



Ricerca di Sistema elettrico

Sperimentazione dell'impianto dimostrativo di gassificazione di biomasse per la produzione elettrica

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

TEST SPERIMENTALI DI GASSIFICAZIONE E CO-GASSIFICAZIONE DI CARBONE E BIOMASSE
PRESSO LA PIATTAFORMA PILOTA SOTACARBO

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

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

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

Obiettivo: Studi sullo sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse

Responsabile del Progetto: Vito Pignatelli

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studi sullo sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse"

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Deiana

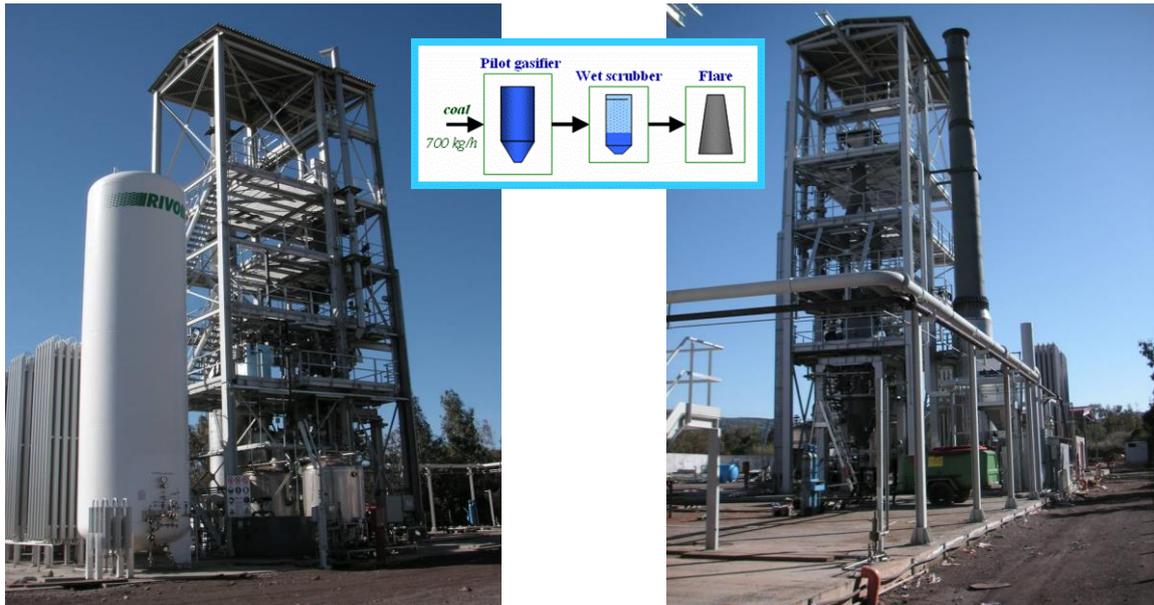
Responsabile scientifico Sotacarbo: Enrico Maggio

Indice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUZIONE | 7 |
| 2 | L'IMPIANTO DIMOSTRATIVO SOTACARBO..... | 8 |
| 2.1 | IL REATTORE DI GASSIFICAZIONE | 8 |
| 2.2 | SCRUBBER E SISTEMI DI SCARICO E STOCCAGGIO REFLUI | 12 |
| 2.3 | SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO DELL'IMPIANTO..... | 13 |
| 2.4 | SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI | 13 |
| 2.4.1 | <i>Composizione del gas</i> | 14 |
| 3 | OBIETTIVI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE..... | 15 |
| 3.1 | OBIETTIVI SPECIFICI DEI TEST SPERIMENTALI | 15 |
| 3.2 | COMBUSTIBILI IMPIEGATI | 15 |
| 3.3 | STRUMENTI E METODI DI ANALISI..... | 16 |
| 3.3.1 | <i>Analisi immediata</i> | 16 |
| 3.3.2 | <i>Analisi elementare</i> | 17 |
| 3.3.3 | <i>Determinazione del potere calorifico</i> | 17 |
| 4 | PROCEDURE OPERATIVE DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE | 18 |
| 4.1 | VERIFICHE E AVVIAMENTO DELLE APPARECCHIATURE AUSILIARIE..... | 18 |
| 4.2 | FASE DI START-UP..... | 19 |
| 4.2.1 | <i>Caricamento iniziale del reattore</i> | 19 |
| 4.2.2 | <i>Accensione del letto combustibile</i> | 19 |
| 4.2.3 | <i>Analisi Syngas</i> | 19 |
| 4.3 | FASE OPERATIVA | 20 |
| 4.4 | FASE DI SHUT-DOWN..... | 21 |
| 5 | TEST SPERIMENTALI DI GASSIFICAZIONE E CO-GASSIFICAZIONE | 22 |
| 5.1 | PRINCIPALI MODIFICHE SULL'IMPIANTO DIMOSTRATIVO | 23 |
| 5.2 | STRUMENTAZIONI E MISURE EFFETTUATE SULL'IMPIANTO DIMOSTRATIVO | 24 |
| 5.2.1 | <i>Misuratori FT001 e 491P</i> | 24 |
| 5.2.2 | <i>Misuratore di livello steam drum</i> | 25 |
| 5.2.3 | <i>Misuratore di condensa sul circuito di raffreddamento vapore</i> | 26 |
| 5.2.4 | <i>Misuratori di livello per i serbatoi Scrubber</i> | 27 |
| 5.2.5 | <i>Misuratori di temperatura ralla di sostegno alla griglia</i> | 27 |
| 5.3 | ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 25-27/03/2015 | 27 |
| 5.4 | ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 28-30/04/2015 | 30 |
| 5.5 | ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI CO-GASSIFICAZIONE DEL 10-12/06/2015 | 33 |
| 5.6 | ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI CO-GASSIFICAZIONE DEL 30/06-02/07/2015..... | 35 |
| 6 | SVILUPPI FUTURI | 39 |
| 7 | CONCLUSIONI..... | 40 |
| 8 | CURRICULUM | 42 |

Sommario

Il presente documento riporta una sintesi delle attività e dei principali risultati ottenuti nei test di gassificazione e co-gassificazione effettuati nel corso delle campagne sperimentali nel periodo da Marzo a Settembre 2015, 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 illustrati i principali parametri e le prestazioni rilevate durante i test effettuati alimentando differenti tipologie di biomasse e miscele di biomasse e carbone.



Viste Impianto Dimostrativo di Gassificazione 5MWt c/o Sotacarbo e Schema di Sintesi

Nel corso delle campagne sperimentali, oggetto del presente documento, i combustibili utilizzati sono stati:

- cippato di legna vergine (pinus pinea e eucaliptus);
- una miscela di cippato di legna vergine e carbone colombiano.

Una task force dedicata allo start up e alla gestione dell'impianto di gassificazione dimostrativo è stata istituita con la partecipazione di personale ENEA e Sotacarbo. I test sperimentali effettuati sono stati quattro della durata di circa due giorni ciascuno, esclusa la fase di spegnimento dell'impianto. Il presente rapporto presenta la verifica del funzionamento a caldo delle varie sezioni di impianto, il collaudo funzionale di queste e l'analisi dei dati sperimentali ottenuti.

| Data | Obiettivo |
|----------------|---|
| 25 – 27 /03/15 | Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea |
| 28 – 30 /04/15 | Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea |
| 10 – 12 /06/15 | Cogassificazione biomasse, cippato di Eucalipto / Carbone Colombiano |
| 30/06-02/07/15 | Cogassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea / Carbone Colombiano |

Test sperimentali di lunga durata con biomasse e con mix di carbone e biomasse

Le sperimentazioni hanno avuto come principale obiettivo quello di eseguire dei test di lunga durata al fine di verificare il funzionamento del gassificatore in continuo, di verificare la stabilità del processo e mediante l'analisi del syngas ottenuto fornire indicazioni utili alla determinazione dei parametri di progettazione dei sistemi di pulizia syngas e produzione di energia elettrica da immettere in rete.

L'attività ha visto la partecipazione del personale ENEA nella predisposizione e verifica delle modifiche attuate in impianto, nella definizione e predisposizione delle specifiche di prova, nella fase di sperimentazione e nella fase di elaborazione e analisi dei dati ottenuti.

L'obiettivo dichiarato di testare il comportamento del sistema e effettuare una valutazione delle prestazioni di gassificazione è stato raggiunto con successo. L'attività sperimentale è stata condotta al fine di verificare la funzionalità di tutti i componenti e migliorare la conoscenza del funzionamento del gassificatore nella diverse fasi di start-up, regime stazionario e shut-down. Una prima caratterizzazione del processo è stata eseguita e le modalità ed i parametri chiave per ottenere condizioni operative standard sono stati identificati. Dopo le prime sessioni sperimentali, diverse attività sono tutt'ora in esecuzione e molti sviluppi futuri sono in cantiere. L'obiettivo dichiarato è quello di dimostrare il funzionamento di un'unità completa da circa 500 kW, collegata alla rete per la generazione di energia.

1 Introduzione

I test sperimentali di gassificazione effettuati nel periodo marzo-settembre 2015, 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);
- una miscela di combustibile, costituita da carbone colombiano e cippato di legna vergine.

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 a valle di questo primo capitolo introduttivo:

- 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,
- gli impianti ausiliari necessari al funzionamento ed al monitoraggio dell'impianto.

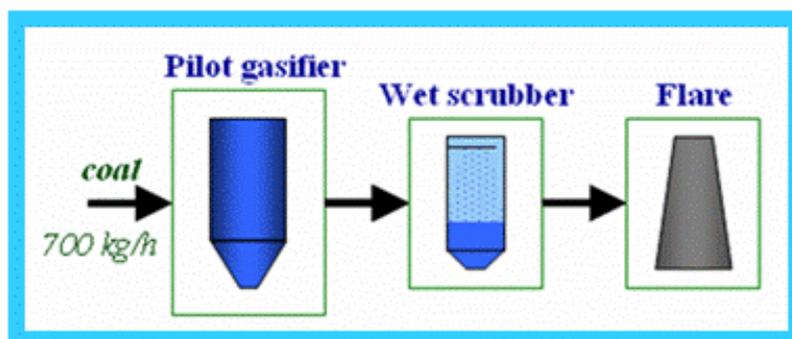


Figura 1.1. Schema dell'impianto

2.1 Il reattore di gassificazione

Il gassificatore dimostrativo della piattaforma Sotacarbo (figura 2.1) 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 i primi 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 a forma di Y integrato da tre ghigliottine atte alla gestione della tempistica del caricamento.

Il combustibile viene caricato sulla tramoggia attraverso l'utilizzo di big, bag con volume pari a 1 m³, il quale ha la possibilità di essere svuotato dal basso e di venire sollevato tramite l'utilizzo di un paranco, dotato di dinamometro digitale avete fondo-scala 1000 kg (1000 dN).

Il gassificatore 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.

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 2.1. Gassificatore impianto dimostrativo (parte inferiore)

Tabella 2.1. Posizionamento termocoppie

| | | | | | | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Altezza | | | | | | |
| 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 2.2.

La fase di accensione avviene tramite l'ausilio di sei irradiator ceramiche 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.



Figura 2.2. Parte esterna della griglia del gassificatore dimostrativo

Si riporta di seguito la sezione del gassificatore dove viene indicato il posizionamento degli irradiator:

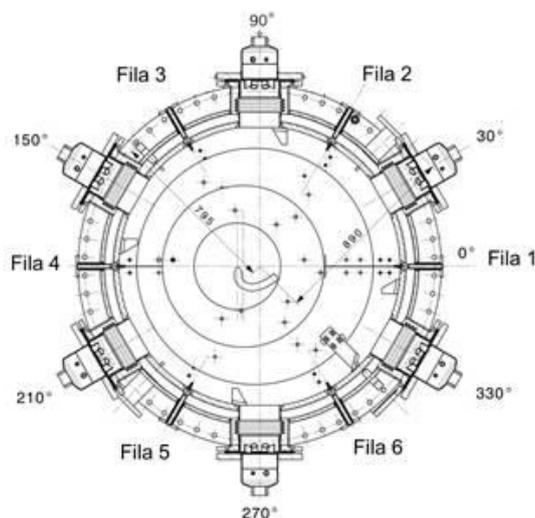


Figura 2.3. Sezione del gassificatore: posizione degli irradiator di accensione

Come si può notare dalla figura 2.3, i sei irradiator ceramici ad infrarosso sono disposti a 60° l'uno dall'altro, hanno dimensioni 125x125 mm e sono dotati di termocoppia interna di tipo K (0-1000 °C). L'irradiatore (Figura 2.4) è inserito in un involucro metallico (lampada), montato sul gassificatore.



