31
E CHP	MWh	3.750
E non CHP	MWh	4.250
F nonCHP	MWh	23.800
H non CHP	MWh	0
F CHP	MWh	21.000
PES soglia		10%
eta soglia		75,0%
E CHP	MWh	3.750
H CHP	MWh	12.000
F CHP	MWh	21.000
CHPH eta		57,1%
CHPE eta		17,9%
Ref H eta		86,0%
Ref E eta		33,4%
Ref E eta base		33,0%
Correzione climatica		0,37%

	A	B	C
1	PRINCIPALI RISULTATI ECONOMICI		
2			
3	COSTI DI INVESTIMENTO		
4	Opere edili		€ 600.000
5	Sistema di alimentazione		€ 153.000
6	Linee fumi		€ 280.500
7	Caldaia		€ 1.938.000
8	Gruppo di potenza		€ 1.335.000
9	TOTALE		€ 4.306.500
10			
11	COSTI DI ESERCIZIO		
12	Costo combustibile		€ 1.321.967
13	Costo manutenzione		€ 40.000
14	TOTALE		€ 1.361.967
15			
16	RICAVI DI ESERCIZIO		
17	Ricavo da energia elettrica		€ 1.851.132
18	Ricavo da calore venduto		€ 1.080.000
19	TOTALE		€ 2.931.132
20			
21	MARGINE OPERATIVO		
22	TOTALE		€ 1.569.165
23			
24	INDICATORI ECONOMICI		
25	Tempo di ritorno semplice (PBT)	anni	2,74
26	Valore attuale netto (VAN)		€ 7.810.175
27	Tasso interno di rendimento (TIR)		35%

Figura 19. Tabella Input Output del foglio di calcolo "Business Plan"

Ob.	Risultati ottenuti PAR 2013	Risultati attesi PAR 2014
c.2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sviluppo di uno strumento di calcolo per l'analisi dei sistemi energetici alimentati a biomassa che permette di calcolare le variabili di funzionamento (potenze, efficienze, temperature, portate, composizione dei fumi, ecc.) sia in condizioni nominali di progetto sia in condizioni regolate 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perfezionamento dello strumento di calcolo mediante la creazione di nuove subroutines per l'analisi di assetti cogenerativi, con e senza il contributo dei preriscaldatori dell'aria di combustione ▪ Implementazione di un'interfaccia grafica user-friendly dello strumento di calcolo e trasferimento dell'applicativo su piattaforma WEB, in modo tale da rendere lo strumento liberamente fruibile al pubblico

Divulgazione dei risultati

- ✓ M. Caldera, R. Roberto, *Analysis of the performance of biomass-fired boilers coupled with high-temperature CHP cycles*, Poster presentato alla conferenza EUBC&E 2014, Amburgo, 2014
- ✓ M. Caldera, R. Roberto, F. M. Flores Brand, M. Masoero, *Analysis of a Concentrating Solar Power Generation System Integrated with Biomass Boiler*, Proc. EUBC&E 2015, Vienna, 2015
- ✓ A. Medea, *Analisi Energetica ed exergetica di impianti di potenza di piccola taglia alimentati a biomassa o metano*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2014 - Tesi ENEA n.1750
- ✓ M Caldera, R. Roberto, *Perfezionamento dello strumento di calcolo per l'analisi di sistemi energetici alimentati a biomassa legnosa*, Report RdS/PAR2013/250
- ✓ M. Caldera, V. Gerardi, R. Roberto, *Implementazione di uno strumento di calcolo per l'analisi di sistemi energetici alimentati a biomassa legnosa*, Report RdS/2013/263

- **Sviluppi:**
 - ✓ Trasferimento dello strumento di calcolo su piattaforma web;
 - ✓ Integrazione dello strumento di calcolo in software dedicati all'analisi di sistemi energetici generici (solare, eolico, a combustibili tradizionali, ecc.), per lo studio di impianti multienergia e ibridi;
- **Possibili trasferimenti al sistema produttivo:**
 - ✓ Strumento di calcolo di supporto all'analisi di fattibilità di sistemi cogenerativi alimentati a biomassa, basato su funzioni modulari personalizzabili in base alle specifiche dell'utente.

Grazie per l'attenzione