



Ricerca di Sistema elettrico

Sperimentazione del processo di gassificazione presso l'impianto Dimostrativo Sotacarbo

G. Calì, P. Miraglia, D. Marotto, P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano



SPERIMENTAZIONE DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE PRESSO L'IMPIANTO DIMOSTRATIVO SOTACARBO

G.Cali, P.Miraglia, D.Marotto, (Sotacarbo)
P.Deiana, M.Subrizi, C.Bassano (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano annuale di realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Bioenergia

Obiettivo: Parte B, Sperimentazione del processo di gassificazione presso l'impianto Sotacarbo

Responsabile del Progetto: Vincenzo Gerardi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo e caratterizzazione del processo di gassificazione di biomasse e/o miscele biomasse-carbone e di trattamento del syngas prodotto".

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Deiana

Responsabile scientifico Sotacarbo: Enrico Maggio

Un caloroso ringraziamento va a tutto il personale impegnato nello svolgimento dei test sperimentali, poiché senza di loro sarebbe stato impossibile realizzare il lavoro in oggetto; nello specifico si vuole ringraziare:

Il personale di Impianto: A.Argiolas, C.Manca, S.Meloni, S.Muntoni, I.Puddu, F.Tedde, A.Vacca.

Il personale della Sala Controllo: G.Cucca, C.Frau, E.Loria, A.Maiu, D.Multineddu, F.Poggi, A.Porcu, A.Puddu.

Il personale della Analitica: R.Cara, G.Cau, F.Dessì, A.Masili, M.Mureddu, A.Orsini.

Indice

1	INTRODUZIONE	5
2	L'IMPIANTO DIMOSTRATIVO SOTACARBO.....	6
2.1	IL REATTORE DI GASSIFICAZIONE	6
2.2	SCRUBBER E SISTEMI DI SCARICO E STOCCAGGIO REFLUI	10
2.3	MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA	11
2.4	SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO DELL'IMPIANTO.....	12
2.5	SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI	13
2.5.1	<i>Composizione del gas</i>	13
3	OBIETTIVI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	14
3.1	OBIETTIVI SPECIFICI DEI TEST SPERIMENTALI	14
3.2	COMBUSTIBILI IMPIEGATI	14
3.3	STRUMENTI E METODI DI ANALISI.....	15
3.3.1	<i>Analisi immediata</i>	15
3.3.2	<i>Analisi elementare</i>	15
3.3.3	<i>Determinazione del potere calorifico</i>	16
4	PROCEDURE OPERATIVE DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE	17
4.1	VERIFICHE E AVVIAMENTO DELLE APPARECCHIATURE AUSILIARIE.....	17
4.2	FASE DI START-UP.....	17
4.2.1	<i>Caricamento iniziale del reattore</i>	17
4.2.2	<i>Accensione del letto combustibile</i>	18
4.2.3	<i>Analisi Syngas</i>	18
4.3	FASE OPERATIVA	18
4.4	FASE DI SHUT-DOWN.....	19
5	TEST SPERIMENTALI DI GASSIFICAZIONE	20
5.1	PRINCIPALI MODIFICHE SULL'IMPIANTO DIMOSTRATIVO	20
5.2	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 18-20/05/2016	21
5.3	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 07-10/06/2016	23
5.4	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI CO-GASSIFICAZIONE DEL 25-29/07/2016	26
6	CAMPIONAMENTO TAR	30
6.1	SISTEMA DI CAMPIONAMENTO TAR UTILIZZATO	31
6.2	CAMPIONAMENTO DEL 26/07/2016	35
6.3	NUOVO SISTEMA DI CAMPIONAMENTO TAR	36
7	CONCLUSIONI.....	37
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	38
9	PRESENTAZIONE SOCIETÀ	39

Sommario

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test di gassificazione effettuati nel corso delle campagne sperimentali nel periodo Gennaio-Settembre 2016, al fine di testare l'impianto dimostrativo da 5 MW_t con differenti combustibili. Oltre a una descrizione sintetica dell'impianto dimostrativo e delle modifiche recentemente apportate, sono illustrate le prestazioni generali dell'impianto con differenti tipologie di biomasse. Nel corso della campagna sperimentale, oggetto del presente documento, i combustibili utilizzati sono stati i seguenti: cippato di legna vergine pinus pinea e eucaliptus. I test sperimentali effettuati sono stati tre di differente durata: il primo di 48 ore, il secondo di 72 ore, il terzo di circa 96 ore, esclusa la fase di spegnimento dell'impianto. Il presente rapporto presenta la verifica del funzionamento a caldo delle varie sezioni dell'impianto, inoltre, è presente un'analisi dei dati sperimentali ottenuti.

1 Introduzione

I test sperimentali di gassificazione effettuati nel periodo Gennaio-settembre 2016, hanno permesso di: verificare il funzionamento e le prestazioni del gassificatore da 5 MW_t e di studiare il processo di gassificazione con cippato di legna vergine (pinus pinea e eucaliptus di diversa qualità);

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test sperimentali di gassificazione effettuati sull'impianto dimostrativo.

In particolare il documento è stato articolato come segue:

- nel secondo capitolo è riportata una descrizione sintetica dell'impianto dimostrativo;
- nel terzo capitolo sono riportati i principali obiettivi dei test di gassificazione, l'organizzazione della campagna sperimentale e le caratteristiche dei combustibili impiegati;
- nel quarto capitolo sono descritte le procedure operative adottate nel corso dei test;
- nel quinto capitolo sono riportate le principali modifiche all'impianto dimostrativo e la valutazione dei dati sperimentali ottenuti;
- nel sesto capitolo sono riportate le conclusioni sulle attività svolte e gli sviluppi futuri per l'ottimizzazione dell'impianto dimostrativo.

2 L'impianto Dimostrativo Sotacarbo

L'impianto è costituito, in estrema sintesi, da:

- una sezione di gassificazione,
- da un sistema di lavaggio del syngas (scrubber) in equi-corrente,
- una torcia.

2.1 Il reattore di gassificazione

Il gassificatore dimostrativo della piattaforma Sotacarbo è costituito da un reattore a letto fisso up-draft, alimentato ad aria e progettato per operare a pressione pressoché atmosferica.

Il reattore, sviluppato per gassificare differenti tipologie di carbone e biomasse, è stato utilizzato per effettuare test di gassificazione di biomasse legnose e co-gassificazione di carbone e biomasse.

Il gassificatore ha un diametro interno di 1300 mm e un'altezza complessiva pari a 2800 mm; l'altezza massima del letto di combustibile può arrivare a circa 2400 mm. Il combustibile viene introdotto nel gassificatore attraverso una tramoggia posta sulla sua parte superiore, a cui segue un condotto con forma a Y integrato da tre ghiagliottine atte alla gestione della tempistica del caricamento.

Il combustibile viene caricato sulla tramoggia attraverso l'utilizzo di un sistema di caricamento automatico con trasportatore a catena "Redler" visibile in Figura 1. Il sistema è dotato di una tramoggia inferiore nella quale viene caricato il materiale (attraverso l'utilizzo di un muletto) e di una tramoggia superiore dotata di quattro celle di carico con fondoscala di 150 kg; la tramoggia superiore è quindi in grado di misurare carichi fino a 600 kg.



Figura 1. Sistema di caricamento automatico del combustibile "Redler"

Il gassificatore, visibile in Figura 2, al suo interno ha delle pareti in acciaio raffreddate tramite una camicia dove circola dell'acqua. Il sistema di raffreddamento del gassificatore è completato da un corpo cilindrico superiore e da un condensatore ad aria con flusso forzato. Il profilo termico all'interno del gassificatore è monitorato con l'ausilio di 36 termocoppie posizionate su sei livelli differenti delle pareti del reattore. Su ogni livello sono presenti sei termocoppie a 60° l'una dall'altra (vedi Tabella 1). Si riporta di seguito un'immagine del gassificatore e una tabella rappresentante la disposizione delle termocoppie rispetto all'altezza (espressa in mm) del gassificatore stesso.



Figura 2. Gassificatore impianto dimostrativo

Tabella 1. Posizionamento termocoppie

<i>Altezza</i>						
2700	TIT – 189P/PV	TIT – 183P/PV	TIT – 177P/PV	TIT – 171P/PV	TIT – 165P/PV	TIT – 159P/PV
1250	TIT – 188P/PV	TIT – 182P/PV	TIT – 176P/PV	TIT – 170P/PV	TIT – 164P/PV	TIT – 158P/PV
800	TIT – 187P/PV	TIT – 181P/PV	TIT – 175P/PV	TIT – 169P/PV	TIT – 163P/PV	TIT – 157P/PV
650	TIT – 186P/PV	TIT – 180P/PV	TIT – 174P/PV	TIT – 168P/PV	TIT – 162P/PV	TIT – 156P/PV
500	TIT – 185P/PV	TIT – 179P/PV	TIT – 173P/PV	TIT – 167P/PV	TIT – 161P/PV	TIT – 155P/PV
350	TIT – 184P/PV	TIT – 178P/PV	TIT – 172P/PV	TIT – 166P/PV	TIT – 160P/PV	TIT – 154P/PV
	Nord Est	Nord	Nord Ovest	Sud Ovest	Sud	Sud Est
Disposizione	300°	0°	60°	120°	180°	240°
ENEA	6	1	2	3	4	5
Sotacarbo	A	B	C	D	E	F

Il letto di combustibile poggia sopra una griglia metallica che consente lo scarico delle ceneri attraverso un sistema composto da più piani concentrici come mostrato nella Figura 3.



Figura 3. Parte esterna della griglia del gassificatore dimostrativo

La fase di accensione avviene tramite l'ausilio di sei irradiatorii ceramici da 800 W disposti in maniera circolare ad una altezza di 500 mm dal fondo del reattore, dove è stato posizionato lo strato di carbone vegetale. Si riporta di seguito la sezione del gassificatore dove viene indicato il posizionamento degli irradiatorii:

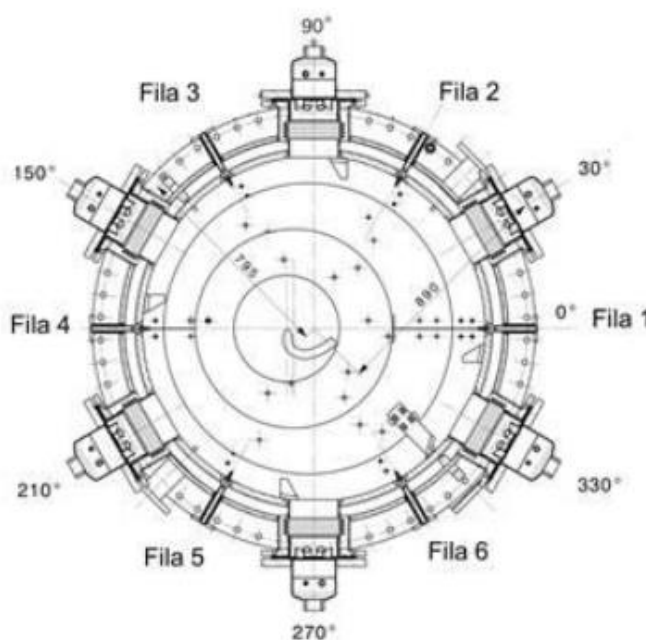


Figura 4. Sezione del gassificatore: posizione degli irradiatorii di accensione

Come si può notare dalla Figura 4 i sei irradiatorii ceramici ad infrarosso sono disposti a 60° l'uno dall'altro, hanno dimensioni 125mm X 125mm e sono dotati di termocoppia interna di tipo K (0-1000 °C). L'irradiatore è inserito in un involucro metallico (lampada), montato sul gassificatore.

Gli irradiatorii sono alimentati da tre SCR monofase della potenza di 2 kW con controllo dell'energia elettrica erogata da sistema di regolazione e controllo in relazione al set point di temperatura impostata; ciascun SCR comanda una coppia di lampade.

Il gassificatore, possiede un sistema di movimentazione del letto (Stirrer) inter-refrigerato, visibile in Figura 5. Esso è costituito principalmente da:

- un albero verticale cavo (per poter effettuare il raffreddamento con circolazione d'acqua);

- un'asta perpendicolare posta all' estremità inferiore dell'albero dotata di rostri per effettuare il mescolamento del letto;
- un pistone oleodinamico dotato di centralina che permette al pistone di traslare verticalmente;
- un motore di rotazione con una cella di carico per stimare la resistenza alla rotazione stessa.

Nella figura 2.5 è riportata un'immagine dello stirrer, nella stessa figura si notano i motori di rotazione e traslazione insieme al sistema che collega lo stirrer al pistone oleodinamico.



Figura 5. Stirrer

Il campo d'azione dello stirrer varia da quota 1400 mm fino a quota 2400 mm del reattore di gassificazione e la sua traslazione verticale è effettuata tramite un pistone oleodinamico comandato da una centralina di immissione dell'olio.

Il sistema di raffreddamento detto Steam Drum, visibile in Figura 6, ha la capacità di dissipare 500 kW termici (in condizioni di progetto) corrispondenti ad una portata massima di 800 kg/h di vapore con salto termico di circa 50 °C (da 100 °C a circa 50-70 °C).