Figura 2.4. Irradiatore

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. 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, in cui si è riportata un'immagine dello stirrer, si notano i motori di rotazione e traslazione insieme al sistema che collega lo stirrer al pistone oleodinamico.

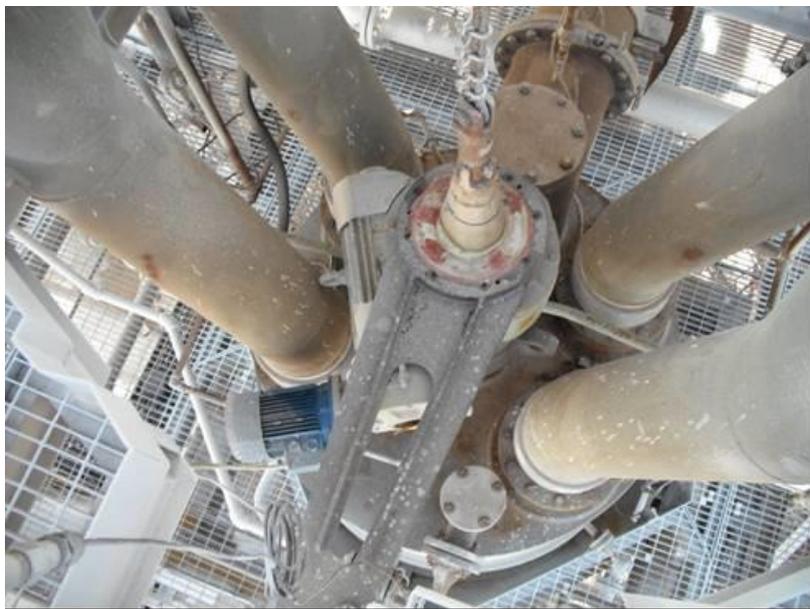


Figura 2.5. Stirrer

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 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).

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.



Figura 2.6. Steam Drum

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 ha lo scopo di effettuare un lavaggio del syngas tramite un flusso d'acqua equi corrente 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 2.7. Scrubber

2.3 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.

2.4 Sistema di campionamento e analisi

A supporto delle sperimentazioni, l'impianto è dotato di una serie di punti di campionamento che consentono di prelevare in continuo mediante delle linee di campionamento campioni di syngas da inviare agli strumenti di misura.

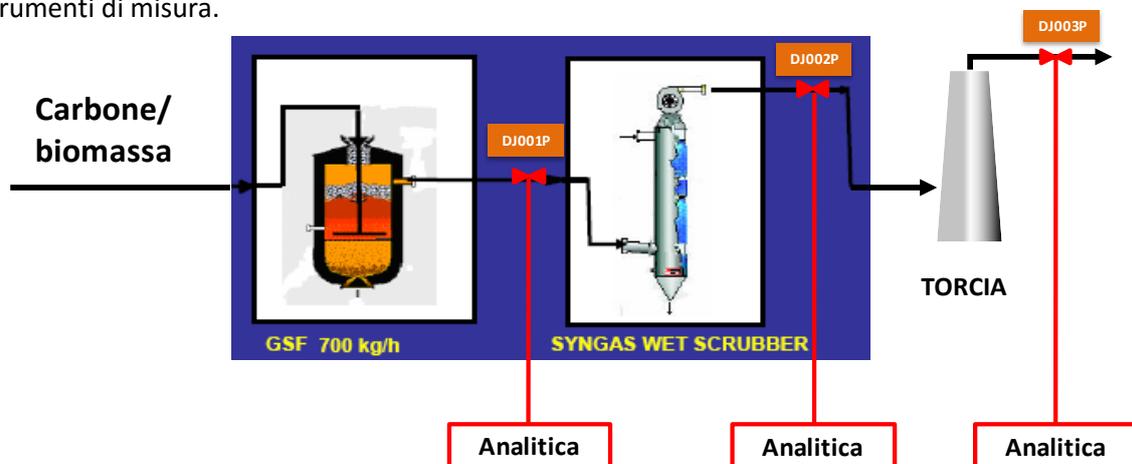


Figura 2.8. Campionamento del syngas: punti DJ001 (gassificatore), DJ002 (scrubber) e DJ003 (torcia)

2.4.1 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:

- eseguire dei test di lunga durata al fine di verificare il funzionamento del gassificatore in continuo, di verificare la stabilità del processo e mediante l'analisi del syngas ottenuto fornire indicazioni utili alla determinazione dei parametri di progettazione dei sistemi di pulizia syngas e produzione di energia elettrica da immettere in rete.
- testare il processo di gassificazione di biomasse e di co-gassificazione con diversi combustibili. In particolare quelli utilizzati in alimentazione sono stati cippato di legna vergine (eucaliptus e pinus pinea) e una miscela di carbone (colombiano) e cippato di legna vergine (eucaliptus e pinus pinea di provenienza locale).
- automatizzare e strumentare meglio 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 48 ore (escluso lo spegnimento). I test sono stati effettuati nelle seguenti date:

- 25-27/03/2015, effettuato con cippato di pino di Trinità d'Agultu (Pinus Pinea) denominato Cip3;
- 28-30/04/2015, effettuato con cippato di pino (Cip3);
- 10-12/06/2015, effettuato con miscele di carbone colombiano, cippato di eucalipto di Noracugume (Cip4) e cippato di pino (Cip2);
- 30/06 - 02/07/2015, effettuato con carbone colombiano e cippato di pino di Ortacesus (Cip5) in proporzioni 10/90 (in peso)

Nella seguente tabella 3.1 sono riportati i test sperimentali effettuati nel 2015.

Tabella 3.1. Test sperimentali con biomasse e con mix di carbone e biomasse

| Data | Obiettivo principale | Sperimentazione (ore) |
|------------------|--|-----------------------|
| 25-27/03/2015 | Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea | 48 |
| 28-30/04/2015 | Gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea | 48 |
| 10-12/06/2015 | Co gassificazione biomasse, cippato di eucalipto-carbone colombiano | 48 |
| 30/06-02/07/2015 | Co gassificazione biomasse, cippato di Pino Pinus Pinea-carbone colombiano | 48 |
| | Totale | 192 |

Una task force dedicata allo start up e alla gestione dell'impianto di gassificazione dimostrativo è stata istituita con la partecipazione di personale ENEA e Sotacarbo.

In particolare l'attività ha visto la partecipazione del personale ENEA nella predisposizione e verifica delle modifiche attuate in impianto, nella definizione e predisposizione delle specifiche di prova, nella fase di sperimentazione e diagnostica, e nella fase di elaborazione e analisi dei dati ottenuti.

3.2 Combustibili impiegati

Come risulta dalla tabella 3.2, i test sperimentali sulla piattaforma pilota sono stati eseguiti con differenti tipologie di biomasse e con l'ausilio del carbone colombiano. 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 tabella 3.2 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 principalmente i seguenti:

- Carbone colombiano: carbone sub-bituminoso
- Cip2: cippato di legno di pino proveniente da Siurgus Donigala (Cagliari – Sardegna);
- Cip3: cippato di legno di pino proveniente da Trinità d’Agultu (Olbia - Sardegna);
- Cip4: cippato di eucalipto proveniente da Noragugume (Nuoro – Sardegna);
- Cip5: Cippato di pino proveniente da Ortacesus (Cagliari – Sardegna).

Tabella 3.2. Caratterizzazione dei combustibili impiegati

| Nome | Carbone Colombiano | Cip2 | Cip3 | Cip4- | Cip5 |
|---|--------------------|------------------|------------------|------------|-------------|
| Classificazione | Sub-bituminoso | Eucaliptus | Pinus Pinea | Eucaliptus | Pinus Pinea |
| Provenienza | Colombia | Siurgus Donigala | Trinità d’Agultu | Noragugume | Ortacesus |
| Densità in mucchio (kg/dm³) | | | | | |
| Densità | 0,85 | 0,28 | 0,22 | 0,2 | 0,36 |
| Analisi immediata (% in massa) | | | | | |
| Carbonio fisso | 60,33 | 19,25 | 19,82 | 19,37 | 21,87 |
| Umidità | 1,93 | 7,84 | 7,46 | 7,07 | 9,56 |
| Volatili | 36,37 | 63,03 | 70,89 | 71,17 | 67,25 |
| Ceneri | 1,34 | 0,92 | 1,82 | 2,41 | 1,33 |
| Analisi elementare (% in massa) | | | | | |
| Carbonio totale | 76,30 | 39,40 | 49,87 | 54,98 | 57,27 |
| Idrogeno | 5,54 | 4,94 | 5,90 | 5,97 | 6,148 |
| Azoto | 1,42 | 0,18 | 0,12 | 0,43 | 0,40 |
| Zolfo | 0,592 | 0,01 | 0,00 | 0,09 | 0,09 |
| Umidità | 1,96 | 0,84 | 7,46 | 7,07 | 9,56 |
| Ceneri | 1,34 | 0,92 | 1,82 | 2,41 | 1,33 |
| Analisi calorimetrica (MJ/kg) | | | | | |
| Pot. Calor. Inferiore | 32,47 | 13,25 | 17,75 | 17,12 | 17,09 |

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 3.2, 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 3.2, 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 grammo. 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.

I risultati finali delle analisi, riportati in tabella 3.2, sono anche in questo caso la media di un'analisi calorimetrica effettuata su diversi campioni di combustibile macinati in tempi diversi nel corso dell'intera campagna sperimentale.

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 e inferiore possono essere calcolati, rispettivamente, secondo le due seguenti formule (la prima espressa in forma semplificata):

$$Q_{sup} = \frac{1}{100} \left[X_C \cdot 33900 + X_H \cdot 141800 + X_S \cdot 9200 + X_{H_2O} \cdot 22600 \right] \quad (3.1)$$

$$Q_{inf} = \frac{1}{100} \left[X_C \cdot 33900 + X_H \cdot 141800 - X_{O_2} \cdot 8000 \right] \quad (3.2)$$

in cui X_C, X_{H2}, X_{O2}, X_S, X_{H2O} rappresentano rispettivamente le frazioni massiche di carbonio, idrogeno, ossigeno, zolfo e umidità. 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.

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.

Nella cornice dell'AdP MSE/ENEA 2014 sono state predisposte per ogni avviamento dal gruppo tecnico congiunto ENEA/Sotacarbo una serie di specifiche di prova e una procedura di avviamento/spengimento dell'impianto dimostrativo. A tal fine si è usufruito sia dell'esperienza maturata nei primi avviamenti del 2014 [1-2] sia dell'esperienza acquisita a partire dai primi collaudi effettuati presso gli impianti della Piattaforma Pilota a partire dal 2008, nonché dell'esperienza di Ansaldo Ricerche primo fornitore dell'impianto dimostrativo.

La durata della prova è fissata in 48 ore di funzionamento ripartite in quattro turni da 12 ore più 8 di shut down. La giornata fissata per l'inizio della sperimentazione è di solito il martedì, per avere la possibilità in caso di problemi e imprevisti di rinviare la partenza al giorno successivo (mercoledì) e concludere quindi il venerdì.

Per quanto riguarda l'organizzazione della squadra in turno ci sono in campo almeno 7 persone di cui: 1 responsabile e direttore della prova, 2 operatori in sala controllo, 3 operatori in impianto, 1 responsabile del campionamento e dell'analitica.

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 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 i materiali di seguito elencati e assumendo la quota della griglia periferica come zero delle altezze, tali materiali sono stati utilizzati durante il test sperimentali effettuati il 25-27 Marzo e il 28-30 Aprile 2015:

- | | | | |
|--------------------|--------|--------------|---------------|
| – Carbone vegetale | 400 mm | circa 500 L | circa 170 kg; |
| – Cippato | 600 mm | circa 1000 L | circa 200 kg; |

Come primo materiale viene caricato il carbone vegetale, che funge da letto di accensione in sostituzione dell'argilla, utilizzata nel corso delle precedenti sperimentazioni. Successivamente viene caricato il combustibile di accensione (cippato) e viene inserito del materiale di ignizione posizionato nelle vicinanze degli irradiator 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.

Durante i test sperimentale effettuati il 10-12/06/2015 e il 30/06 – 2/07/2015 il caricamento iniziale è stato effettuato utilizzando:

- | | | | |
|-----------------------|--------|--------------|---------------|
| – Carbone vegetale | 400 mm | circa 500 L | circa 170 kg; |
| – mix carbone/cippato | 600 mm | circa 1000 L | circa 300 kg. |

La risposta dell'impianto all'accensione mediante carbone vegetale è stata 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 (irradiator di accensione) in materiale ceramico poste a contatto con il letto del gassificatore in prossimità dello strato carbone vegetale.

Gli irradiator 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 irradiator 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 in atto 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: della concentrazione di ossigeno residuo nel syngas (il suo annullarsi è indice di buon avanzamento del processo di gassificazione, le analisi del syngas devono comunque 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 big-bag per step fino a portare l'altezza del riempimento nel gassificatore a circa 2000 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; successivamente è necessario far risalire lo stirrer fino alla quota massima per evitare surriscaldamenti dello stesso;
- carico combustibile e scarico ceneri: è stato possibile caricare il gassificatore con un ritmo minimo di un big bag/h cippato (300 kg pari a circa 1000 L) fino ad un massimo di 4 big bag/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 1000-1050 °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 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 1650 mm;
- utilizzo soda: è stato predisposto l'utilizzo di soda per abbattere H₂S presente nel syngas con una pompa che invii la soda al sistema di lavaggio dello scrubber. La regolazione della portata di soda verrà effettuata sulla base delle misure dell'analitica sul H₂S presente nel syngas a monte e a valle dello scrubber;
- torcia: verificare che la temperatura della camera di combustione non superi gli 800 °C, pulire la valvola rompifiamma in caso di rottura della guardia idraulica dello scrubber (la pressione dovrebbe superare i 50 bar).

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 1200 kg/h;
- reintegro acqua scrubber: livelli costanti a 1700 mm;
- reintegro SODA: sulla base dell'analitica;
- 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 e co-gassificazione

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto sono stati effettuati due test di gassificazione con biomassa (cippato di legno) al 100% e due test di co-gassificazione di carbone colombiano e cippato di legno di origine forestale locale; ogni test sperimentale ha avuto una durata di 48 ore.

Tabella 5.1. Caratterizzazione delle miscele di carbone colombiano e cippato di legno.

| Nome | Carbone Colombiano | Cip2 | Cip4- | Mix 35% Carbone 65% Cip2 | Mix 42% Carbone 58% Cip4 | Cip5 | Mix 10% Carbone 90% Cip5 |
|---|--------------------|------------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|----------------------------|
| Classificazione | Sub-bituminoso | Eucaliptus | Eucaliptus | Sub-bituminoso Eucaliptus | Sub-bituminoso Eucaliptus | Pinus Pinea | Sub-bituminoso Pinus Pinea |
| Provenienza | Colombia | Siurgus Donigala | Noragugume | | | Ortacesus | |
| Densità in mucchio (kg/dm³) | | | | | | | |
| Densità | 0,85 | 0,28 | 0,2 | 0,34 | 0,28 | 0,36 | |
| Analisi immediata (% in massa) | | | | | | | |
| Carbonio fisso | 60,33 | 19,25 | 19,37 | 33,68 | 36,61 | 21,87 | 25,60 |
| Umidità | 1,96 | 7,84 | 7,07 | 6,46 | 6,09 | 9,56 | 8,86 |
| Volatili | 36,37 | 63,03 | 71,17 | 57,55 | 53,86 | 67,25 | 64,26 |
| Ceneri | 1,34 | 0,92 | 2,41 | 2,31 | 3,44 | 1,33 | 1,29 |
| Analisi elementare (% in massa) | | | | | | | |
| Carbonio totale | 76,30 | 39,4 | 54,98 | 69,30 | 72,20 | 57,27 | 61,48 |
| Idrogeno | 5,54 | 4,94 | 5,97 | 5,84 | 5,69 | 6,148 | 6,09 |
| Azoto | 1,42 | 0,18 | 0,43 | 0,84 | 1,07 | 0,40 | 0,48 |
| Zolfo | 0,59 | 0,01 | 0,09 | 0,23 | 0,25 | 0,09 | 0,13 |
| Ossigeno | | | n.d. | n.d. | | n.d. | |
| Umidità | 1,96 | 0,84 | 7,07 | 6,46 | 6,09 | 9,56 | 8,86 |
| Ceneri | 1,34 | 0,92 | 2,41 | 2,31 | 3,44 | 1,33 | 1,29 |
| Analisi calorimetrica (MJ/kg) | | | | | | | |
| Pot. Calor. Inferiore | 32,47 | 13,25 | 17,12 | 21,59 | 24,05 | 17,09 | 18,97 |

5.1 Principali modifiche sull'impianto Dimostrativo

Durante i 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 presente in impianto a paranco e tramogge si è dimostrato eccessivamente lento (e impegnativo dal punto di vista di impiego del personale) per la gassificazione di cippato di legno (1000 kg/h con 4 big bag per un totale di 4000 dm³/h); tale problematica è stata risolta progettando e realizzando un sistema di caricamento automatico a redler. Durante i test di gassificazione (sia di solo cippato di legno sia di miscele di cippato di legno e di carbone colombiano) si sono verificate problematiche dovute a impaccamenti del combustibile in ingresso al gassificatore. Per tale motivazione sono allo studio delle modifiche sulle tubazioni di alimento (e sulle ghigliottine di carico) che permettono al combustibile di confluire nel gassificatore;
- sistema di raffreddamento della camicia del gassificatore: nel primo test sperimentale tale sistema ha presentato alcune problematiche dovute alla errata realizzazione del piping in uscita dal condensatore. Inoltre, i rotametri per la misura della portata del vapore in uscita dalla camicia del gassificatore generavano perdite di carico e impedivano la circolazione naturale di vapore dalla camicia del gassificatore allo steam drum. L'eliminazione dei due rotametri ed alcune piccole modifiche sul piping hanno risolto tali problematiche, eliminando le perdite di carico sul circuito ed innalzando la potenzialità dell'impianto di raffreddamento. Inoltre per migliorare la conoscenza del funzionamento dei principali parametri del circuito sono stati introdotti diversi strumenti di misura: un misuratore di portata di condensa installato a valle dell'aerotermostato (inizialmente messo a disposizione da ENEA e poi successivamente acquistato identico da Sotacarbo), un misuratore visivo del livello dello steam drum a supporto di quello elettronico (un differenziale di pressione) che durante i test presentava delle misure poco attendibili.
- sistema di scarico ceneri: sono state apportate le seguenti modifiche rispetto alla precedente annualità:
 - realizzazione di un sistema di raffreddamento della ralla con vapore,
 - sostituzione della ralla con una più resistente,
 - realizzazione di un sistema a protezione della ralla,
 - modifica dell'allineamento motoriduttore-albero-griglia.

Tali modifiche hanno migliorato le prestazioni della griglia eliminando del tutto i problemi riscontrati in precedenza, anche durante test di lunga durata;

- sistema analisi syngas: il sistema, come già spiegato, è composto essenzialmente dal gas cromatografo e dal sistema ABB. A causa delle eccessive tempistiche di campionamento il sistema ABB è stato avvicinato all'impianto dimostrativo e sono state modificate le prese di campionamento-

5.2 Strumentazioni e misure effettuate sull'impianto Dimostrativo

Durante il corso dell'annualità sono state effettuate diverse migliorie sulla strumentazione di misura presente nell'impianto dimostrativo Sotacarbo, le più importanti sono:

- Taratura del misuratore di portata volumetrico per syngas FT001P e regolazione del misuratore massico per aria 491P;
- Installazione del misuratore visivo di livello per lo steam drum;
- Installazione del misuratore di condensa sul circuito di raffreddamento del vapore alla camicia del gassificatore;
- Installazione dei misuratori di livello per i tank del circuito scrubber.

5.2.1 Misuratori FT001 e 491P

L'impianto dimostrativo Sotacarbo è dotato di due differenti strumenti di misura per le portate di syngas e aria processo:

- FT001P, misuratore volumetrico per la portata di syngas che restituisce valori in m³/h;
- 491P, misuratore massico per la portata d'aria che restituisce valori in kg/h.

Il misuratore FT001P è stato tarato con aria dalla società BOPP & REUTER nel 2015 con regolare certificato di taratura per tale motivazione è stato preso come riferimento.

Al fine di valutare la bontà della misura effettuata dal misuratore massico 491P si è provveduto a fluxare sui due misuratori la stessa quantità d'aria mediante utilizzo della soffiante CO001P.

Per poter effettuare questo test si è proceduto alla chiusura di tutti i possibili punti di perdita d'aria sul circuito, mediante l'applicazione di cieche sul circuito lampade; in questo modo è stato garantito il flussaggio della stessa quantità d'aria fra il misuratore 491P (posto a valle della soffiante) e il misuratore FT001P (posto a valle dello scrubber).

Successivamente la portata in gioco è stata variata attraverso l'utilizzo della valvola di ricircolo FV491P (atta al ricircolo dell'aria all'interno della soffiante) e con l'apertura e la chiusura di due sfiati presenti sulla tubazione d'uscita della soffiante (in seguito sostituiti da un unico vent ad apertura progressiva). In generale l'aumento dell'OP della valvola FV491P e l'apertura progressiva dei due vent contribuiscono a ridurre la portata d'aria in gioco.

I valori registrati dal misuratore 491P e quelli restituiti dal misuratore FT001P (moltiplicati per la densità dell'aria a 15°C, pari a 1,22 kg/m³) sono riportati in tabella 5.2.

Tabella 5.2. Valori di portata ottenuti con test sul circuito aria processo

| FV491P OP % | Sfiati Aperti | 491P (kg/h) | FT001P*d (kg/h) | FT001P (m ³ /h) | Segnale (mA) |
|----------------|------------------|----------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|
| 100 | 1+4/5 | 377 | 511 | 624 | 10,35 |
| 100 | 1 | 492 | 588 | 718 | 12,29 |
| 100 | 0 | 623 | 678 | 828 | 14,49 |
| 80 | 0 | 640 | 695 | 848 | 14,78 |
| 70 | 0 | 775 | 775 | 946 | 17,05 |
| 60 | 0 | 904 | 816 | 1051 | 19,22 |

Dalla figura 5.1 si può notare che i valori restituiti dai due misuratori sono risultati non coincidenti, infatti:

- La curva viola (491P) rappresenta i valori misurati dal misuratore 491P;

- La curva blu (FT001*d) rappresenta i valori misurati dal misuratore volumetrico FT001P moltiplicata per la densità.

I valori di portata sono stati diagrammati insieme al segnale elettrico di risposta del misuratore 491P in mA. La soluzione per la correzione della misura dello strumento 491P è risultata essere la correzione del campo scala del misuratore stesso.

Impostando il campo scala del misuratore ai valori di soglia inferiore 385 e superiore 1330 si è riusciti ad ottenere la quasi totale sovrapposizione delle curve di taratura.