Figura 6. Steam Drum

Il gassificatore è dotato dei seguenti sistemi ausiliari:

- sistema di produzione e adduzione aria processo;
- sistema di produzione e adduzione vapore;
- sistema di stoccaggio e adduzione azoto.

Gli agenti gassificanti necessari al funzionamento del gassificatore sono aria processo e vapore, generati rispettivamente da una soffiante con una portata massima di 1100 m³/h e da due caldaie in grado di produrre una portata pari a 250 kg/h ognuna, ad una pressione di 4 bar.

Considerato che la pressione massima di esercizio del gassificatore è pari a 0,5 barg (pressione relativa), lungo la linea vapore, a monte del gassificatore, è presente una valvola di laminazione che consente di ridurre la pressione fino al valore desiderato.

2.2 Scrubber e sistemi di scarico e stoccaggio reflui

Lo scrubber, visibile in Figura 7, ha lo scopo di effettuare un lavaggio del syngas tramite un flusso d'acqua equicorrente immesso mediante tre ugelli conici. Gli ugelli sono di tipo a cono pieno e sono stati posizionati su tre rampe sovrapposte. Lo scrubber svolge anche la funzione di guardia idraulica anti ritorno di fiamma. Il syngas in uscita attraversa un demister costituito da 8 dischi forati sovrapposti al fine di eliminare l'acqua eventualmente trascinata. Il TAR separato dal syngas confluisce nella parte conica inferiore dello scrubber; da dove viene rimosso mediante una pompa monovite. Il volume di acqua contenuto nello scrubber è di 6 m³; che unito a quello del contenitore di accumulo (successivamente descritto), consente di avere un discreto volano termico e di mantenere efficiente il potere lavante dell'acqua, evitando fenomeni repentini di saturazione sia in rapporto all'acidità cloridrica sia alla concentrazione salina. La vasca di accumulo ha un volume di 6 m³ ed è collegata allo scrubber mediante una tubazione; internamente è divisa da due setti che fungono da barriere per il trattenimento dell'eventuale frazione saturante o di quella sedimentabile. La vasca di accumulo ha nella parte bassa una valvola per lo scarico dei sedimenti, inoltre è dotata di una presa di reintegro dell'acqua evaporata durante il lavaggio del syngas e dell'acqua scaricata come refluo. L'acqua proveniente dalla vasca di accumulo viene rilanciata agli ugelli di lavaggio tramite delle pompe. A monte delle pompe si trova un sistema di filtri che ha il compito di proteggere le pompe stesse. Si riportano di seguito due immagini: una relativa allo scrubber e una relativa all'insieme della vasca di accumulo e del sistema di rilancio acqua.



Figura 7. Scrubber

2.3 Motore a combustione interna

Le attività di sperimentazione riguardanti l'utilizzo del syngas per la produzione di energia elettrica attraverso un motore a combustione interna, hanno richiesto l'impiego del gruppo elettrogeno Tessari (Figura 8), della potenza nominale di 24 kW elettrici, installato presso l'impianto di gassificazione pilota della piattaforma Sotacarbo. Il motore può essere alimentato, oltre che con il syngas prodotto dal processo di gassificazione e preventivamente depurato, anche con miscele dello stesso syngas con l'idrogeno prodotto nella linea di trattamento a caldo dell'impianto pilota o proveniente da stoccaggio in bombole mediante una linea dedicata.



Figura 8. Gruppo elettrogeno da 24 kW elettrici.

Il motore a combustione interna è collegato a un elettrogeneratore e l'energia elettrica prodotta viene successivamente dissipata con un sistema di lampade a resistenza. Al fine di consentirne il funzionamento per periodi di tempo significativi anche quando la produzione di syngas non è sufficiente (come accade con alcuni combustibili e sotto alcune particolari condizioni operative), il motore è stato integrato con un polmone costituito da un serbatoio a due camere del volume complessivo di 11,3 m³.

I requisiti del motore impongono caratteristiche di purezza del syngas superiori a quelle garantite dal sistema di lavaggio (scrubber) attualmente installato sull'impianto dimostrativo. Questo ha comportato la progettazione di un nuovo sistema di clean-up descritto nel rapporto "Progettazione e realizzazione modifiche e migliorie dell'impianto dimostrativo di gassificazione Sotacarbo". In attesa della realizzazione dello stesso, al fine di migliorare la qualità del syngas in alimentazione al motore, riducendone il contenuto di inquinanti, si è implementato un ulteriore sistema di filtrazione a monte del gruppo elettrogeno (Figura 10 e Figura 10). Questo è basato su 3 filtri di carta cilindrici di derivazione automobilistica ad elevato potere filtrante, contenuti in una camera di calma cilindrica in acciaio (L=800 mm, D=500 mm) collegata al motore attraverso una tubazione in AISI 304 da 3", dotata di un trasmettitore di pressione Bourdon Haenni ED701 (campo di misura: 0-600 mbar).



Figura 9. Filtro per MCI, sezione interna



Figura 10. Filtro per MCI, visuale esterna

2.4 Sistema di regolazione e controllo dell'impianto

L'impianto è dotato di una serie di strumenti che consentono di monitorare, in modo continuo, i principali parametri del processo: pressioni, portate e temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto, nonché i profili termici all'interno del reattore. Tali valori vengono monitorati tramite un sistema di regolazione e controllo (SRC) che li acquisisce attraverso un segnale di tipo elettrico (4-20 mA) e li registra tenendoli in memoria. Sulla base di tali parametri l'operatore per via manuale o in automatico (tramite sequenze già impostate) è in grado di intervenire sull'impianto al fine di modificarli. In particolare, il sistema di regolazione e controllo permette di azionare e movimentare: valvole pneumatiche di regolazione e ON-OFF, pistoni pneumatici e oleodinamici, compressori, pompe, motori, inverter. Attraverso tali operazioni l'operatore può regolare e controllare tutti i parametri dell'impianto durante il suo funzionamento.

2.5 Sistema di campionamento e analisi

A supporto delle sperimentazioni, l'impianto è dotato di una serie di strumenti che consentono di monitorare, in modo continuo, i principali parametri del processo: pressioni, portate e temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto, nonché i profili termici all'interno del reattore.

2.5.1 Composizione del gas

La composizione del syngas è misurata principalmente mediante due differenti sistemi:

- un gas cromatografo portatile (Agilent 3000);
- un sistema di analisi in tempo reale (Armadio ABB).

Il gas cromatografo portatile Agilent 3000 viene collegato di volta in volta ai vari punti di campionamento posti a monte e a valle di ciascuna delle sezioni principali dell'impianto. In particolare, il gas cromatografo fornisce una misura, ogni tre minuti circa, della composizione del syngas nelle specie CO₂, H₂, O₂, CO, CH₄, N₂, H₂S, COS, C₂H₆ e C₃H₈.

Infine, il sistema di analisi del gas in tempo reale è costituito da un armadio ABB contenente i seguenti analizzatori gas:

- misura delle concentrazioni di CO, CO₂ e CH₄ tramite modulo URAS26 di tipo IR (raggi infrarossi), con i seguenti campi di misura:
 - CO₂: 0-25% in volume;
 - CH₄: 0-5% in volume;
 - CO: 0-30% in volume;
- misura della concentrazione di H₂ tramite modulo CALDOS 25 di tipo a conducibilità termica, con campo di misura tra lo 0 e il 100% in volume;
- misura della concentrazione di O₂ tramite modulo Magnos 206 di tipo paramagnetico, con campo di misura tra lo 0 e il 25% in volume;
- misura della concentrazione di H₂S tramite modulo Limas 11 di tipo a raggi ultravioletti, con campo di misura tra lo 0 e il 2% in volume.

3 Obiettivi della campagna sperimentale

Il principale obiettivo della campagna sperimentale è stato quello di:

- ottimizzare e modificare, durante test di lunga durata, l’impianto dimostrativo ed in particolare il reattore di gassificazione in alcune parti quali: camicia di raffreddamento, griglia di scarico ceneri, torcia, sistema di caricamento del combustibile;
- testare il processo di gassificazione di biomasse. I combustibili utilizzati in alimentazione sono stati cippato di legna vergine (eucaliptus e pinus pinea) proveniente dallo sfalcio delle foreste presenti in Sardegna.
- Caratterizzare il syngas prodotto in termini di specie chimiche presenti, potere calorifico, portata, inquinanti presenti (tar, polveri).
- Automatizzare e strumentare alcune parti dell’impianto quali: sistema di caricamento combustibile, sistema di raffreddamento della camicia del gassificatore, gruppo scrubber.

3.1 Obiettivi specifici dei test sperimentali

Al fine di raggiungere gli obiettivi suddetti, sono stati programmati diversi test sperimentali della durata di differente durata: 48 ore, 72 ore, 96 ore (escluso lo spegnimento). I test sono stati effettuati nelle seguenti date:

- 18-20/05/2016, effettuato con cippato di pino proveniente da Villaspeciosa (CA) - (Cip 6);
- 07-10/06/2016, effettuato con cippato di eucalipto proveniente da Villasor (CA) - (Cip9);
- 25-29/07/2016, effettuato con cippato di eucalipto proveniente da Uta (CA) - (Cip10);

Nella Tabella 2 sono riportati i test sperimentali effettuati nel 2016.

Tabella 2. Test sperimentali con biomasse per l’anno 2016

<i>Data</i>	<i>Obiettivo principale</i>	<i>Sperimentazione (ore)</i>
18-20/05/2016	Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea	56
07-10/06/2016	Gassificazione biomasse, cippato di Pino Eucalipto	80
25-29/07/2016	Gassificazione biomasse, cippato di eucalipto	104
	Totale	240

3.2 Combustibili impiegati

Come risulta dalla Tabella 2, i test sperimentali sulla piattaforma pilota sono stati eseguiti con differenti tipologie di biomasse. Tali combustibili sono stati caratterizzati presso i laboratori Sotacarbo con differenti strumentazioni e metodi di analisi.

In particolare, di tali combustibili è stata effettuata l’analisi immediata (mediante termogravimetro), l’analisi elementare (mediante il determinatore CHN/S) e l’analisi calorimetrica per la determinazione del potere calorifico superiore.

La seguente tabella riporta, in sintesi, i risultati delle analisi effettuate sui principali campioni di combustibile analizzati presso i laboratori Sotacarbo secondo le metodiche e mediante gli strumenti di cui al paragrafo 3.3. In particolare, i combustibili impiegati sono i seguenti:

- Cip6: cippato di legno di pino proveniente da Villaspeciosa (Cagliari – Sardegna);
- Cip9: cippato di eucalipto proveniente da Villasor (Cagliari – Sardegna);
- Cip10: cippato di eucalipto proveniente da Uta (Cagliari – Sardegna).

Tabella 3. Caratterizzazione dei combustibili impiegati nei test (2016)

<i>Nome</i>	<i>Cip6</i>	<i>Cip9</i>	<i>Cip10</i>
Classificazione	<i>Pinus Pinea</i>	<i>Eucaliptus</i>	<i>Eucaliptus</i>
Provenienza	<i>Villaspeciosa</i>	<i>Villasor</i>	<i>Uta</i>
Densità a mucchio (kg/m³)			
Densità	246	355	300
Analisi immediata (% in massa)			
Carbonio fisso	21,09	16,11	15,67
Umidità	9,25	25,45	25,76
Volatili	66,92	58,32	57,41
Ceneri	2,75	1,62	1,16
Analisi elementare (% in massa)			
Carbonio totale	50,88	51,20	49,75
Idrogeno	6,71	6,13	6,54
Azoto	0,50	0,29	0,35
Zolfo	0,08	0,00	0,00
Analisi calorimetrica (MJ/kg)			
Pot. Calor. Sup. Secco	19,64	18,70	20,87
Pot. Calor. Inf. Secco	17,97	16,77	18,84
Pot. Calor. Inf. tal quale	16,08	11,87	13,35

3.3 Strumenti e metodi di analisi

Di seguito sono brevemente descritti gli strumenti e le metodologie di analisi impiegate per la suddetta caratterizzazione dei combustibili.

3.3.1 Analisi immediata

L'analisi immediata dei combustibili impiegati è stata effettuata mediante un termogravimetro LECO TGA-701, secondo il metodo rispondente alla normativa ASTM D5142 Moisture Volatile Ash, che prevede l'analisi in sequenza di umidità, volatili e ceneri. In accordo con tale metodo, l'analisi dell'umidità è effettuata portando il campione alla temperatura di 107°C, l'analisi della devolatilizzazione avviene a una temperatura di 950°C mentre l'analisi delle ceneri prevede un successivo raffreddamento a 752°C e il cambio del gas di copertura da azoto a ossigeno.

I risultati finali delle analisi immediate, riportati in Tabella 3, sono la media di un'analisi termogravimetrica effettuata su diversi campioni di ciascun combustibile macinati in tempi diversi nel corso della campagna sperimentale.

3.3.2 Analisi elementare

L'analisi elementare dei vari combustibili impiegati nella campagna sperimentale è stata effettuata mediante un determinatore LECO Truspec CHN/S, secondo una procedura appositamente sviluppata dal fornitore dello strumento, su campioni di circa 100 mg.

In particolare, il modulo CHN opera una combustione rapida e completa, con ossigeno, del campione alla temperatura di 950 °C e il contenuto di carbonio, idrogeno e azoto è determinato mediante un'analisi dei gas. D'altra parte, il modulo di determinazione del contenuto di zolfo opera una combustione, sempre con ossigeno, alla temperatura di 1350°C e analizza il contenuto di SO₂ nel gas mediante un rivelatore a infrarossi.

I risultati finali delle analisi, riportati in Tabella 3, sono la media di un'analisi CHN/S effettuata su diversi campioni di carbone macinati in tempi diversi nel corso dell'intera campagna sperimentale.

3.3.3 Determinazione del potere calorifico

La determinazione del potere calorifico superiore del combustibile è stata effettuata mediante un calorimetro LECO AC-500, secondo il metodo di analisi isoperibolico rispondente alle normative ASTM, ISO, DIN e BSI, su campioni di circa 1 g. Il potere calorifico è determinato misurando la variazione di temperatura di un certo volume d'acqua dovuta alla combustione, in ambiente controllato, del campione di combustibile. Il potere calorifico inferiore del combustibile impiegato è stato calcolato mediante il metodo empirico di Dulong (formula 3.2). In particolare, i poteri calorifici superiore (sul secco) e inferiore (sul secco) possono essere calcolati, rispettivamente, secondo le due seguenti formule (la prima espressa in forma semplificata):

$$PCS_0 [kJ/kg] = 33950 * X_C + 144200 * (X_{H_2} - X_{O_2}/8) + 9400 * X_S \quad (3.1)$$

$$PCI_0 [kJ/kg] = PCS_0 - 9 * X_{H_2} * r \quad (3.2)$$

in cui X_C , X_{H_2} , X_{O_2} , X_S , X_{H_2O} rappresentano rispettivamente le frazioni massiche di carbonio, idrogeno, ossigeno, zolfo e umidità ed r è il calore di condensazione dell'acqua, pari a 2500 kJ/kg.

Nel caso specifico, il potere calorifico superiore è stato, come detto, determinato direttamente mediante una misura calorimetrica, mentre il potere calorifico inferiore è stato determinato mediante la relazione 3.2.

Il potere calorifico inferiore sul tal quale (formula 3.3) è determinato a partire dalla percentuale di umidità presente nel combustibile. L'umidità della biomassa esprime il suo contenuto di acqua e può essere riportata sul tal quale oppure sul secco. Se si indica con m_a la massa d'acqua e con m_s la massa di sostanza secca, il tenore di umidità U sul tal quale è definito come:

$$U = m_a / (m_a + m_s) \text{ (assume valori compresi tra zero e uno)}$$

Il tenore di umidità U_0 (oppure u) sul secco invece è definito come:

$$U_0 = m_a / m_s \text{ (assume valori compresi tra zero e infinito)}$$

L'energia effettivamente utilizzabile dal punto di vista pratico, non è il potere calorifico inferiore sul secco (PCI_0 , calcolato secondo la 3.2) ma il potere calorifico sul tal quale (PCI). Si tiene conto che l'energia chimica relativa alla massa di sostanza tal quale (secco + acqua) è data dall'energia chimica della sostanza secca diminuita del calore di vaporizzazione dell'acqua che non viene recuperato:

$$PCI [kJ/kg] = (1-U) * PCI_0 - U * r = PCI_0 - U * (PCI_0 + r) \quad (3.3)$$

Il potere calorifico inferiore di una biomassa diminuisce linearmente con l'aumento della sua umidità, fino ad annullarsi per valori dell'ordine del 88-90% [1].

4 Procedure operative del processo di gassificazione

Il presente capitolo descrive, in maniera estremamente sintetica e semplificata, le procedure operative impiegate per l'esecuzione dei test sperimentali con l'impianto dimostrativo Sotacarbo. Le procedure operative sono individuabili nelle seguenti fasi principali:

1. verifiche iniziali e avviamento degli ausiliari;
2. *start-up* dell'impianto;
3. fase operativa;
4. *shut-down* dell'impianto.

4.1 Verifiche e avviamento delle apparecchiature ausiliarie

Il funzionamento della sezione di gassificazione dell'impianto dimostrativo Sotacarbo è subordinato alla disponibilità di una serie di apparecchiature, che devono essere attivate e la cui funzionalità dev'essere verificata prima di ciascuna operazione di *start-up* dell'impianto stesso.

In particolare, le apparecchiature ausiliarie vengono avviate e verificate secondo il seguente ordine:

1. compressore dell'aria per la strumentazione;
2. compressore dell'aria di alimentazione del processo di gassificazione;
3. sistema di vaporizzazione del GPL (impiegato per l'avviamento della torcia e per l'alimentazione del generatore di vapore);
4. generatore di vapore;
5. pompe di invio dell'acqua all'impianto;
6. invio portata di acqua di raffreddamento al sistema stirrer;
7. messa in linea dell'azoto di inertizzazione;
8. verifica dei livelli dei tank dello scrubber ed eventuale reintegro dell'acqua affinché entrambi raggiungano il livello di 1700 mm;
9. verifica del riempimento della camicia del water jacket e del controllo del livello dello steam drum (circa 220 mm);
10. verifica del posizionamento dello stirrer ad un'altezza massima all'interno del gassificatore di altezza massima pari a 2400 mm.

4.2 Fase di start-up

Una volta avviate le apparecchiature ausiliarie, si procede allo *start-up* del gassificatore, secondo le fasi di seguito descritte.

4.2.1 Caricamento iniziale del reattore

Il caricamento iniziale del gassificatore viene effettuato a freddo con carbone vegetale e assumendo la quota della griglia periferica come zero delle altezze, nel particolare:

Carbone vegetale	550 mm	circa 1000 litri	circa 320 kg;
------------------	--------	------------------	---------------

Il carbone vegetale funge da letto di accensione in sostituzione dell'argilla e del combustibile per la sola fase di accensione, successivamente viene caricato il combustibile previsto dal test sperimentale che andrà a sostituire nel tempo la carica di accensione fatta con carbone vegetale. Nelle vicinanze degli irradiatorvi viene inserita della carta al fine di facilitare la reazione di combustione in fase di accensione. A valle di questo primo caricamento si effettua un test di rotazione della griglia al fine di far posizionare correttamente il materiale, ed un test di rotazione/traslazione dello stirrer per verificare l'effettivo livello del gassificatore. La risposta dell'impianto all'accensione mediante carbone vegetale è stato ottimale, non si sono verificate problematiche relative alla gestione delle temperature sul reattore e al funzionamento della griglia di scarico ceneri.

4.2.2 Accensione del letto combustibile

L'accensione del reattore di gassificazione avviene per mezzo di sei resistenze elettriche (irradiatori di accensione) in materiale ceramico poste a contatto con il letto del gassificatore in prossimità dello strato carbone vegetale.

Gli irradiatori vengono alimentati elettricamente, portati alla temperatura di 750-800 °C e mantenuti in tale condizione per dieci minuti circa, al fine di consentire il riscaldamento delle zone limitrofe del letto combustibile. Dopo tale tempo viene inviata, una portata d'aria pari a circa 50-60 kg/h al fine di dare avvio alla combustione. Una volta accertata l'accensione del letto sulla base di: verifiche visive sull'uscita di fumi di combustione dal vent e un aumento della temperatura fino a circa 100 °C, l'alimentazione elettrica delle lampade viene interrotta. Successivamente viene chiuso il vent, si accendono le pompe che effettuano il lavaggio nello scrubber ed il syngas viene inviato in torcia. Contestualmente viene inviata una portata di aria sottogriglia di circa 500-600 kg/h e viene interrotto l'invio dell'aria attraverso gli irradiatori di accensione.

4.2.3 Analisi Syngas

La misura della composizione del syngas prodotto è indispensabile per la corretta gestione dell'impianto e per la valutazione delle prestazioni d'impianto al variare dei parametri di processo. Sono stati effettuati dei campionamenti di syngas in automatico dalle apparecchiature di analisi tramite delle prese di campionamento poste nelle seguenti zone dell'impianto:

- in uscita dal gassificatore (DJ001P);
- in uscita dallo scrubber (DJ002P);
- in uscita dalla torcia (DJ003P).

4.3 Fase operativa

La fase operativa dell'impianto riguarda tutte quelle operazioni e verifiche necessarie per portare il gassificatore Dimostrativo a regime e mantenerlo in tale condizione. Un ruolo chiave è ricoperto dal sistema di analisi del syngas e dal profilo termico registrato sulle pareti del gassificatore; sulla base di tali parametri è possibile gestire il gassificatore ed effettuare le azioni necessarie ad una corretta gestione delle apparecchiature. Riportiamo di seguito le procedure messe a punto durante i test sperimentali al fine di portare il gassificatore in condizioni di regime:

- regolazione aria processo: aumentare per step l'aria sottogriglia dal valore di accensione 50 kg/h (aria agli irradiatori) fino al valore previsto per i test sperimentali all'incirca 450-550 kg/h; l'aumento dell'aria sottogriglia deve essere effettuato sulla base: del consumo di ossigeno (le analisi del syngas devono mostrare valori sempre inferiori all'1%) e delle temperature delle pareti (non devono aumentare rapidamente e non devono superare i 1000-1050 °C);
- livello del riempimento nel gassificatore: caricare il combustibile con il sistema Redler fino a portare l'altezza del riempimento nel gassificatore a circa 2200-2400 mm (anche nell'effettuare tale operazione è fondamentale avvalersi delle analisi del syngas e dei profili di temperatura);
- movimentazione letto di gassificazione: ad ogni caricamento è necessario far ruotare e traslare lo stirrer fino a raggiungere il livello del combustibile nel gassificatore (il raggiungimento del combustibile è valutato attraverso la misurazione dello sforzo con una cella di carico) al fine di compattare il combustibile e valutare il livello del riempimento; inoltre al fine di omogenizzare la distribuzione del letto di combustibile del gassificatore lo stirrer viene lasciato in rotazione alla quota dove si rileva il materiale (2200-2400 mm quota massima);
- carico combustibile e scarico ceneri: attraverso il sistema Redler è stato possibile caricare il gassificatore con un ritmo minimo di 300 kg/h fino ad un massimo di 450 kg/h, al fine di valutare le potenzialità dell'impianto. La potenzialità globale di scarico della griglia è di circa 120 L/h (anche se dipende dalla granulometria e dalla tipologia del materiale scaricato);
- circuito di raffreddamento: quando la temperatura all'uscita dello steam drum aumenta rispetto a quella iniziale e allo steam drum arriva una portata di vapore (anche minima) dalla camicia di

- raffreddamento bisogna avviare le ventole del condensatore ed inviare il condensato alla camicia di raffreddamento. Inoltre è necessario verificare il livello dello steam drum; se esso scende sotto i 200 mm è necessario reintegrare con acqua dal circuito principale fino al valore soglia di 217-230 mm;
- invio vapore: quando la temperatura monitorata sulle pareti del gassificatore si mantiene in maniera costante sopra i 800-900 °C è necessario inviare vapore; la portata deve essere inviata da un valore minimo di 30-50 kg/h a salire per step se il controllo delle temperature lo richiede;
 - scrubber: il sistema scrubber ha il compito di gestire il lavaggio e la pulizia del syngas, le pompe di lavaggio devono essere avviate prima dell'invio del syngas in torcia. Al fine di mantenere efficiente lo scrubber è necessario: scambiare i filtri posti prima della pompa di lavaggio quando la pompa in funzione inizia a perdere portata, scaricare per 1/2 min ogni ora il tank dove avviene il lavaggio e per 2 min ogni 2 ore quello da cui aspirano le pompe di ricircolo, reintegrare lo scrubber con acqua fresca quando il livello di uno dei due tank scende sotto i 1600 mm;
 - torcia: verificare che la temperatura della camera di combustione non superi gli 900 °C, pulire la valvola rompifiamma in caso di rottura della guardia idraulica dello scrubber (la pressione dovrebbe superare i 50 mbar).

Attraverso le operazioni sopra descritte l'impianto si trova in condizioni di regime; si riassume di seguito i principali parametri di processo impostati:

- aria sottogriglia: circa 650 -800 kg/h;
- vapore: all'occorrenza con portata da verificare;
- consumo di combustibile (cippato): da 300 a 600 kg/h;
- reintegro acqua scrubber: livelli costanti a 1600 mm;
- Reintegro Steam Drum: livello costante a 217 mm;

4.4 Fase di shut-down

Al termine della fase sperimentale vera e propria, si procede allo spegnimento (shut-down) del processo secondo quanto di seguito descritto:

- interruzione del caricamento;
- interruzione dell'invio di vapore;
- parzializzazione dell'invio dell'aria sottogriglia;
- scarico completo del materiale presente nel gassificatore;
- apertura degli scarichi del gas in atmosfera e spegnimento della torcia;
- spegnimento del generatore di vapore e interruzione dei campionamenti e delle analisi del gas;
- disattivazione delle pompe di ricircolo dello scrubber e svuotamento del serbatoio di accumulo dell'acqua di lavaggio;
- disattivazione delle apparecchiature ausiliarie ancora in funzione e interruzione dell'alimentazione elettrica.