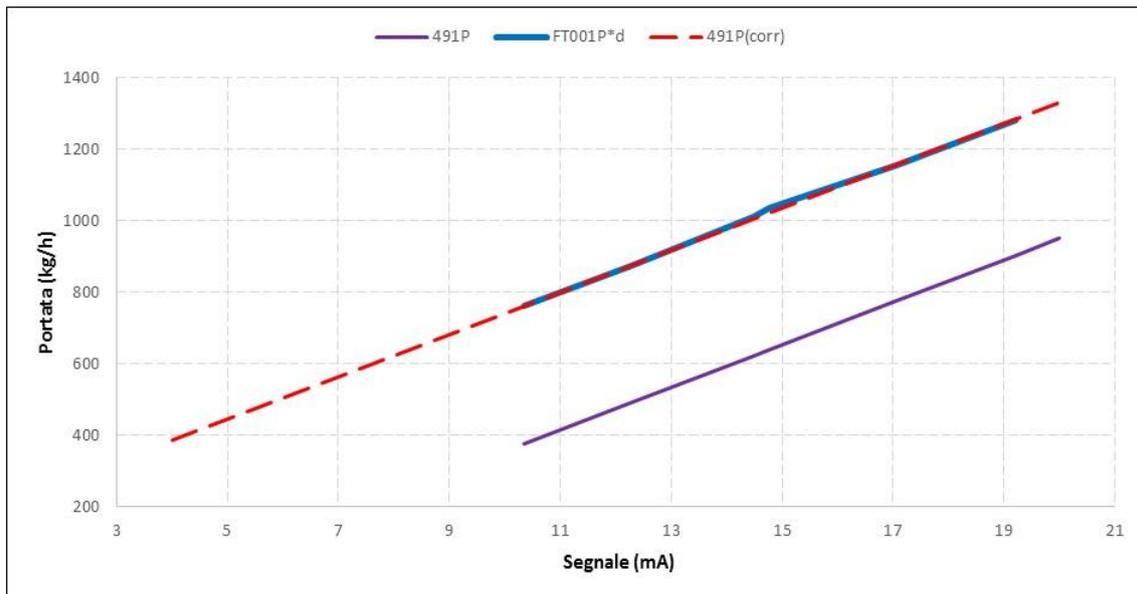


Figura 5.1. Elaborazione dei dati di portata restituiti dai misuratori di portata e correzione del misuratore 491P

Test effettuati successivamente alla modifica del campo scala del misuratore 491P (e all'introduzione dell'unico vent ad apertura progressiva in uscita dalla soffiante) hanno evidenziato come i valori misurati dai due strumenti siano quasi coincidenti come riportato in tabella 5.3.

Tabella 5.3. Valori di portata misurati previa correzione 491P

| FV491P OP % | Vent % | 491P (kg/h) | FT001P*d (kg/h) | FT001P (m ³ /h) |
|----------------|-----------|----------------|--------------------|-------------------------------|
| 100 | 0 | 890 | 891 | 730 |
| 100 | 10 | 875 | 866 | 710 |
| 100 | 20 | 716 | 732 | 600 |
| 100 | 30 | 595 | 610 | 500 |
| 70 | 30 | 660 | 683 | 540 |

5.2.2 Misuratore di livello steam drum

Il controllo dei parametri caratteristici dello steam drum è un fattore critico per la conduzione dell'impianto; di particolare interesse è la conoscenza del livello del fluido in esso contenuto.

I test effettuati hanno permesso di verificare la bassa affidabilità della misura del livello dell'acqua di raffreddamento raccolta nello steam drum, a causa dell'elevata instabilità dei valori forniti dal trasmettitore di pressione differenziale in uso. Al fine di permettere una misurazione più accurata del livello dell'acqua si è provveduto ad installare nel corpo cilindrico un indicatore di livello visivo di tipo magnetico.

Esso consiste in una camera di bypass in AISI 316Ti, collegata lateralmente allo steam drum mediante 2 attacchi. L'indicatore di livello bypass non necessita di alimentazione elettrica e consente la misurazione del

livello dello steam drum fino ad una quota di misura di 1000 mm, con temperatura di lavoro compresa tra -50 °C e 150 °C, densità minima operativa di 0,85 g/cm³ e pressione nominale di 16 bar.

5.2.3 Misuratore di condensa sul circuito di raffreddamento vapore

Per poter monitorare e controllare il flusso di condensa proveniente dagli aerotermi che provvedono alla dissipazione del calore generato nel water jacket, si è provveduto ad installare un misuratore di portata (messo a disposizione da ENEA) sulla linea di uscita dell'aerotermo. Lo strumento, un misuratore di portata elettronico Barksdale mod.UQS7-10, è costituito da un corpo di alluminio contenente un sensore di flusso ad ultrasuoni specifico per la misurazione di portate di acqua e di emulsioni acquose nei sistemi di raffreddamento ad elevata potenzialità. Lo strumento è caratterizzato da un campo di misura compreso tra 0,4 e 10 L/min e tra i 0,0024 e 0,6 m³/h con un'accuratezza del +/- 2,5%, può lavorare in condizioni di temperatura comprese tra i -30 °C e gli 80 °C, per una pressione massima di 25 bar.



Figura 5.2. Misuratore di portata condensa ad ultrasuoni e datalogger di acquisizione

Contestualmente all'implementazione del nuovo misuratore di portata, è stata inoltre riadattata la tubazione di mandata della condensa allo steam drum per poter montare lo strumento sotto battente e garantire così la costante presenza di fluido necessaria per il corretto funzionamento della tecnologia ad ultrasuoni. A valle dei primi avviamenti si è riscontrato un comportamento "a impulsi" che ha suggerito l'eliminazione dei sensori di misura vapore a rotometro posti in cima al water jacket che si comportavano come valvole di relief.

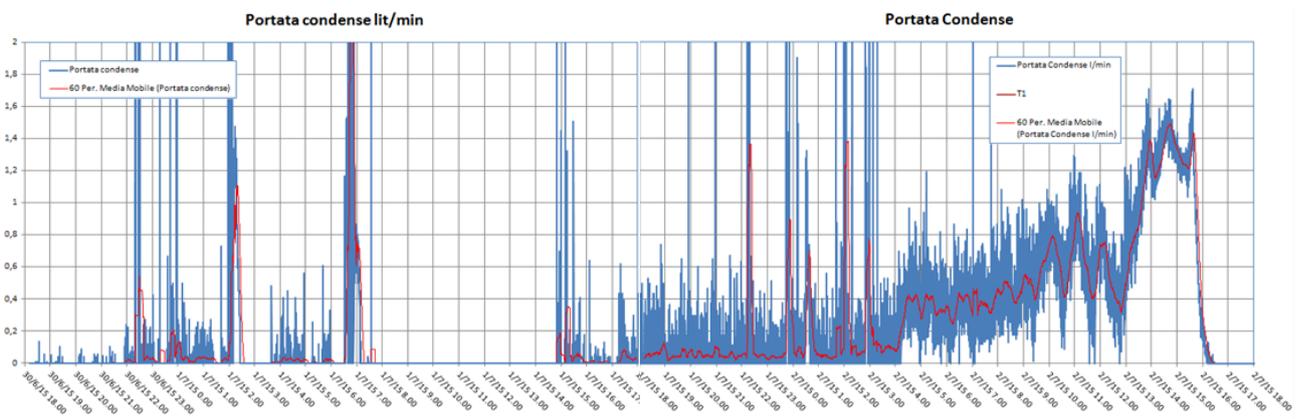


Figura 5.3. Esempio della misura della portata delle condense di ritorno al waterjacket a valle dell'aerotermo

I valori rilevati in prova hanno raggiunto valori massimi intorno a 1,5 L/min equivalenti a circa 60 kWt. Il sistema così congegnato ha data prova di buon funzionamento. Ulteriori verifiche e test verteranno sull'ampiamiento del campo di sperimentazione a regimi più elevati.

5.2.4 Misuratori di livello per i serbatoi Scrubber

I misuratori di livello precedentemente installati sui su ognuno dei due serbatoi del circuito scrubber, fornivano un'indicazione del livello del fluido in essi contenuto attraverso la misurazione della pressione idrostatica degli stessi. Tale sistema è risultato tuttavia impreciso durante il funzionamento dell'impianto a causa della variazione di pressione prodotta syngas presente nella parte superiore del serbatoio che, insistendo sulla superficie del fluido, andava a falsare la misurazione del livello, incrementando la pressione misurata di un valore pari alla pressione stessa del gas. Per garantire la precisione nella misurazione del livello si è sostituito il sistema preesistente con un sistema di trasmettitori elettronici di pressione differenziale che, attraverso la differenza tra la pressione misurata sul fondo del serbatoio e quella misurata sulla parte di serbatoio non bagnata dal liquido, fornisce l'indicazione desiderata con buona affidabilità nelle condizioni di lavoro previste (Campo di misura ± 32 kPa; Pressione massima di lavoro ammissibile: 14 MPa g);

5.2.5 Misuratori di temperatura ralla di sostegno alla griglia

In sede di modifica della griglia sono stati predisposti due punti di misura temperatura per poter monitorare le condizioni di lavoro della ralla. I valori misurati vanno mantenuti al di sotto dei 200 °C. Nella figura seguente viene mostrato l'andamento durante una delle prove sperimentali.

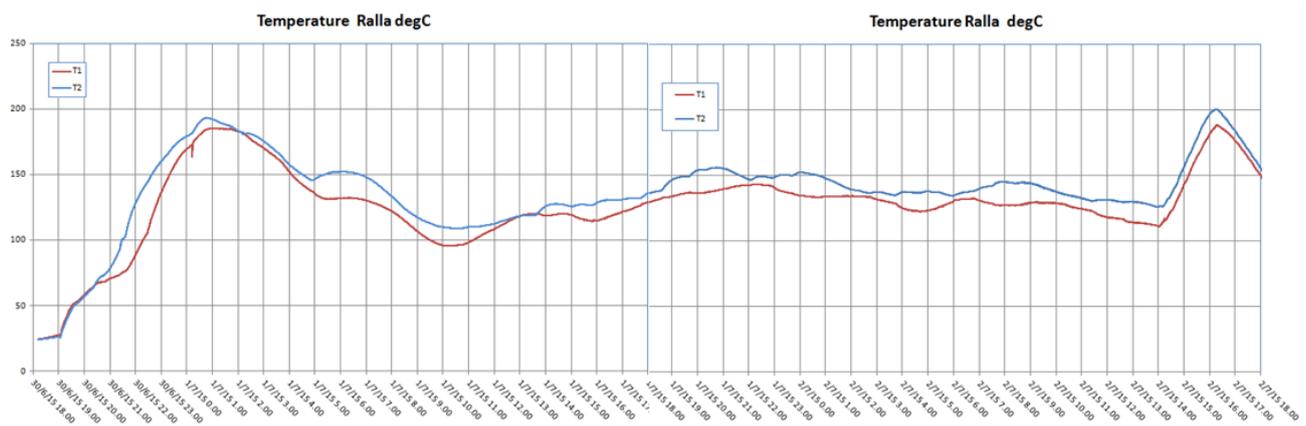


Figura 5.4. Esempio della misura della temperatura in prossimità della ralla di sostegno della griglia rotante

5.3 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 25-27/03/2015

L'analisi del processo di gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 25-27/03/15. Nel corso della prova sperimentale, sono stati gassificati mediamente, considerando unicamente i periodi in cui il gassificatore si trovava in condizioni di regime, 250-300 kg/h di combustibile (Cip3), con potere calorifico inferiore pari a 17,75 MJ/kg. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 600-650 kg/h (con punte di 700 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 5.2 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".