5 Test sperimentali di gassificazione

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto sono stati effettuati tre test di gassificazione con biomassa (cippato di legno) al 100%.

5.1 Principali modifiche sull'impianto Dimostrativo

Durante i due test di gassificazione un importante obiettivo è rappresentato dalla verifica di alcune parti di impianto in fase di ottimizzazione e modifica su test sperimentali di lunga durata; di seguito riportiamo le principali sezioni di impianto oggetto di modifiche:

- **sistema di caricamento del combustibile**: il sistema di caricamento del combustibile si è dimostrato eccessivamente lento per la gassificazione di cippato di legno (1000 kg/h con 4 big bag per un totale di 4000 dm³); tale problematica è stata risolta progettando e realizzando un sistema di caricamento automatico (sistema a catena Redler) nella precedente annualità. Nell'annualità in corso il sistema di caricamento è stato migliorato e messo a punto. Durante i test di gassificazione si sono verificate problematiche di blocco del sistema dovuto a impaccamenti del cippato nella tramoggia inferiore del Redler, per tali motivazioni è stato progettato e realizzato un sistema di dosaggio del combustibile tramite una coclea che ha risolto in maniera definitiva la problematica. A causa dei blocchi rilevati sulle tubazioni di carico verificatesi durante le campagne sperimentali delle precedenti annualità è stato necessario, durante questa annualità, realizzare due sistemi rompiponte.
- **Progettazione di un nuovo sistema di clean-up del syngas**: a causa dell'elevata presenza di tar e polveri presenti nel syngas, il sistema attuale, costituito unicamente da uno scrubber, è stato ritenuto sottodimensionato. Per tale motivazione è stato progettato un nuovo sistema di clean-up della miscela gassosa che permetta di inviare il syngas ad un eventuale motore a combustione interna. È riportata di seguito una breve descrizione dell'apparecchiatura: Il syngas in uscita dal reattore di gassificazione entra nel ciclone dove, grazie all'effetto della velocità impressa al gas, avviene un primo abbattimento delle particelle solide ad alta temperatura. Questo abbattimento consente di trattenere le particelle più grossolane e di omogeneizzare la distribuzione dei diametri di particelle a valle dell'apparecchiatura. Il particolato, che viene così separato dalla corrente gassosa, è raccolto all'interno del contenitore posto al di sotto del ciclone, dimensionato opportunamente per garantire il funzionamento in continuo dell'impianto. La corrente gassosa in uscita dal ciclone entra nel venturi-scrubber dove, grazie al passaggio attraverso la gola dell'apparecchiatura, si ha un'intima miscelazione tra il gas caldo e l'acqua di ricircolo. In questa apparecchiatura si hanno tre effetti in parallelo: il gas viene raffreddato alla temperatura di condizionamento finale; le particelle solide vengono abbattute per effetto della spinta delle goccioline d'acqua spruzzate all'interno del venturi scrubber; i composti organici vengono condensati al fondo dell'apparecchiatura, abbattendo il contenuto di "TAR" fino al punto di rugiada in corrispondenza con l'effettiva temperatura di funzionamento. Questa apparecchiatura è installata al di sopra di una vasca di separazione, all'interno della quale avviene la stratificazione della fase più pesante dei TAR, la sedimentazione parziale del particolato abbattuto nel venturi scrubber e la conseguente chiarificazione dell'acqua di ricircolo al sistema di abbattimento, ovvero il venturi scrubber. Il liquido attraversa lentamente la vasca nella quale, grazie ad opportune lavorazioni interne, si ottiene la chiarificazione dell'acqua di ricircolo. L'acqua così ripulita viene prelevata dalla pompa di ricircolo e ulteriori sedimenti vengono separati tramite un filtro autopulente. L'acqua filtrata attraversa l'aeroraffreddatore, dove dissipa nell'ambiente il calore in eccesso, per poi essere inviata di nuovo al venturi scrubber. L'accumulo di TAR sul fondo è evitato azionando la pompa monovite installata al di sotto della vasca di separazione. Il gas attraversa il volume libero della vasca ad una velocità tale da evitare il trascinarsi delle goccioline d'acqua ed entra nello scrubber, dove una piccola portata d'acqua viene spruzzata per completare l'operazione di abbattimento delle particelle più piccole. Successivamente il gas passa attraverso un demister che grazie alla sua struttura di piccoli canali promuove la coalescenza dell'umidità ancora presente nel gas, permettendo di restituire il Syngas

purificato alla soffiante in condizioni sature. Infine un chiller permette di separare l'acqua in eccesso e alla soffiante di vincere le perdite di carico dell'Impianto e di alimentare il Syngas purificato al MCI.

- **sistema di scarico ceneri:** sono state apportate diverse modifiche rispetto alla precedente annualità per ottimizzare il funzionamento del sistema:
 - modifica del sistema di ingrassaggio e acquisto di grasso lubrificante semisintetico al bisolfuro di molibdeno, idrorepellente e resistente alle condizioni di esercizio considerate (punto di gocciolamento: 275 °C);
 - modifica della tenuta di supporto dei cuscinetti del pignone e costruzione di un cappello di protezione per le tenute;
 - sabbiatura del cono di scarico ceneri e verniciatura con prodotti per alta temperatura;
 - riprogettazione, costruzione e montaggio di nuovi dischi di protezione del sistema di movimentazione della griglia in AISI 310, (sp. 16), raschiatore e di una nuova serie di viti in AISI 321.
- **Filtro motore:** nell'ultimo test sperimentale del 25-29/07/2016 è stato testato il motore a combustione interna da 24 kWe presente sull'impianto Pilota, tramite una piping line che collega i due impianti Dimostrativo con un parte del syngas proveniente dall'impianto dimostrativo. Per poter utilizzare il motore è stato realizzato e posizionato sulla linea di pulizia del syngas un filtro atto a bloccare polveri, tar e umidità residue (non catturate dai precedenti sistemi di pulizia).

5.2 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 18-20/05/2016

L'analisi del processo di gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 18-20/05/16 (56 ore). Nel corso della prova sperimentale, sono stati gassificati mediamente, considerando unicamente i periodi in cui il gassificatore si trovava in condizioni di regime, 340 kg/h di combustibile (Cip6), con potere calorifico inferiore sul tal quale pari a 16,1 MJ/kg. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 680 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri. La Figura 11 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova, circa ogni 8 ore a partire dal momento in cui il gassificatore è entrato a "regime". I dati di temperatura sono stati prelevati dalla fila Sud Ovest dove si è sviluppata la reazione di gassificazione in modo preponderante.

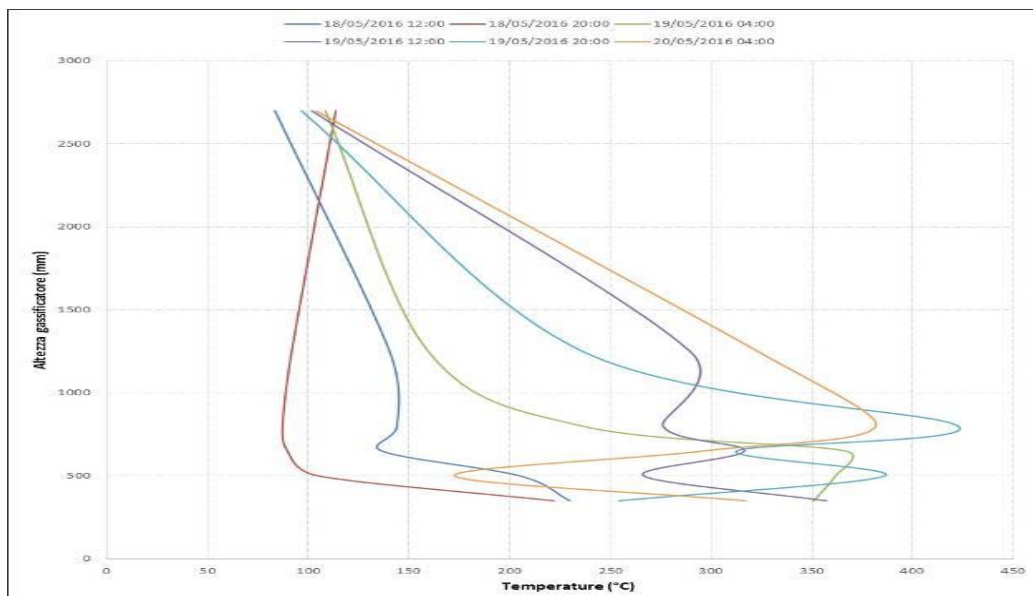


Figura 11. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 18-20/05/2016 (Fila Sud-Ovest)

Le Figura 12 e la Figura 13, mostrano l'andamento nel tempo delle concentrazioni, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H₂, CO e CO₂ e CH₄ sulle prese di campionamento DJ001P e DJ002P.

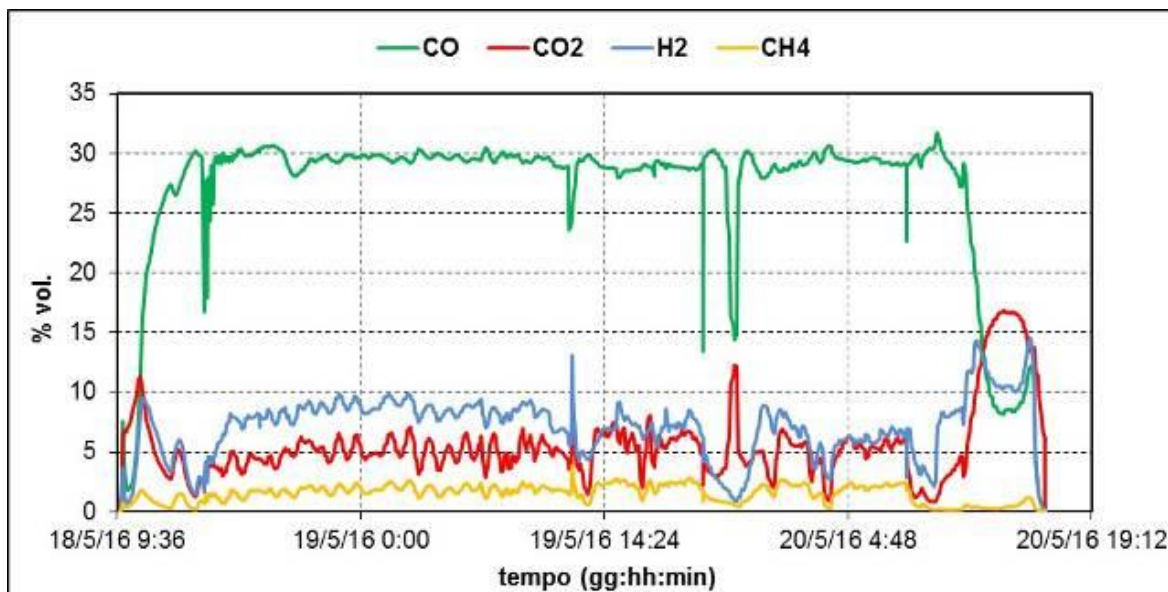


Figura 12. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 18-20/05/2016

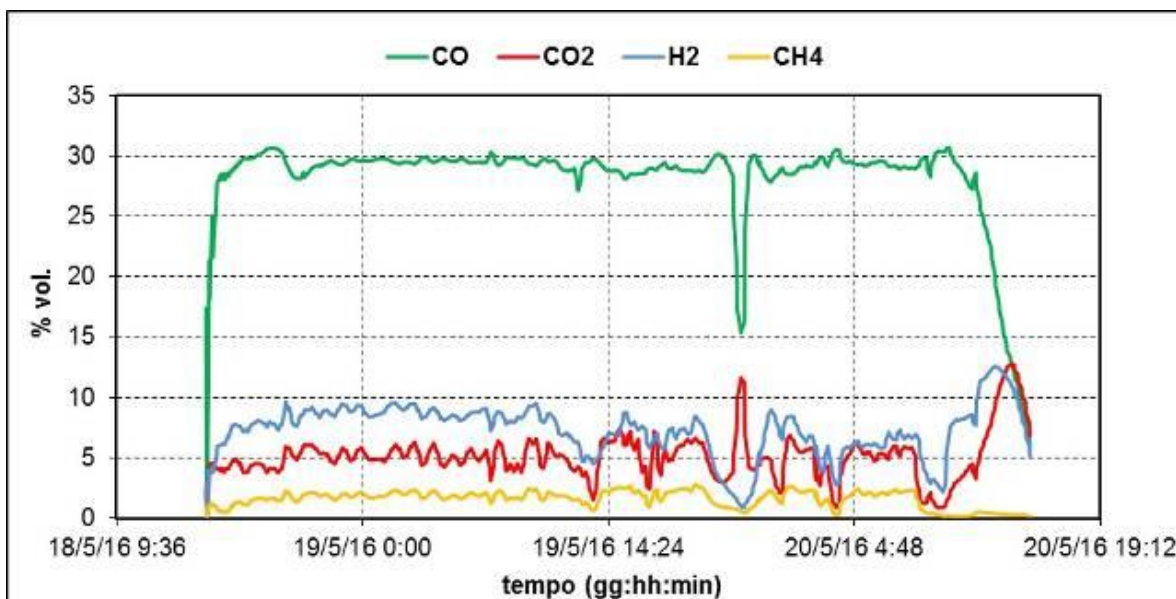


Figura 13. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 18-20/05/2016

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 7,0%, quella di CO pari a circa il 29,0%, quella di CH₄ pari al 1,7% e quella di CO₂ pari a circa 4,8% per un rapporto CO/CO₂ pari a 6,04 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 0,24 kg_{H2}/kg_{CO}. Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione nulla di O₂. Il syngas oltre che essere stato misurato qualitativamente è stato misurato anche quantitativamente attraverso un misuratore di portata di syngas posto all'uscita dello scrubber. Nel primo test sperimentale il misuratore di portata syngas ha restituito un valore medio di circa 730 m³/h. Di seguito riportiamo nella Tabella 4 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 4. Dati processo di gassificazione del 18-20/05/2016