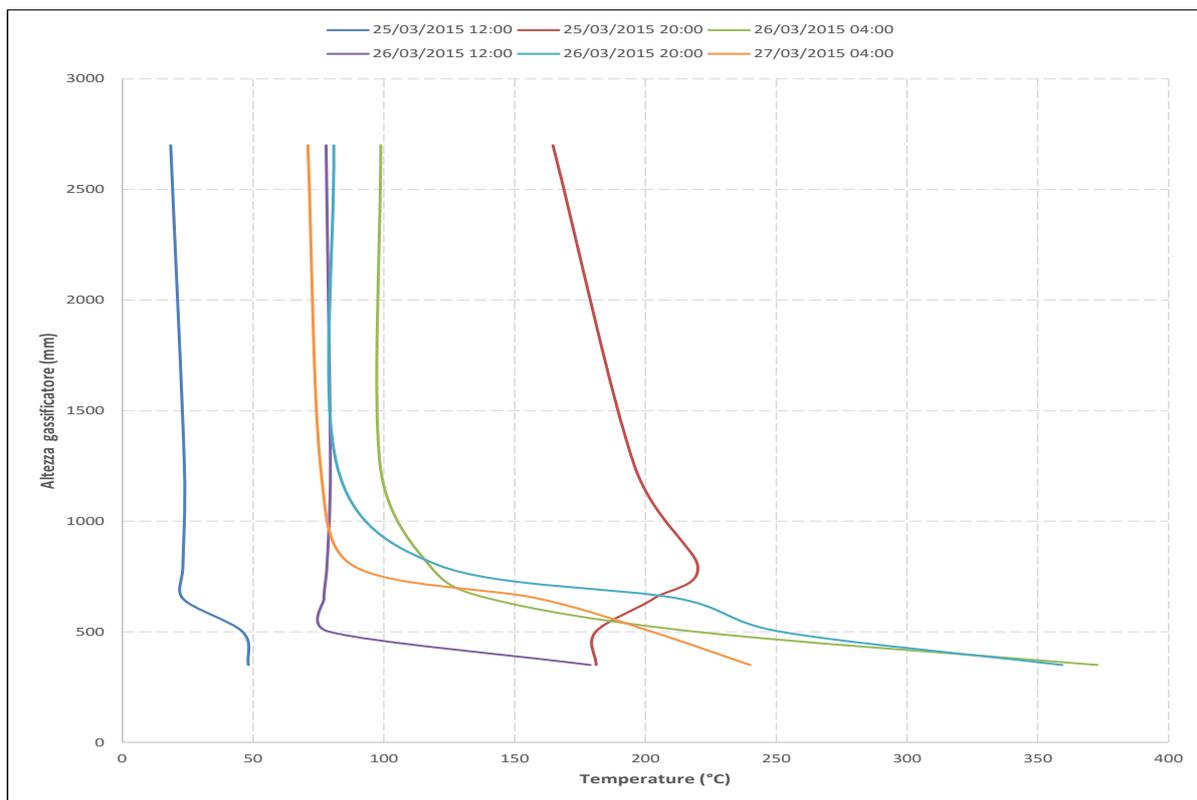


Figura 5.2. Profilo di temperatura all’interno del gasificatore durante le prove di gassificazione del 25-27/03/2015

Le figura 5.3, 5.4, 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.

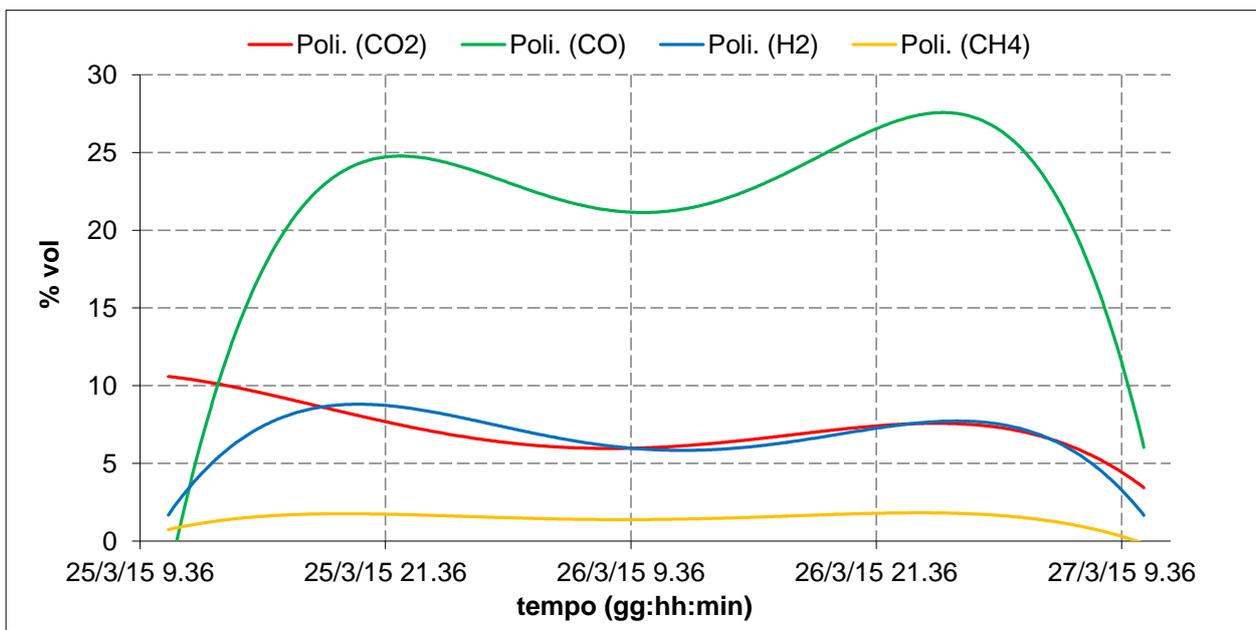


Figura 5.3. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 25-27/03/2015

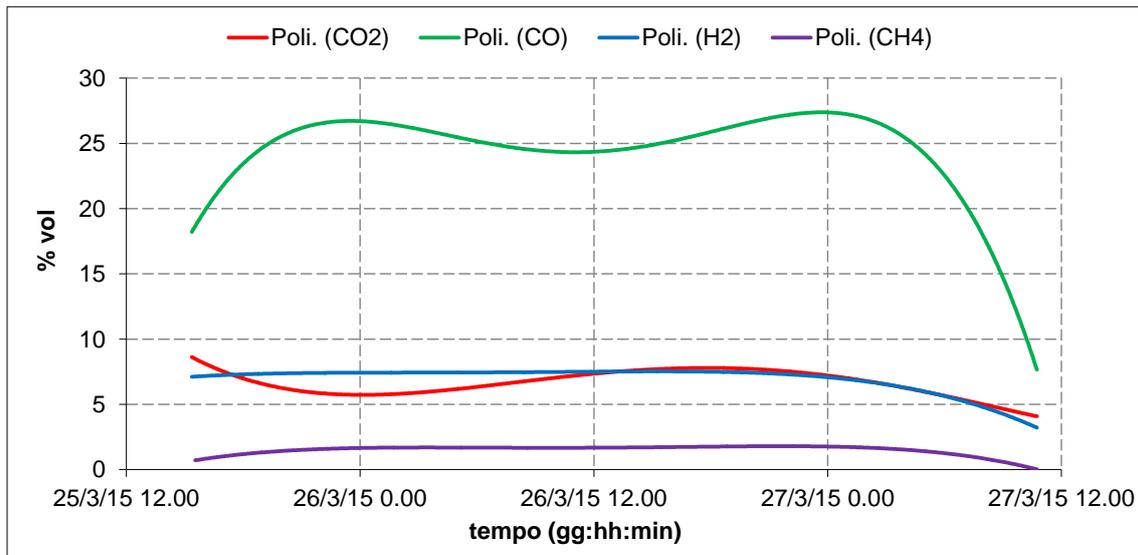


Figura 5.4. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 25-27/03/2015

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 8-9%, quella di CO pari a circa il 26%, quella di CH₄ pari al 2% e quella di CO₂ pari a circa 6-7% per un rapporto CO/CO₂ pari a 3,6 ed un rapporto H₂/CO pari a 0,28. Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione molto bassa di O₂.

E' stata misurata anche la portata volumetrica del syngas attraverso un misuratore di portata a flangia tarata posto all'uscita dello scrubber. Nel primo test sperimentale il misuratore di portata syngas ha restituito valori compresi fra i 600 e i 700 m³/h (con punte di 800-850 m³/h). Di seguito riportiamo nella tabella 5.4 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 5.4. Dati processo di gassificazione del 25-27/03/2015.

| <i>Parametri di processo</i> | |
|--|---------|
| Combustibile (kg/h) | 250-300 |
| Aria (kg/h) | 600-650 |
| Vapore (kg/h) | - |
| <i>Composizione syngas (frazioni molari su base secca)</i> | |
| CO | 0,2599 |
| CO ₂ | 0,0668 |
| H ₂ | 0,0819 |
| CH ₄ | 0,0209 |
| H ₂ S | 0,0141 |
| <i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i> | |
| Portata volumetrica (Nm ³ /h) | 670-720 |
| LHV (MJ/Nm ³) | 5,15 |

Le ceneri prodotte hanno avuto un bassissimo contenuto di carbonio come riportato in tabella 5.5; il processo di gassificazione ha quindi dato ottimi risultati:

Tabella 5.5. Analisi delle ceneri - SC1 - Scarico cumulativo ore 18:50 del 26/03/2015 - SC2 - Scarico delle 22:30 del 26/03/2015 - SC3 - Scarico delle 3:30 del 27/03/2015 - SC4 - Scarico delle 6:50 del 27/03/2015

| Sample Name | Moisture % | Volatile % | Ash % | Fixed Carb. % | Total C % | H % | N % | S % |
|-------------|------------|------------|-------|---------------|-----------|------|-------|------|
| SC1 | 7,39 | 13,50 | 84,12 | 0,00 | 8,21 | 0,51 | 0,022 | 0,79 |
| SC2 | 4,71 | 11,50 | 87,13 | 0,00 | 6,65 | 0,77 | 0,000 | 0,51 |
| SC4 | 4,36 | 12,77 | 79,51 | 3,37 | 16,27 | 0,76 | 0,002 | 0,62 |

5.4 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 28-30/04/2015

Nel corso della prova sperimentale del 28-30/04/2015, sono stati gassificati mediamente 400-500 kg/h con punte di 600-800 kg/h di combustibile (Cip3), con potere calorifico inferiore pari 17,75 MJ/kg.

La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 700 kg/h con punte di 800 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 5.5 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”.

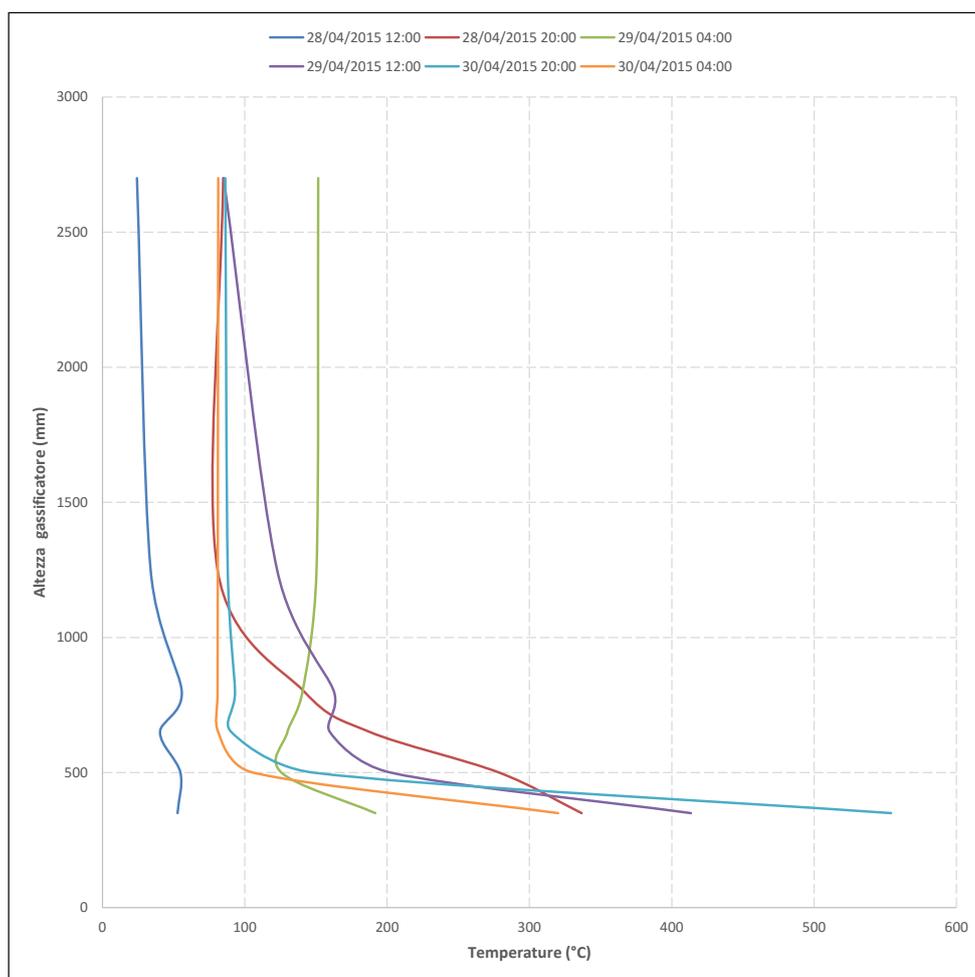


Figura 5.5. Profilo di temperatura all’interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 28-30/04/2015

Le figura 5.6 e 5.7 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.

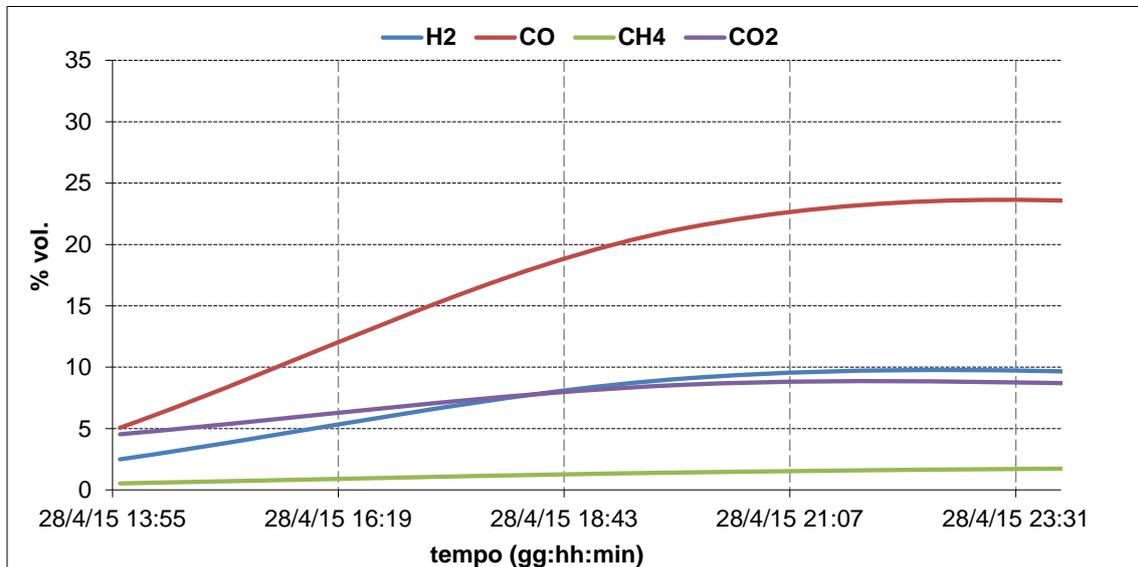


Figura 5.6. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 28-30/04/2015

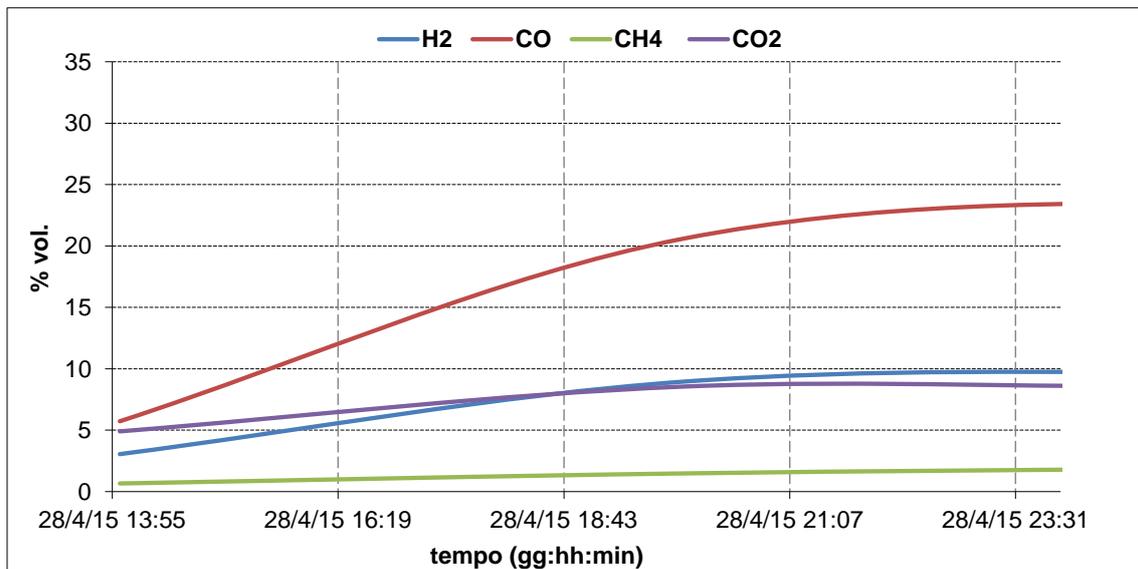


Figura 5.7. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 28-30/04/2015

Dal momento in cui il sistema raggiunge le condizioni di funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 9,5%, quella di CO pari a circa il 23%, quella di CH₄ pari al 1,8% e quella di CO₂ pari a circa 8,5% per un rapporto CO/CO₂ pari a 2,8 ed un rapporto H₂/CO pari a 0,37.

Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione molto bassa 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 valori compresi fra i 750 e i 800 m³/h (con una portata di aria intorno a 700 kg/h ed una portata di combustibile in ingresso di circa 400-500 kg/h) durante la prima fase del test e successivamente di 1000-1100 m³/h (con una portata di aria intorno a 800-850 kg/h ed una portata di combustibile in ingresso di circa 600-800 kg/h).

Di seguito riportiamo nella tabella 5.6 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 5.6. Dati processo di gassificazione del 28-30/04/2015

| <i>Parametri di processo</i> | |
|--|----------|
| Combustibile (kg/h) | 500-800 |
| Aria (kg/h) | 700-850 |
| Vapore (kg/h) | - |
| <i>Composizione syngas (frazioni molari su base secca)</i> | |
| CO | 0,2311 |
| CO₂ | 0,0852 |
| H₂ | 0,0947 |
| CH₄ | 0,0181 |
| H₂S | 0,0110 |
| <i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i> | |
| Portata volumetrica (Nm³/h) | 800-1100 |
| LHV (MJ/Nm³) | 4,70 |

Tabella 5.7 Analisi delle ceneri - SC1 - Scarico ore 18:50 del 28/04/2015 – SC2 - Scarico delle 00:15 del 29/04/2015 - SC3 - Scarico delle 05:55 del 29/04/2015 - SC5 - Scarico delle 18:30 del 29/04/2015 - SC6 - Scarico delle 23:53 del 29/04/2015 - SC7 - Scarico delle 05:14 del 30/04/2015

| Sample Name | Moisture % | Volatile % | Ash % | Fixed C % | Total C % | H % | N % | S % |
|-------------|------------|------------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| SC1 | 6,35 | 23,37 | 47,22 | 23,07 | 43,83 | 1,297 | 0,271 | 0,070 |
| SC2 | 2,15 | 10,13 | 74,60 | 13,13 | 25,53 | 0,463 | 0,169 | 0,073 |
| SC3 | 3,75 | 9,50 | 54,72 | 32,03 | 44,93 | 0,774 | 0,287 | 0,175 |
| SC5 | 0,98 | 7,59 | 91,75 | 0,00 | 4,77 | 0,184 | 0,031 | 0,132 |
| SC6 | 0,49 | 4,85 | 93,19 | 1,49 | 6,20 | 0,185 | 0,063 | 0,058 |
| SC7 | 1,87 | 5,83 | 82,42 | 9,89 | 21,15 | 0,531 | 0,261 | 0,134 |

L'analisi del carbonio fisso contenuto negli scarichi del gassificatore evidenzia il progressivo miglioramento delle condizioni di gassificazione all'interno del reattore, come si evince dalla tabella 5.7.

5.5 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di co-gassificazione del 10-12/06/2015

Questa analisi del processo di co-gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 10-12/06/15. Al fine di valutare la funzionalità e le prestazioni dell'impianto al variare delle condizioni di alimentazione, sono stati preparati due tipologie differenti di big bags per lo svolgimento della prova:

1. mix di carbone colombiano (35%) e cippato di legno eucalipto Cip 2 (65%)
2. mix di carbone colombiano (42%) e cippato di legno eucalipto Cip 4 (58%)

Nel corso della prova sperimentale sono stati gassificati mediamente, considerando unicamente i periodi in cui il gassificatore si trovava in condizioni di regime, 300 kg/h di miscela 35/65 durante le prime 36 ore e 220 kg/h di miscela 42/58 durante la seconda parte del test. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 600-620 kg/h nei periodi di regime del gassificatore.

La figura 5.8 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".

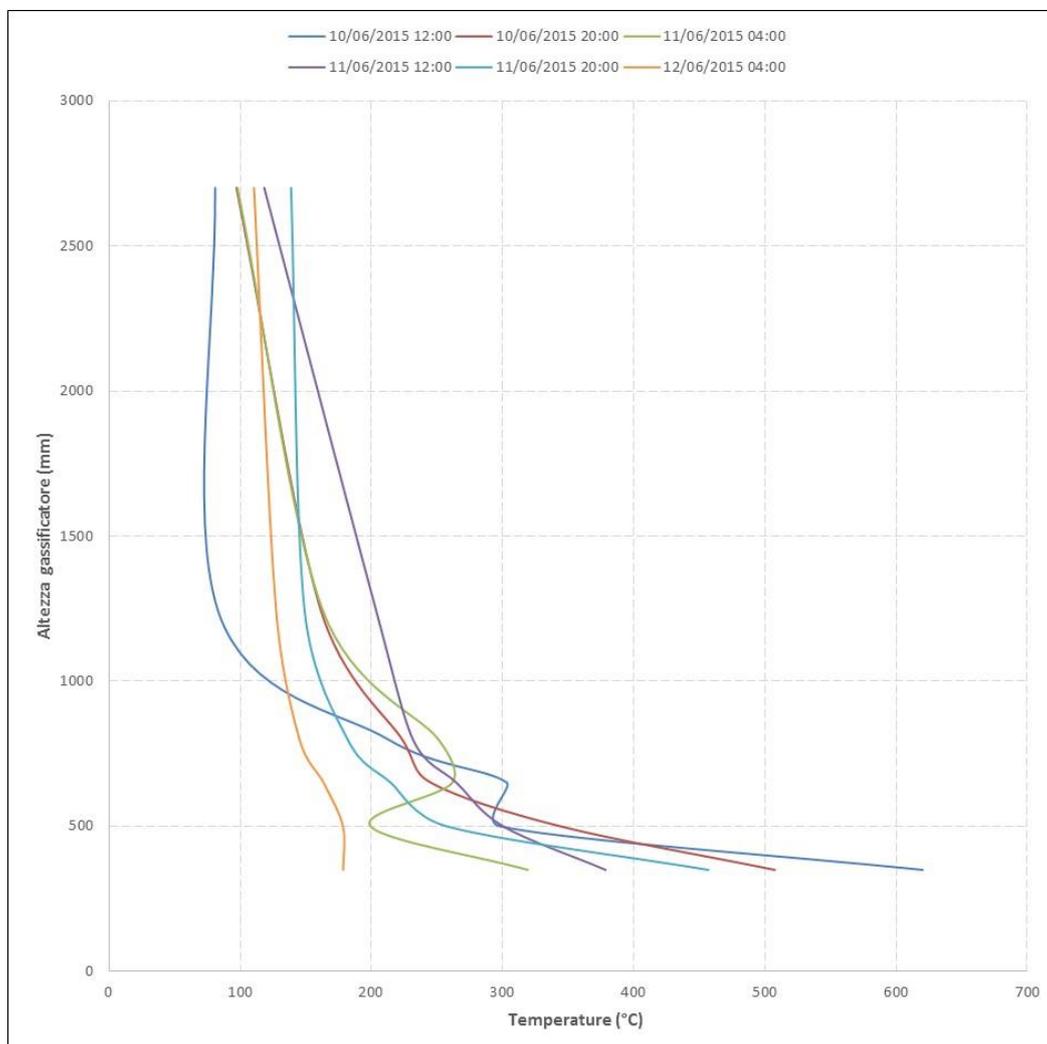


Figura 5.8. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 10-12/06/2015

Le figura 5.9 e 5.10 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.