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	340
Aria (kg/h)	680
Vapore (kg/h)	-
<i>Composizione syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,2914
CO ₂	0,0484
H ₂	0,0712
CH ₄	0,0170
H ₂ S	0,0091
<i>Proprietà del syngas (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (m ³ /h)	720
LHV (MJ/kg)	4,27

Le ceneri prodotte hanno avuto un bassissimo contenuto di carbonio come riportato in Tabella 5; il processo di gassificazione ha quindi dato buoni risultati

Tabella 5. Analisi di laboratorio relative agli scarichi: SC2 - Scarico delle ore 15:30 del 18/05/2016, SC3 - Scarico delle ore 21:30 del 18/05/2016, SC5 - Scarico delle ore 10:10 del 19/05/2016, SC7 - Scarico delle ore 22:40 del 19/05/2016, SC9 - Scarico delle ore 08:30 del 20/05/2016

Sample Name	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed Carbon %
SC2	0,06	11,16	74,08	14,70
SC3	0,05	14,47	86,26	0,00
SC5	0,62	9,69	91,11	0,00
SC7	0,09	11,95	81,53	6,44
SC9	0,03	14,18	75,91	9,90

5.3 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 07-10/06/2016

Nel corso della prova sperimentale del 07-10/06/2016 (80 ore), sono stati gassificati mediamente 350 kg/h di combustibile (Cip9), con potere calorifico inferiore sul tal quale pari 11,9 MJ/kg.

La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 690 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri. La Figura 14 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova, circa ogni 8 ore a partire da quando il gassificatore è entrato a "regime". I dati di temperatura sono stati prelevati dalla fila Nord Ovest dove si è sviluppata la reazione di gassificazione in modo preponderante.

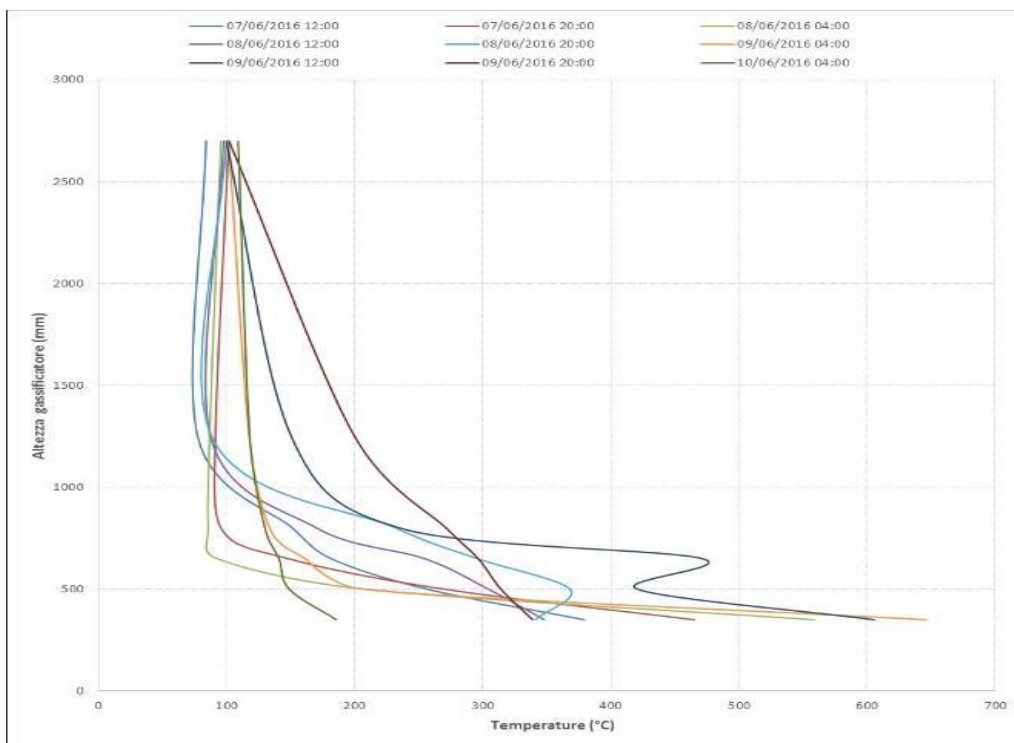


Figura 14. Profilo di temperatura all'interno del gasificatore durante le prove di gassificazione del 07-10/06/2016 (Fila Nord-Ovest)

La Figura 15 e la Figura 16 mostrano l'andamento nel tempo delle concentrazioni medie, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H₂, CO e CO₂ e CH₄ sulle prese di campionamento DJ001P e DJ002P.

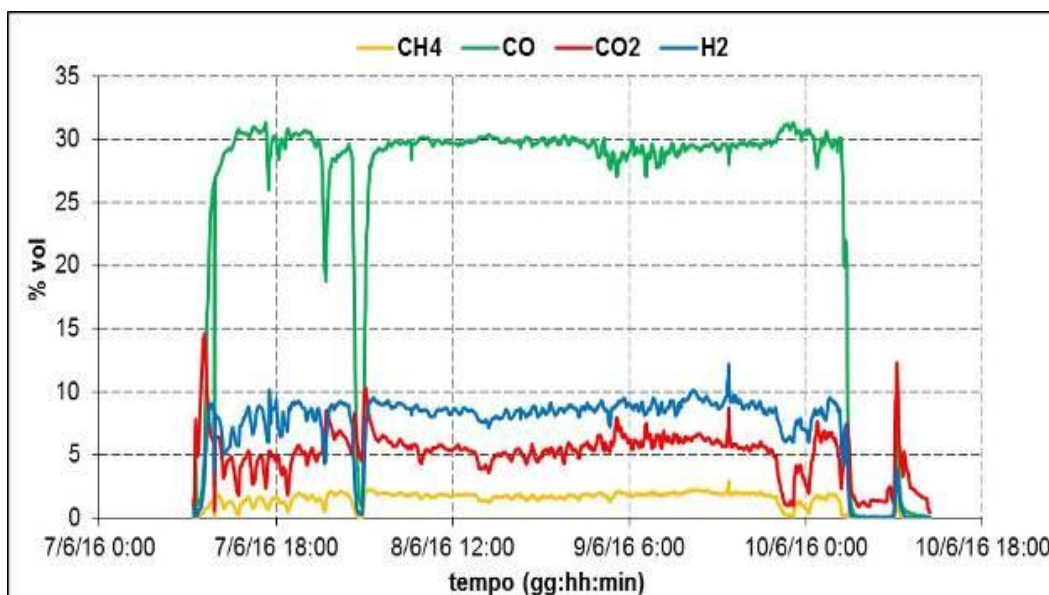


Figura 15. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 07-10/06/2016

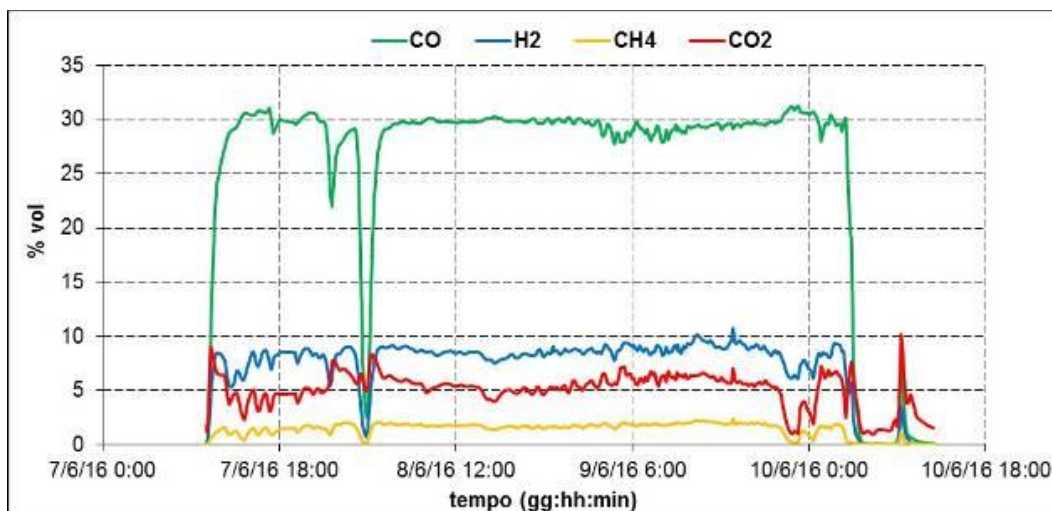


Figura 16. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 07-10/06/2016

Dal momento in cui il sistema raggiunge le condizioni di funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 8,3%, quella di CO pari a circa il 29,0%, quella di CH₄ pari al 1,6% e quella di CO₂ pari a circa 5,4% per un rapporto CO/CO₂ pari a 5,4 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 0,29 kg_{H2}/kg_{CO}. Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione nulla di O₂. Il syngas oltre che essere stato misurato qualitativamente è stato misurato anche quantitativamente, attraverso un misuratore di portata di syngas posto all'uscita dello scrubber. Il misuratore (FT001P) ha restituito il valore medio di circa 810 m³/h (con una portata di aria intorno a 690 kg/h ed una portata di combustibile in ingresso di 450 kg/h). Di seguito riportiamo nella Tabella 6 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 6. Dati processo di gassificazione del 07-10/06/2016

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	450
Aria (kg/h)	690
Vapore (kg/h)	-
<i>Composizione syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,2903
CO ₂	0,0536
H ₂	0,0826
CH ₄	0,0162
H ₂ S	0,0089
<i>Proprietà del syngas (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (m ³ /h)	810
LHV (MJ/kg)	4,37

Tabella 7. Analisi di laboratorio relative agli scarichi: SC2 - Scarico delle ore 20:00 del 07/06/2016, SC4 - Scarico delle ore 08:00 del 08/06/2016, SC6 - Scarico delle ore 19:00 del 08/06/2016, SC8 - Scarico delle ore 15:00 del 09/06/2016, SC10 - Scarico delle ore 02:00 del 10/06/2016

Sample Name	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed Carbon %
SC2	0,01	19,55	81,66	0,00
SC4	0,01	6,59	93,42	0,04
SC6	0,03	4,33	95,38	0,27
SC8	0,15	5,63	94,18	0,06
SC10	0,03	5,24	94,45	0,16

L'analisi del carbonio fisso contenuto negli scarichi del gassificatore evidenzia un ottimo andamento del processo di gassificazione, come si evince dalla Tabella 7.

5.4 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di co-gassificazione del 25-29/07/2016

Nel corso della prova sperimentale del 25-29/07/2016 (104 ore), sono stati gassificati mediamente 450 kg/h di combustibile (Cip10), con potere calorifico inferiore sul tal quale pari 13,4 MJ/kg. Durante questo test sperimentale è stato acceso il motore a combustione interna dell'impianto Pilota per circa 15 minuti con il syngas prodotto dall'impianto dimostrativo, non è stato possibile tenere acceso il motore per un tempo maggiore a causa dell'elevata presenza di tar, polveri ed umidità nel syngas.

La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 670 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri. La Figura 17/ Figura 14 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova, circa ogni 8 ore a partire da quando il gassificatore è entrato a "regime". I dati di temperatura sono stati prelevati dalla fila Sud dove si è sviluppata la reazione di gassificazione in modo preponderante.