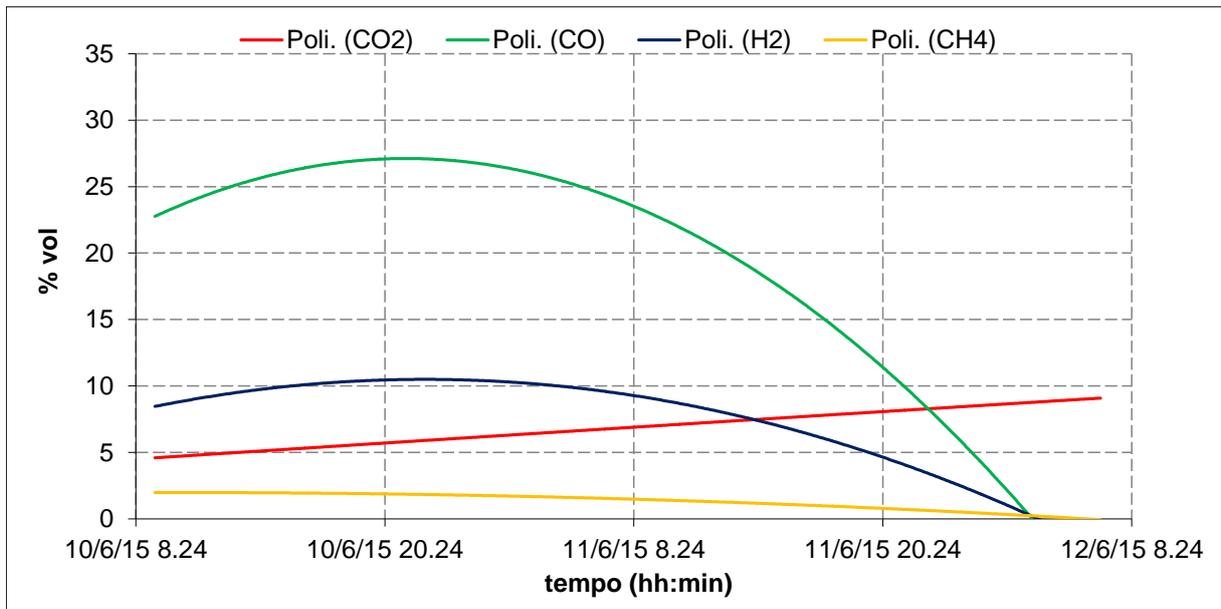


Figura 5.9. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 10-12/06/2015

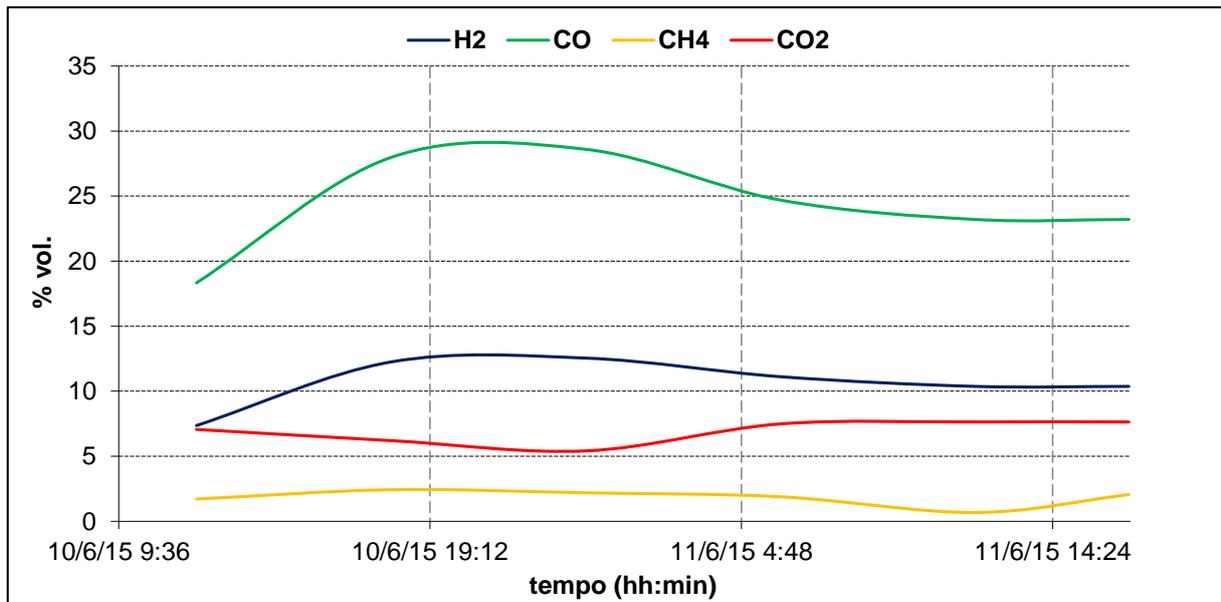


Figura 5.10. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 10-12/06/2015

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 9,6%, quella di CO pari a circa il 25%, quella di CH₄ pari al 1,6% e quella di CO₂ pari a circa 5,7% per un rapporto CO/CO₂ pari a 4,3 ed un rapporto H₂/CO pari a 0,38.

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 valori compresi fra i 700 e i 750 m³/h. Di seguito riportiamo nella tabella 5.8 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 5.8. Dati processo di gassificazione del 10-12/06/2015.

| <i>Parametri di processo</i> | |
|--|---------|
| Combustibile (kg/h) | 300-250 |
| Aria (kg/h) | 600-620 |
| Vapore (kg/h) | - |
| <i>Composizione syngas (frazioni molari su base secca)</i> | |
| CO | 0,2500 |
| CO ₂ | 0,0578 |
| H ₂ | 0,0960 |
| CH ₄ | 0,0165 |
| H ₂ S | 0,0004 |
| <i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i> | |
| Portata volumetrica (Nm ³ /h) | 700-750 |
| LHV (MJ/Nm ³) | 4,77 |

**Tabella 5.9. Analisi degli scarichi – SC3 - Scarico delle ore 6:00 del 11/06/2015
- SC4 - Scarico delle ore 13:10 del 11/06/2015**

| Sample Name | Moisture % | Volatile % | Ash % | Fixed Carbon % | Total C % | H % | N % | S % |
|-------------|------------|------------|-------|----------------|-----------|-------|-------|-------|
| SC3 | 0,93 | 5,63 | 76,70 | 16,74 | 27,00 | 0,250 | 0,430 | 1,081 |
| SC4 | 1,03 | 5,23 | 76,08 | 17,67 | 27,23 | 0,203 | 0,464 | 1,19 |

La bassa percentuale di carbonio fisso presente negli scarichi (vedi tabella 5.9) è indice della buona qualità del processo di gassificazione tenuto durante il test sperimentale.

5.6 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di co-gassificazione del 30/06-02/07/2015

Nel corso della prova sperimentale del 30/06-02/07/2015, sono stati gassificati mediamente 300 kg/h di miscela 90/10 (Cippato di legna vergine Cip5/Carbone colombiano), con potere calorifico inferiore pari a 18,97 MJ/kg. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 620-670 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato poco utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri.

La figura 5.11 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova.

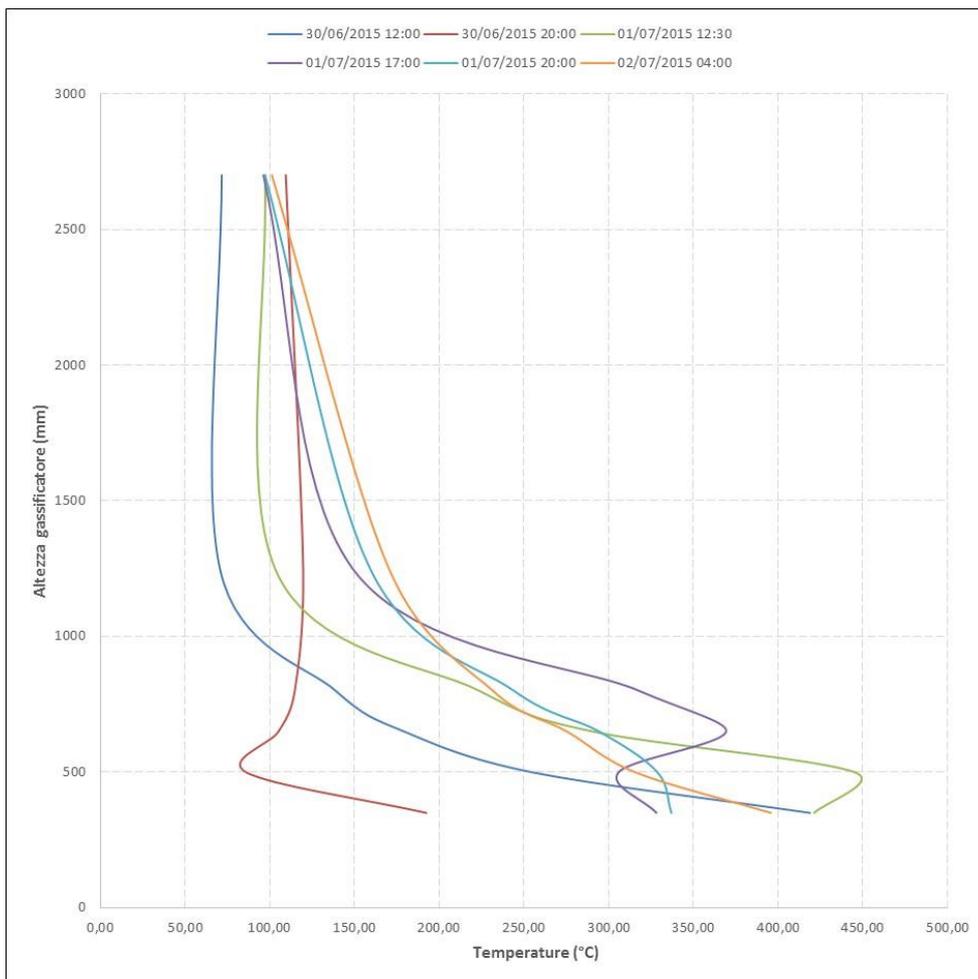


Figura 5.11. Temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 30/06 – 02/07/2015

Le figure 5.12 e 5.13 mostrano l'andamento nel tempo delle concentrazioni medie, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H₂, CO, CO₂ e CH₄ sulle prese di campionamento DJ001P e DJ002P.

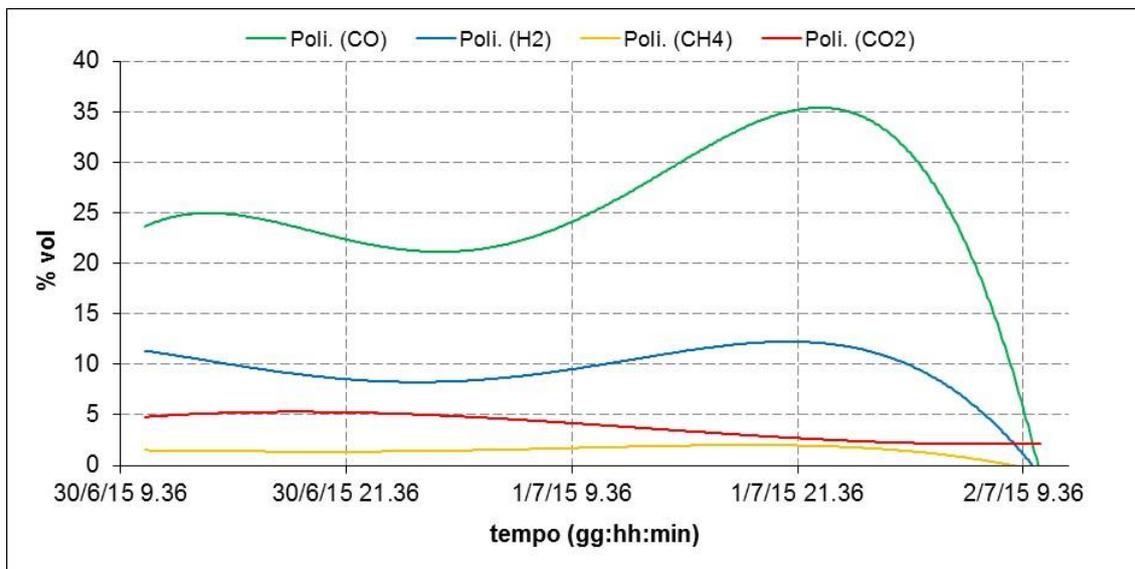


Figura 5.12. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 30/06 – 02/07/2015.

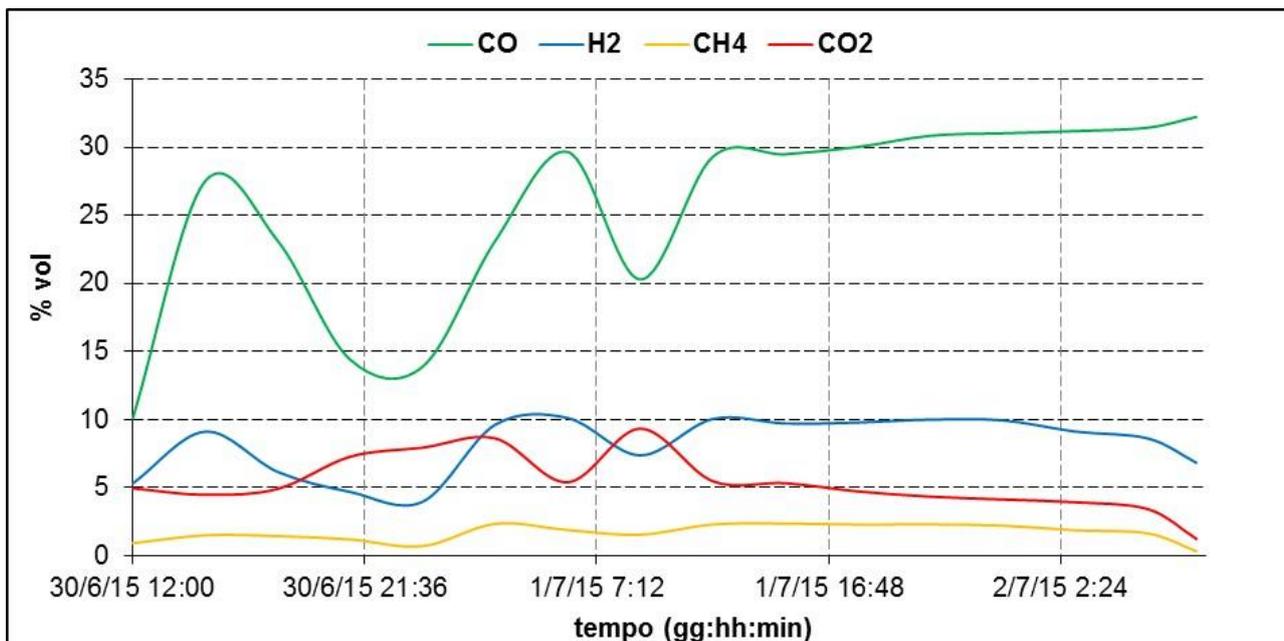


Figura 5.13. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P del 30/06 – 02/07/2015

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 10%, quella di CO pari a circa il 27%, quella di CH₄ pari al 1,6% e quella di CO₂ pari a circa 3,9% per un rapporto CO/CO₂ pari a 6,9 ed un rapporto H₂/CO pari a 0,37.

Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione pressoché 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 valori nell'intorno di 800 m³/h.

Nella tabella 5.10 riportiamo i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 5.10. Dati processo di gassificazione del 30/06 – 02/07/2015

| <i>Parametri di processo</i> | |
|--|---------|
| Combustibile (kg/h) | 300 |
| Aria (kg/h) | 650 |
| Vapore (kg/h) | - |
| <i>Composiz. syngas (fraz. molari su base secca)</i> | |
| CO | 0,2708 |
| CO ₂ | 0,0386 |
| H ₂ | 0,0991 |
| CH ₄ | 0,0156 |
| H ₂ S | 0,00007 |
| <i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i> | |
| Portata volumetrica (Nm ³ /h) | 800 |
| LHV (MJ/Nm ³) | 5,03 |

Tabella 5.11. Analisi degli scarichi - SC6 - Scarico delle ore 22:10 del 01/07/2015 - SC7 - Scarico delle 03:45 del 02/07/2015 - SC8 - Scarico finale delle 06:15 del 02/07/2015

| Sample Name | Moisture % | Volatile % | Ash % | Fixed C % | Total C % | H % | N % | S % |
|-------------|------------|------------|-------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| SC6 | 3,33 | 8,52 | 53,80 | 34,36 | 51,08 | 0,492 | 0,674 | 1,583 |
| SC7 | 1,85 | 9,38 | 74,02 | 14,76 | 26,15 | 0,249 | 0,393 | 1,655 |
| SC8 | 1,92 | 9,45 | 67,31 | 21,33 | 37,33 | 0,308 | 0,509 | 1,720 |

6 Sviluppi futuri

Sviluppi futuri includono una serie di modifiche e ulteriori migliorie per l'ottimizzazione e l'automazione del processo. L'obiettivo dichiarato è quello di pervenire a esercire l'impianto in modo da renderlo adatto al funzionamento in continuo per la co-gassificazione delle biomasse per la produzione di un syngas utilizzabile per la generazione elettrica.

Va sottolineato che l'impianto dimostrativo oggetto delle attività sarebbe il primo dimostratore FOAK (First Of A Kind), che potrebbe quindi essere felicemente replicato, con anche brevetti e/o attività commerciali, ma anche aperto a futuri progetti di ricerca e programmi nel settore del carbone e la gassificazione della biomassa.

7 Conclusioni

Il lavoro della task force ENEA / Sotacarbo, svolto nella presente annualità, ha visto l'attuazione di differenti test sperimentali di lunga durata su diversi tipi di carbone, biomasse in cippato e loro miscele con un notevole sforzo focalizzato sulla caratterizzazione delle concentrazioni dei macro componenti del syngas e la definizione qualitativa degli inquinanti (tar e polveri).

Le modalità operative di conduzione dell'impianto sono state migliorate e si è pervenuti al funzionamento in continuo che ha permesso di ottenere una buona qualità di syngas minimizzando il carbonio residuo negli scarichi. Dopo aver proceduto al collaudo delle varie sezioni dell'impianto si è proceduto ad ottimizzare l'unità ed il processo di gassificazione durante l'annualità corrente.

Sono stati effettuati diversi test sperimentali con biomasse al 100% e con un mix di biomassa e di carbone in co-gassificazione, di durata superiore rispetto ai test effettuati nella passata annualità.

La sperimentazione è stata preceduta da differenti test a freddo nei quali si è data grande attenzione alla taratura di alcuni strumenti fondamentali per lo studio del processo di gassificazione: il misuratore di portata d'aria processo, il misuratore di portata di syngas, il misuratore di portata d'aria alle lampade.

Durante la sperimentazione l'impianto è stato equipaggiato con diversi strumenti atti ad incrementare e migliorare la conoscenza del processo:

- misuratore della portata di condensa del sistema di condensazione collegato alla camicia di raffreddamento del gassificatore;
- misuratore di livello dello steam drum ;
- misuratori di livello "compensati" per la misura del livello dello scrubber e del tank di decantazione.

Al fine di avere misure più significative sono state poi modificate le prese di campionamento del syngas e sono stati spostati gli strumenti di analisi (modulo ABB), ottenendo misurazioni più rapide e più attendibili sul gas prodotto dal gassificatore.

Grazie al lavoro descritto, eseguito dal gruppo di lavoro Sotacarbo/ENEA ad hoc istituito, si sono ottenuti risultati più attendibili e credibili ed è stata incrementata la conoscenza del processo grazie all'aumento dei parametri di processo misurati.

I test di gassificazione di solo cippato di legno sono stati due, possiamo riportare di seguito le seguenti valutazioni:

- la tecnologia di gassificazione del reattore dell'impianto ben si presta alla gassificazione di cippato di legno 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;
- nel primo test di marzo la portata d'aria è stata contenuta intorno ai 600-650 kg/h con un consumo di combustibile pari a 250-300 kg/h ed una portata di syngas prodotto di 650-720 m³/h; il potere calorifico del syngas si è attestato intorno ai 5,15 MJ/kg. Nel secondo test sperimentale si è aumentata la portata di aria processo con un massimo di 850 kg/h e la portata di combustibile ad un massimo di circa 800 kg/h con un considerevole aumento della portata di syngas (1000-1100 m³/h) ed un potere calorifico all'incirca di 4,7 MJ/kg. Questi dati dimostrano come il gassificatore sia in grado di alimentare un sistema di produzione di energia elettrica come ad esempio un motore a combustione interna (con rendimento supposto intorno al 30%), con potenzialità di circa 300 kWe con i parametri di gassificazione utilizzati nel primo test sperimentale e di circa 500 kWe con i parametri di gassificazione utilizzati nel secondo test sperimentale;
- Effettuando per i due test sperimentali il calcolo del rendimento di gas freddo η_{GF} (*cold gas efficiency*), definito come il rapporto tra la potenza chimica prodotta dal gassificatore sotto forma di syngas (prodotto tra portata di syngas e potere calorifico) e quella introdotta nel gassificatore attraverso il combustibile, per il primo test è stata ricavata un'efficienza di gassificazione di circa 90%, mentre per il secondo test sperimentale un'efficienza di circa 80%

Si può concludere che il gassificatore, esercito con cippato di legno, è in grado di alimentare un motore di circa 400-500 kWe con un'efficienza di circa 80% (valore di target considerata la taglia del gassificatore).

Successivamente sono stati effettuati due test di co-gassificazione con miscele di carbone e cippato di legno, dai quali si possono trarre le seguenti conclusioni:

- durante il primo test sperimentale la miscela di combustibile utilizzata ha avuto una percentuale in peso del carbone pari al 35%-40%; i risultati non sono stati ottimali anche a causa di alcune problematiche riscontrate sul sistema di caricamento del combustibile. In generale possiamo affermare che l'eccessiva differenza di reattività fra i due combustibili ha comportato il consumo rapido del cippato e la permanenza del carbone, molto meno reattivo del cippato, con variazioni di prestazioni rilevanti durante il test sperimentale. È stata appurata la difficoltà di gassificare il mix di combustibili nelle percentuali utilizzate nel corso del test sperimentale.
- durante il secondo test sperimentale il combustibile in alimentazione ha avuto una percentuale in peso del carbone pari al 10% e cippato di legno al 90%. I risultati sono stati ottimali con delle prestazioni del tutto simili al primo test sperimentale con solo cippato di legno; il rendimento del gassificatore è stato leggermente inferiore all'80% contro il 90% registrato nel primo test sperimentale a cippato.
- in entrambi i test sperimentali è stata utilizzata una quantità volumetrica di combustibile inferiore rispetto ai test con solo cippato.

Si può concludere che i combustibili utilizzati, carbone colombiano e cippato di legno (Pinus Pinea), portano a dei buoni risultati della co-gassificazione se la percentuale di carbone si mantiene intorno al 10%. Rispetto all'utilizzo del solo cippato, la gestione dell'impianto è facilitata dalla minore quantità volumetrica di combustibile in alimentazione.

In generale i test sperimentali hanno dato buoni risultati mostrando come il reattore di gassificazione può essere utilizzato per alimentare in continuo dei sistemi di produzione di energia elettrica fino ad una taglia massima di circa 500 kWe, per tale motivazione durante questa annualità si è proceduto all'automazione dell'impianto con un sistema di caricamento automatico e con diverse modifiche che hanno permesso di ottimizzare il processo di gassificazione. Nella prossima annualità si prevede di realizzare un sistema di clean-up del syngas per accoppiare il gassificatore ad un sistema di produzione di energia elettrica e di continuare ad ottimizzare e automatizzare il reattore di gassificatore.

8 Curriculum

La Società Sotacarbo - Società Tecnologie Avanzate Carbone- 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