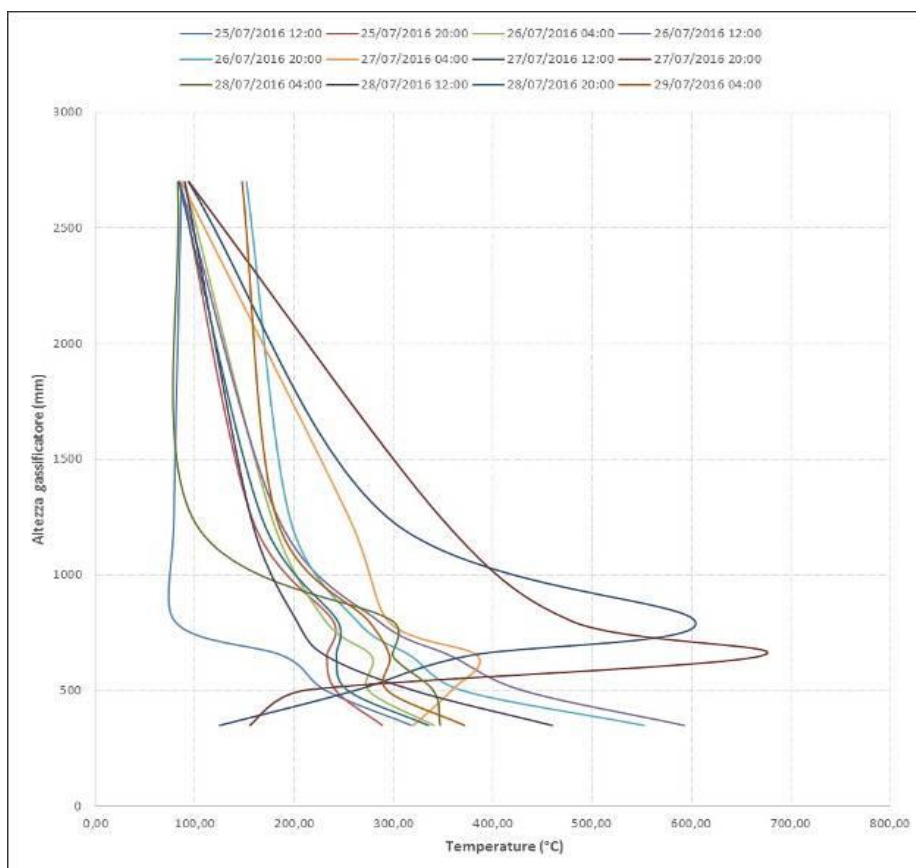


Figura 17. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 25-29/07/2016 (Fila Sud)

La Figura 18 e la Figura 19 mostrano l'andamento nel tempo delle concentrazioni medie, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H₂, CO e CO₂ e CH₄ sulle prese di campionamento DJ001P e DJ002P.

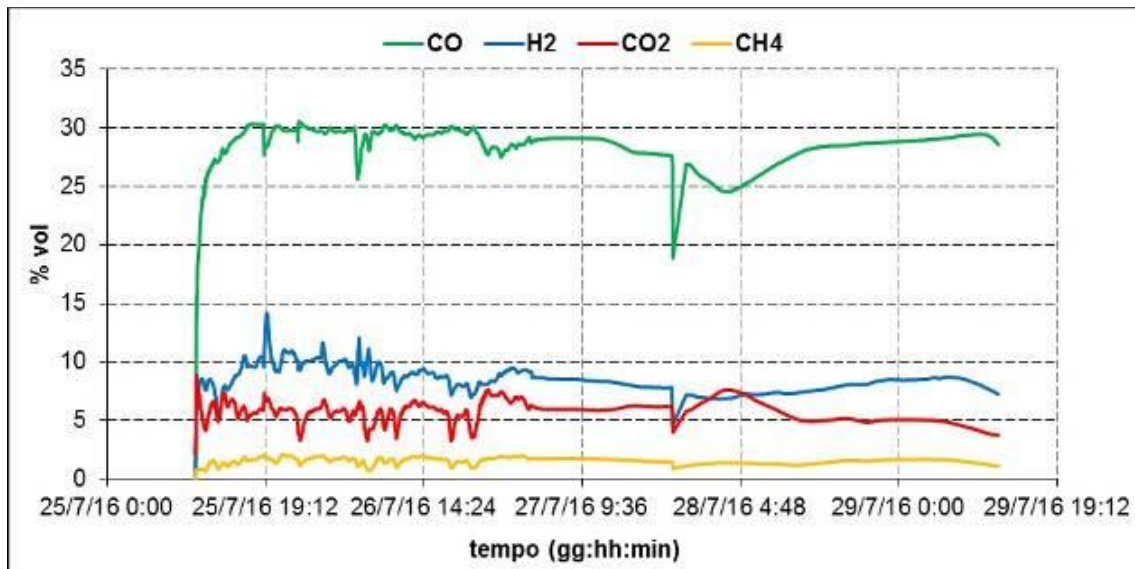


Figura 18. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 25-29/07/2016

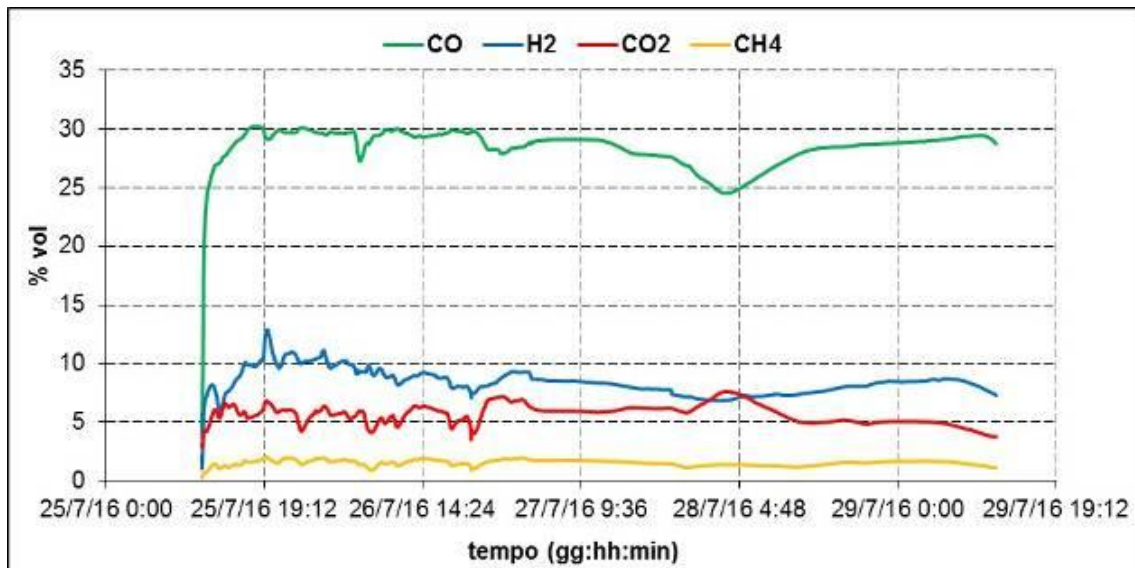


Figura 19. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 25-29/07/2016

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 8,5%, quella di CO pari a circa il 28,5%, quella di CH₄ pari al 1,6% e quella di CO₂ pari a circa 5,8% per un rapporto CO/CO₂ pari a 4,9 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 0,30 kg_{H2}/kg_{CO}. Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione nulla di O₂. Il syngas oltre che essere stato misurato qualitativamente è stato misurato anche quantitativamente attraverso un misuratore di portata di syngas posto all'uscita dello scrubber. Durante il test sperimentale il misuratore di portata syngas ha restituito un valore medio di circa 750 m³/h. Di seguito riportiamo nella Tabella 8 dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 8. Dati processo di gassificazione del 25-29/07/2016

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	350
Aria (kg/h)	670
Vapore (kg/h)	-
<i>Composizione syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,2848
CO₂	0,0579
H₂	0,0848
CH₄	0,0158
H₂S	0,0059
<i>Proprietà del syngas (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (m³/h)	750
LHV (MJ/kg)	4,30

Tabella 9. Analisi di laboratorio relative agli scarichi: SC3 – Scarico delle ore 03:30 del 26/07, SC5 – Scarico delle ore 16:10 del 26/07, SC7 – Scarico delle ore 03:50 del 27/07, SC9 – Scarico delle ore 15:30 del 27/07, SC11 – Scarico delle ore 03:30 del 28/07, Scarico delle ore 15:10 del 28/07, SC15 – Scarico delle ore 03:10 del 29/07

Sample Name	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed Carbon %
SC3 26.07.16 A	0,02	12,18	88,82	0,00
SC5 26.07.16 A	0,00	5,18	94,61	0,21
SC7 27.07.16 A	0,00	4,79	94,85	0,37
SC9 27.07.16 A	0,04	5,32	94,93	0,00
SC11 28.07.16 A	0,10	10,16	90,92	0,00
SC13 28.07.16 A	0,09	9,28	92,01	0,00
SC15 29.07.16 A	0,77	12,45	86,38	0,41

La bassa percentuale di carbonio fisso presente negli scarichi (vedi Tabella 9) è indice della buona qualità del processo di gassificazione tenuto durante il test sperimentale.

Durante la sperimentazione, nel giorno 27/07/2016, è stata utilizzata la sezione di generazione elettrica dell'impianto pilota Sotacarbo, collegata mediante piping all'alimentazione syngas fornita dall'impianto dimostrativo Sotacarbo. Il test ha avuto una durata di circa 15 minuti e ha fornito importanti indicazioni sulla qualità del gas prodotto dal gassificatore dimostrativo, risultata essere ottimale ai fini dell'alimentazione del motore a combustione interna; la potenza prodotta durante la sperimentazione è stata pari a 9 kW.

Si è inoltre verificato che il sistema di clean-up attualmente presente non è in grado di effettuare una pulizia sul syngas (su TAR, polveri e umidità) in maniera tale da alimentare un motore a combustione interna (MCI); infatti, il filtro motore realizzato in aspirazione al motore è risultato particolarmente sporco alla fine dei 15 minuti di sperimentazione.

In Figura 20 si riporta l'andamento della pressione e della portata di syngas in alimentazione al motore a combustione interna.

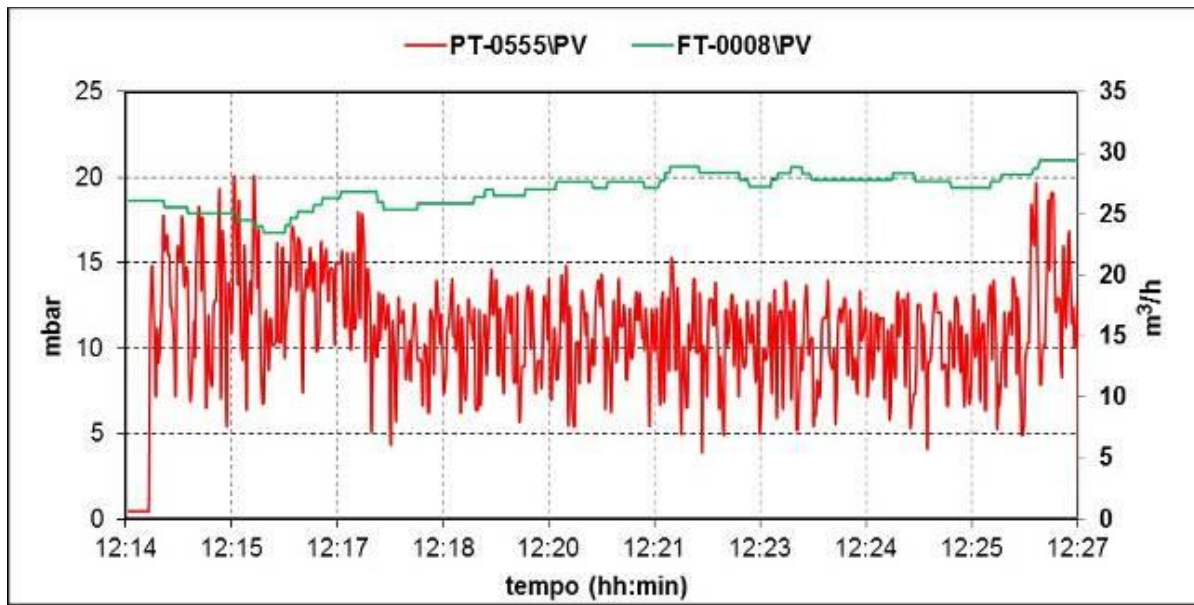


Figura 20. Andamento della pressione e della portata del syngas in alimentazione al motore

6 Campionamento TAR

Nel syngas prodotto dalla gassificazione delle biomasse sono presenti alcuni sottoprodotti indesiderati, quali polveri, catrami e contaminanti in quantità più o meno rilevanti.

Tali sottoprodotti, se non eliminati dal syngas grezzo, possono interferire sul corretto funzionamento dell'impianto (tubazioni, valvole, filtri, etc.) e su quello di eventuali utilizzatori finali per la produzione (motori a combustione interna, bruciatori, turbine, reattori catalitici, etc.); possono inoltre avere effetti negativi sull'ambiente qualora fossero rilasciati in atmosfera. Le quantità dei diversi componenti inquinanti presenti nel syngas dipendono dalla tipologia di gassificatore, dalle condizioni di gassificazione e dal tipo di carica impiegata. I due inquinanti maggiormente presenti in concentrazione nel syngas sono:

- Il particolato (grossolano o fine),
- il catrame (TAR)

Entrambi possono essere causa di erosione, corrosione e occlusioni di alcune parti dell'impianto disposte a valle del reattore di gassificazione, ma possono anche essere causa di inquinamento ambientale, in seguito all'emissione di sostanze nocive e contaminazione di eventuali sorbenti e/o catalizzatori. Altri contaminanti nocivi presenti in minor misura nel syngas grezzo possono essere:

- Composti alogenati a base di cloro e fluoro,
- Composti dello zolfo e dell'azoto,
- Metalli pesanti.

È dunque fondamentale, per il corretto funzionamento degli impianti, determinare la composizione del syngas con particolare riferimento alla concentrazione e alla natura dei contaminanti principali. Nello specifico, in questo lavoro, si analizza il sistema di campionamento dei TAR realizzato da Sotacarbo per il suo impianto Dimostrativo.

In accordo con la definizione dell'ECN (Energy research Centre of the Netherlands), con il termine TAR vengono compresi tutti i composti organici aventi un peso molecolare superiore a quello del benzene (78 g/mole). L'ECN utilizza inoltre un sistema di sei classi per raggruppare i diversi composti presenti nel TAR, come riportato nella Tabella 10:

Tabella 10. Tipologie di TAR secondo le definizioni dell'ECN

Class	Type	Examples
1	GC undetectable tars.	biomass fragments, heaviest tars (pitch)
2	Heterocyclic compounds. These are components that generally exhibit high water solubility.	phenol, cresol, quinoline, pyridine
3	Aromatic components. Light hydrocarbons, which are important from the point view of tar reaction pathways, but not in particular towards condensation and solubility.	toluene, xylenes, ethylbenzene (excluding benzene)
4	Light polyaromatic hydrocarbons (2-3 rings PAHs). These components condense at relatively high concentrations and intermediate temperatures.	naphthalene, indene, biphenyl, anthracene
5	Heavy polyaromatic hydrocarbons (≥ 4 -rings PAHs). These components condense at relatively high temperature at low concentrations.	fluoranthene, pyrene, crysene
6	GC detectable, not identified compounds.	unknowns

Una caratteristica fondamentale dei TAR è il dew point (punto di rugiada). Il punto di rugiada identifica quella temperatura alla quale condensa la prima molecola di un composto facente parte dei TAR; il dew point è quindi quella temperatura alla quale la pressione parziale dei TAR è pari al valore di saturazione. È importante ricordare che la cinetica della condensazione può essere lenta e potrebbe causare una sovrasaturazione del vapore. Il dew point dipende da diversi fattori fra i quali: il peso molecolare dei TAR e la concentrazione dei vari componenti.

Il TAR viene prodotto dalla gassificazione di biomasse e altri combustibili come, ad esempio, il carbone e si ritrova in fase gassosa nel syngas. Col raffreddamento del gas tali composti vengono condensati e si ritrovano in fase liquida: per questo motivo vengono rimossi a valle del gassificatore nello scrubber assieme alle ceneri e al particolato. È perciò necessario conoscere la concentrazione dei composti classificabili come TAR presenti nel syngas prodotto nel gassificatore e valutare del lavaggio dei sistemi di depurazione a valle di tale sezione. Si riporta in Figura 21 la generica composizione dei TAR prodotti dalla gassificazione di biomassa.

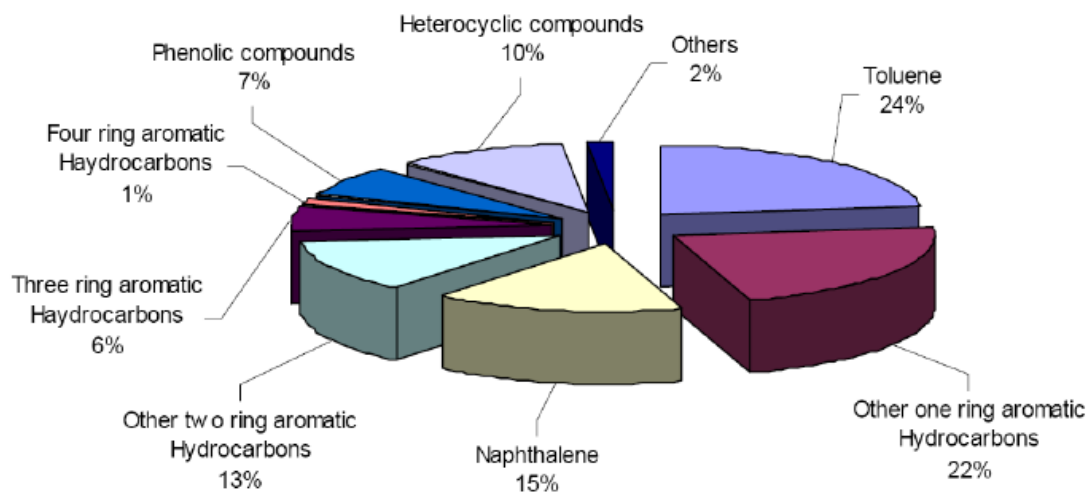
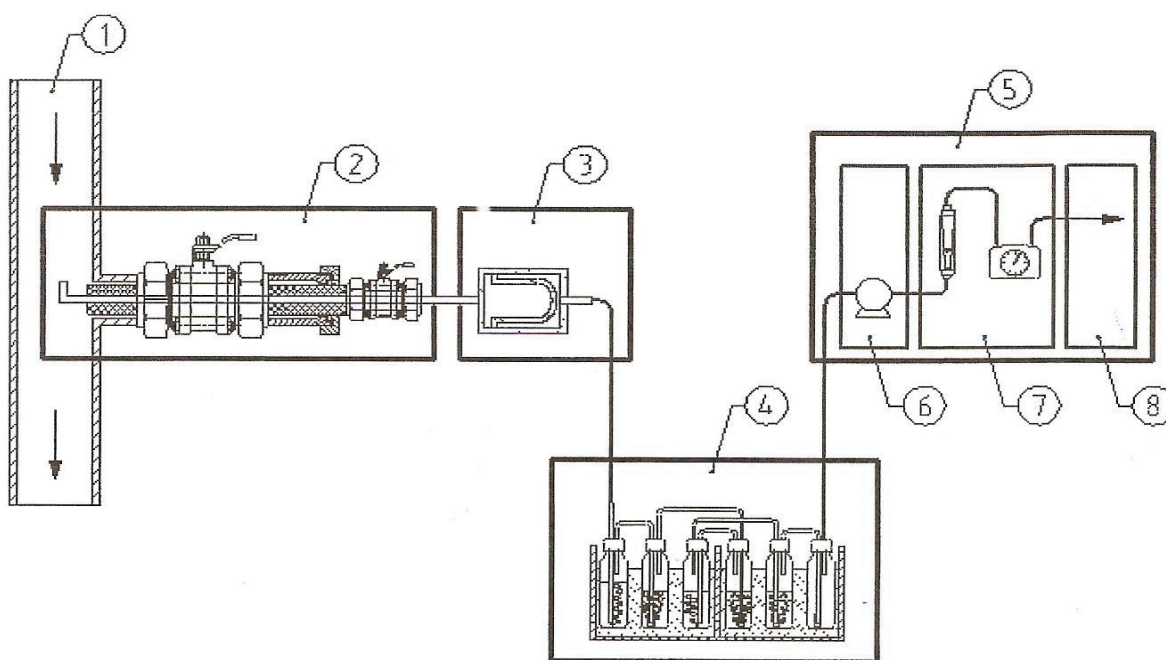


Figura 21. Generica composizione del TAR ottenuta con alimentazione a biomassa [2]

La quantità e composizione dei TAR cambiano molto sia in funzione del tipo di biomassa alimentata, sia del processo di gassificazione in esame. L'università di Cagliari ha realizzato nel 2015, in collaborazione con ENEA, un lavoro specifico dedicato alla rilevazione del TAR prodotto dall'impianto Dimostrativo alimentato con carbone e biomassa. Il lavoro [3] fornisce indicazioni sulla quantità e sulla identificazione dei composti presenti nel TAR prodotto con determinate condizioni operative e di alimentazione dell'impianto Dimostrativo Sotacarbo.

6.1 Sistema di campionamento TAR utilizzato

Il sistema di campionamento generalmente adottato per la cattura dei TAR è schematizzato in Figura 22 ed è costituito da quattro differenti moduli. Nel primo modulo avviene un pre-condizionamento del gas che viene raffreddato e ridotto di pressione, grazie ad un sistema di valvole, ugelli e alla linea di campionamento vera e propria. Tale sezione è collegata ad un secondo modulo costituito da un filtro riscaldato che permette la raccolta e separazione delle particelle solide (polveri e/o particolato) presenti nel gas campionato.



Key

- 1 Gasflow
- 2 Module 1
- 3 Module 2
- 4 Module 3
- 5 Module 4
- 6 Sub-module 4.1
- 7 Sub-module 4.2
- 8 Sub-module 4.3

Figura 22. Schema semplificato del sistema di campionamento dei TAR

Il sistema di campionamento del TAR è stato testato in occasione della prova sperimentale del 25-29 luglio 2016 con alimentazione a cippato di eucaliptus.

In occasione del suddetto test sperimentale è stato utilizzato un sistema di campionamento caratterizzato da diverse sezioni. La prima è costituita da una sonda termostata flangiata all'interno della tubazione dalla quale fluisce il syngas da campionare (Figura 23). La sonda riscaldata, provvista di un apposito filtro in quarzo, è poi collegata ad una batteria di tre condensatori riempiti con alcool iso-propilico e immersi in un bagno termostato riempito con glicol etilenico e mantenuto alla temperatura di circa 2-3 °C.

All'interno dei condensatori, grazie al gorgogliamento del gas campionato, avviene, per condensazione e per gravità, la cattura del TAR e del particolato che restano così separati dal flusso gassoso. A valle della batteria di condensatori è presente un misuratore volumetrico a secco dell'aria campionata provvisto di rotametro. In questo modo è possibile conoscere la portata di syngas campionato al fine di ricavare la concentrazione del TAR e del particolato presenti nel gas. Il complessivo del sistema di campionamento è visibile in Figura 24.



Figura 23. Punto di campionamento gas in corrispondenza del condotto uscente dalla sommità del gassificatore



Figura 24. Sistema di campionamento per la separazione di polveri e TAR costituito da sonda di prelievo riscaldata, batteria di condensatori e misuratore volumetrico di portata

La Tabella 11 si riporta il dettaglio del campionamento effettuato durante la prova del 25-29 luglio 2016 con alimentazione a cippato di eucaliptus.

Tabella 11. Campionamenti TAR effettuati nel corso del 2016

	<i>Data</i>	<i>Durata</i>	<i>Volume gas campionato [l]</i>	<i>Tipologia combustibile</i>
C1	26 luglio	60'	196	Cippato eucaliptus

Il campionamento è stato effettuato per un tempo compreso tra poco meno di 60 minuti e circa 100 minuti. Il volume del gas campionato cambia sia in funzione del tempo di durata del campionamento, sia dalla portata impostata sul misuratore volumetrico. Questa infatti può essere regolata a seconda che si voglia utilizzare un flusso di prelievo (portata di aspirazione) basso o alto.

Al termine del campionamento il contenuto dei condensatori è stato messo assieme (circa 300 ml di soluzione) in un recipiente in vetro e conservato in frigorifero.

Successivamente il campione è stato filtrato utilizzando un sistema di filtrazione (Figura 25) costituito da imbuto e setto poroso: tra questi viene posto un filtro in acetato di cellulosa da 0,45 µm. Ciascun filtro è stato pesato prima della filtrazione. Il filtrato è stato successivamente raccolto in una beuta e conservato nuovamente in frigorifero in vista di eventuali ulteriori analisi.



Figura 25. Sistema di filtrazione del campione separato nei condensatori: polveri e TAR vengono separati sul filtro in acetato di cellulosa, nella beuta si raccoglie il filtrato

Tramite la filtrazione del campione è possibile separare dalla soluzione costituita dal solvente, dal TAR disciolto e dal particolato la frazione solida più densa, non miscibile nell'alcool. Sul filtro si raccoglie soprattutto il particolato e quelle ulteriori particelle solide che sono state raccolte nei condensatori.

Come vedremo in fase di discussione dei risultati, la quantità di materiale separato sul filtro è rilevante. Per determinare la quantità di polvere e TAR raccolta sul filtro, questo viene essiccato e pesato per due volte, prima e dopo la filtrazione: in questo modo è possibile determinare la quantità di materiale separato e riportarlo, in termini di concentrazione, al volume di gas campionato.

Quando possibile è inoltre utile effettuare, sulla soluzione filtrata, un trattamento di evaporazione dell'alcool: questo procedimento prevede un'ulteriore separazione tra l'alcool isopropilico e i composti

pesanti che in esso si sono disciolti. È possibile effettuare questa separazione tramite un evaporatore rotante e anche in questo caso il recipiente di raccolta della frazione pesante (normalmente un pallone in vetro) viene pesato prima e dopo l'evaporazione, previa una lenta essiccazione in stufa ad una temperatura di circa 40 °C.

Inoltre è possibile effettuare anche un'analisi sul campione filtrato (o anche su quello residuo dopo l'evaporazione) in un gas-cromatografo dotato di rilevatore di massa, con l'utilizzo dell'opportuna colonna analitica e delle più adatte condizioni operative: ciò permette di determinare la natura dei composti costituenti il TAR (analisi qualitativa).

Di seguito sono descritti i risultati ottenuti dal campionamento del 26/07/2016 eseguite presso l'impianto Dimostrativo e dalle successive analisi condotte nei laboratori Sotacarbo.

6.2 Campionamento del 26/07/2016

In quest'occasione il test sperimentale in impianto utilizzava come combustibile il solo cippato di eucaliptus (Cip10) ed è stato eseguito un solo campionamento. Si è rilevata un'elevata presenza di TAR (Tabella 12) e polveri dal campionamento effettuato. Il campione è stato sottoposto a filtrazione; 50 ml del campione filtrato sono stati poi posti nell'evaporatore rotante per l'ulteriore separazione.

Tabella 12. Risultati relativi al campionamento del 26/07/2016

	<i>Massa solido dopo filtrazione [g]</i>	<i>Massa solido dopo evaporazione [g]</i>	<i>Concentrazione nel gas [g/m³]</i>
C1	1,722	12,34	71,73

Dalle prove effettuate e qui descritte possiamo arrivare ad alcune conclusioni, di seguito riportate:

- il campionamento di TAR e polveri è risultato efficace in occasione della prova condotta con il solo cippato di eucaliptus;
- il particolato si raccoglie soprattutto nel filtro in quarzo presente nel primo tratto del condotto di adduzione gas: se si è interessati alla cattura del solo TAR il filtro blocca la polvere presente nel gas e solo una minima parte viene raccolto nei condensatori; in ogni caso per avere una misura più oggettiva della quantità di particolato presente nel gas, occorre misurare (tramite essiccazione) sia la quantità raccolta nel filtro in quarzo, sia quella che si ottiene dalla filtrazione del campione successivamente al campionamento;
- per una corretta applicazione della metodica di campionamento e per ottenere efficaci risultati in merito, occorre garantire sempre una temperatura del syngas, in uscita dal gassificatore, di circa 150-200 °C; a temperature inferiori buona parte del TAR condensa sulle pareti del condotto e sulle eventuali parti "fredde" del sistema di campionamento.

Uno dei limiti del sistema di campionamento utilizzato per le prove descritte in questo report è legato al fatto che alcune parti che lo costituiscono non sono ben coibentate, permettendo la dispersione del calore e favorendo la condensazione del TAR ben prima del punto di raccolta in corrispondenza dei condensatori. E' infatti indispensabile, al fine di un corretto campionamento, che la prima parte del sistema sia ad una temperatura adeguata affinché i composti pesanti possano condensare solo nei recipienti di raccolta ma non prima. La sonda di prelievo e anche parte dei raccordi su cui fluisce il syngas non garantiscono questa condizione. Per questi motivi si è cercato di trovare una soluzione che garantisse, pur conservando il sistema attualmente in utilizzo, un miglioramento di queste condizioni operative di campionamento.

6.3 Nuovo sistema di campionamento TAR

E' stato individuato un sistema di campionamento proposto dalla ditta Gamba & Botteghi (Livorno) che è stato testato in impianti sperimentali analoghi a quello dimostrativo e per l'utilizzo in test di gassificazione con biomasse. Il sistema proposto prevede di ovviare al problema della dispersione di calore della linea di campionamento a partire dalla sonda fino alla batteria dei condensatori. Prevede, inoltre, la presenza di un primo condensatore tenuto in temperatura (massimo 150 °C) a cui seguono gli altri condensatori tenuti, come nel sistema in nostro utilizzo, a bassa temperatura. Uno dei vantaggi del sistema che si è deciso di adottare è che inoltre può essere termostato tramite sistema di controllo alla temperatura desiderata.

Il disegno sottostante (Figura 26) riporta uno schema semplificato del sistema adottato, costituito da una sonda di prelievo dotata di ghiera di serraggio regolabile, da un box in acciaio nel quale la sonda si raccorda con un sistema dotato di filtro riscaldato (che può arrivare fino alla massima temperatura di 210 °C) e da un primo condensatore (*impinger*) che quindi viene tenuto ad alta temperatura. All'uscita dall'*impinger* è presente un secondo filtro al quale è collegato un tubo in teflon della lunghezza di circa 3 metri. Tutte le parti che costituiscono il sistema qui descritto possono essere termostate alla temperatura desiderata, tramite una serie di termoregolatori fissati su un secondo armadietto metallico. Il tubo in teflon, anch'esso riscaldato, può essere poi connesso al sistema di condensatori e al misuratore volumetrico già in nostro possesso.

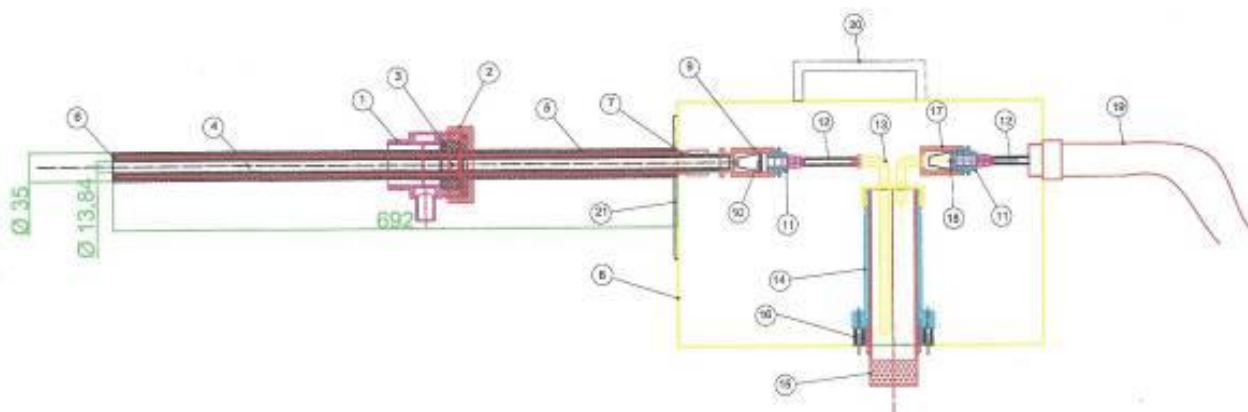


Figura 26. Schema del nuovo sistema di campionamento TAR (Gamba & Botteghi)

Il sistema di campionamento acquisito da Gamba & Botteghi non è stato ancora testato nell'impianto dimostrativo Sotacarbo. E' stato però effettuato un collaudo funzionale, positivo, presso la sede della ditta costruttrice. Il nuovo sistema di campionamento TAR sarà disponibile per le sperimentazioni dell'annualità 2017.

7 Conclusioni

Durante il corso dell'annualità corrente si è proceduto ad ottimizzare l'unità ed il processo di gassificazione dell'impianto dimostrativo Sotacarbo; inoltre in previsione di una sua integrazione con un motore a combustione interna (MCI), è stato progettato un nuovo sistema di clean-up del syngas.

Sono stati effettuati diversi test sperimentali con biomasse al 100%, uno con cippato di pino e due con differenti qualità di cippato di eucaliptus. I test sperimentali sono stati eseguiti con durata crescente: il primo di circa 50 ore mentre l'ultimo di circa 100 ore al fine di testare il funzionamento del gassificatore in continuo su tempi lunghi.

La sperimentazione è stata preceduta da importanti attività, fra le quali:

- Integrazione, messa a punto, utilizzo e modifiche del nuovo sistema di caricamento automatico del combustibile "Redler" al fine di ottimizzare i tempi e le procedure di caricamento del combustibile nel gassificatore.
- Progettazione di un sistema di pulizia del syngas al fine di rendere il syngas alimentabile ad un MCI.
- Modifiche alla griglia di scarico ceneri atte ad ottimizzare la gestione delle fasi di evacuazione delle ceneri dal reattore di gassificazione.
- Realizzazione di un filtro a monte del un motore a combustione interna (MCI) al fine di preservarlo dagli inquinanti presenti nel syngas (tar, polveri, umidità).

L'andamento dei test ha portato alle seguenti valutazioni:

- L'impianto Dimostrativo Sotacarbo ha mostrato buone performance nella gassificazione di biomasse quali cippato di legna, sia in termini di portata di syngas prodotto sia in termini di potere calorifico; le analisi delle ceneri scaricate mostrano la quasi totale assenza di carbonio fisso residuo che conferma il buon andamento del processo di gassificazione durante i test;
- Nel primo test di marzo la portata d'aria è stata mantenuta intorno ai 680 kg/h con un consumo di combustibile pari a 340 kg/h ed una portata di syngas prodotto di 770 m³/h; il potere calorifico del syngas si è attestato intorno ai 4,3 MJ/kg. Nel secondo test sperimentale si è avuta una portata di aria processo pari a 690 kg/h e la portata di combustibile ad 450 kg/h, con un aumento della portata di syngas (825 m³/h) ed un potere calorifico all'incirca di 4,4 MJ/kg. Nel terzo test sperimentale la portata di aria processo è stata pari a 670 kg/h e la portata di combustibile è stata di 350 kg/h, con una portata di syngas di 793 m³/h ed un potere calorifico all'incirca di 4,3 MJ/kg.
- I dati sperimentali sono stati confermati anche su un test di lunga durata (circa 100 ore), inoltre l'impianto ha mostrato di conservare una buona funzionalità.
- Al fine di testare la qualità del syngas prodotto durante il test sperimentale eseguito nel mese di Luglio 25-29/07/2016 è stato acceso motore a combustione interna (MCI) dell'impianto Pilota, alimentato dal syngas generato dal gassificatore Dimostrativo; sono stati prodotti 12 kWe per circa 15 minuti. Il ridotto tempo di funzionamento del motore è imputabile all'elevata concentrazione di tar e polveri nel syngas che ha intasato rapidamente il filtro posto a monte del motore stesso

Con l'attuale configurazione dell'impianto Dimostrativo sarà possibile utilizzare un motore da circa 200-400 kWe. Nel test effettuato nel mese di luglio la qualità del syngas si è dimostrata ottimale per il funzionamento del motore a combustione interna (MCI) presente nell'impianto Dimostrativo. Inoltre, è stato dimostrato che il sistema di clean-up attualmente presente sull'impianto di gassificazione Dimostrativo non è sufficientemente efficiente per ottenere un syngas con le caratteristiche necessarie ad alimentare un motore a combustione interna (MCI); per tale motivazione durante questa annualità si è proceduto alla progettazione di un nuovo sistema di clean-up del syngas da realizzarsi nella prossima annualità.

8 Riferimenti bibliografici

1. *D. Cocco, C. Palomba, P. Puddu (2010). Tecnologie delle energie rinnovabili. Editore S.G.E.*
2. *El-Rub Z. A. (2008). Biomass char as an in-situ catalyst for tar removal in gasification systems. Ph.D. Thesis, Twente University, The Netherland.*
3. *M.G. Cutrufello, I. Ferino, R. Monaci, T. Pivetta, E. Rombi, P. Deiana, C. Bassano (2015). Caratterizzazione composizionale del syngas proveniente dalla gassificazione di carbone e biomasse. Report RdS/PAR2014/268.*

9 Presentazione società

La Società Sotacarbo - Società Tecnologie Avanzate Low Carbon- S.p.A. è stata costituita il 2 aprile 1987, in attuazione dell'art. 5 della legge 351/85 “norme per la riattivazione del bacino carbonifero del Sulcis”, con la finalità di sviluppare tecnologie innovative ed avanzate nell'utilizzazione del carbone attraverso la costituzione in Sardegna del Centro di Ricerche, la progettazione e la realizzazione di impianti dimostrativi sulla innovazione tecnologica nella utilizzazione del carbone, la realizzazione di impianti industriali per l'utilizzazione del carbone in alternativa alla combustione.

Le attività della Sotacarbo riguardano soprattutto:

- Sviluppare progetti di R&S e di ricerca applicata sulle nuove tecnologie di utilizzo del carbone, le così dette Clean Coal Technologies (CCTs)
- Operare come punto di riferimento a livello nazionale, per il coordinamento delle attività di R&S sul carbone a sostegno del sistema industriale italiano
- Promuovere e diffondere la conoscenza sulle CCTs, fornendo una corretta visione delle potenzialità del carbone nel panorama energetico italiano e non, con particolare riferimento alla sua compatibilità con l'ambiente
- Monitorare gli sviluppi tecnologici riguardanti l'utilizzo pulito del carbone
- Fornire attività di consulenza ad enti, istituzioni e privati nel campo delle CCTs. Partecipare a meeting internazionali e gestire rapporti con organizzazioni omologhe straniere per contribuire alla diffusione delle CCTs.