



Ricerca di Sistema elettrico

Produzione di combustibili gassosi, gassificazione del carbone e cogassificazione con biomasse

G.Calì, F.Tedde, S.Meloni, P.Deiana, M.Subrizi, C.Bassano.

PRODUZIONE DI COMBUSTIBILI GASSOSI, GASSIFICAZIONE DEL CARBONE E COGASSIFICAZIONE CON BIOMASSE

G.Cali, F.Tedde, S.Meloni, P.Deiana, M.Subrizi, C.Bassano

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano annuale di realizzazione 2015

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: B.2 Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

Obiettivo: Produzione di combustibili gassosi, gassificazione del carbone e cogassificazione con biomasse

Responsabile del Progetto: F.R. Picchia, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *Produzione di energia elettrica da combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂*.

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Deiana

Responsabile scientifico Sotacarbo: Enrico Maggio

Un caloroso ringraziamento va a tutto il personale Sotacarbo impegnato nella realizzazione 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, G.Cali, C.Manca, D.Marotto, S.Meloni, P.Miraglia, 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.Dessi, A.Masili, M.Mureddu, A.Orsini.

Il personale ENEA: P.Deiana, M.Subrizi, C.Bassano

Indice

1	INTRODUZIONE	3
2	L'IMPIANTO DIMOSTRATIVO SOTACARBO.....	4
2.1	IL REATTORE DI GASSIFICAZIONE	4
2.2	SCRUBBER E SISTEMI DI SCARICO E STOCCAGGIO REFLUI	8
2.3	MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA.....	9
2.4	SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO DELL'IMPIANTO.....	10
2.5	SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI	10
2.5.1	<i>Composizione del gas</i>	10
3	SISTEMA DI TRATTAMENTO REFLUI	11
4	OBIETTIVI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	15
4.1	OBIETTIVI SPECIFICI DEI TEST SPERIMENTALI	15
4.2	COMBUSTIBILI IMPIEGATI	16
4.3	STRUMENTI E METODI DI ANALISI.....	17
4.3.1	<i>Analisi immediata</i>	17
4.3.2	<i>Analisi elementare</i>	17
4.3.3	<i>Determinazione del potere calorifico</i>	17
5	PROCEDURE OPERATIVE DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE	18
5.1	VERIFICHE E AVVIAMENTO DELLE APPARECCHIATURE AUSILIARIE.....	18
5.2	FASE DI START-UP.....	19
5.2.1	<i>Caricamento iniziale del reattore</i>	19
5.2.2	<i>Accensione del letto combustibile</i>	19
5.2.3	<i>Analisi Syngas</i>	19
5.3	FASE OPERATIVA	20
5.4	FASE DI SHUT-DOWN.....	21
6	TEST SPERIMENTALI DI GASSIFICAZIONE E CO-GASSIFICAZIONE.....	22
6.1	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 10-12/02/2016	22
6.2	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI COGASSIFICAZIONE DEL 06-08/04/2016	26
6.3	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI COGASSIFICAZIONE DEL 04-07/07/2016	29
6.4	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 05-08/09/2016	32
7	CAMPIONAMENTO TAR	36
8	CONCLUSIONI.....	43

Sommario

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test di gassificazione e co-gassificazione effettuati nel corso delle campagne sperimentali nel periodo febbraio-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 e con mix di biomasse e carbone. Nel corso della campagna sperimentale, oggetto del presente documento, i combustibili utilizzati sono i stati i seguenti:

- carbone colombiano
- una miscela di carbone colombiano e cippato di legna vergine.

I test sperimentali effettuati sono stati quattro della durata di circa 48/72 ore ciascuno, 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 Febbraio-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:

- Carbone Colombiano;
- 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:

- 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 (Figura 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 carbone 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 ghiigliottine atte alla gestione della tempistica del caricamento.

Il combustibile viene caricato sulla tramoggia superiore tramite un sistema convogliatore Redler a moncatena raschiante.

Il controllo della temperatura delle pareti interne del gassificatore è realizzato attraverso camicia di raffreddamento in acciaio, al cui interno circola dell'acqua. Il sistema di raffreddamento è completato da un corpo cilindrico superiore (Figura 6) 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 1. Gassificatore impianto dimostrativo (parte inferiore).

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.



Figura 2. Parte esterna della griglia del gassificatore dimostrativo.

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, sul quale viene posizionato uno strato di carbone vegetale. Si riporta di seguito la sezione del gassificatore con l'indicazione del posizionamento degli irradiator:

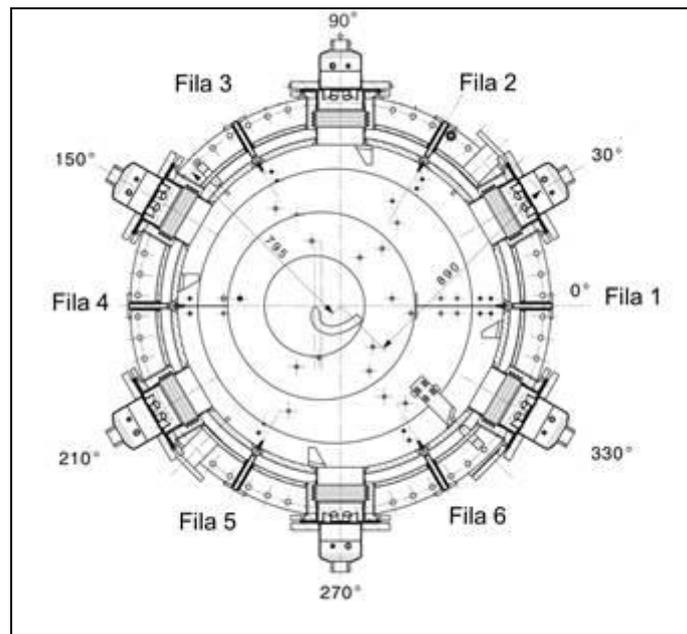


Figura 3. Sezione del gassificatore: posizione degli irradiani di accensione.

Come si può notare dalla Figura 3, i sei irradiani ceramici ad infrarossi, di dimensioni 125mm X 125mm e dotati di termocoppia interna di tipo K (0-1000 °C), sono disposti con un angolo di 60° tra loro. L'irradiatore (Figura 4) è inserito in un involucro metallico montato sul gassificatore.



Figura 4. Irradiatore.

Gli irradiani 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 impostato; 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 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.



Figura 6. Steam Drum.

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.

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.

Nel rispetto della pressione massima di esercizio del gassificatore, pari a 0,5 barg (pressione relativa), lungo la linea vapore, a monte del gassificatore, è installata 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 un'immagine relativa allo scrubber (Figura 7).



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 Tessari 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 del nuovo sistema di clean-up, già descritto nel report "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 9). 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 motore a combustione interna.

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 CO_2 , H_2 , O_2 , CO , CH_4 , N_2 , H_2S , COS , C_2H_6 e C_3H_8 .

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 , CO_2 e CH_4 tramite modulo URAS26 di tipo IR (raggi infrarossi), con i seguenti campi di misura:
 - CO_2 : 0-25% in volume;
 - CH_4 : 0-5% in volume;
 - CO : 0-30% in volume;
- misura della concentrazione di H_2 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 O_2 tramite modulo Magnos 206 di tipo paramagnetico, con campo di misura tra lo 0 e il 25% in volume;
- misura della concentrazione di H_2S tramite modulo Limas 11 di tipo a raggi ultravioletti, con campo di misura tra lo 0 e il 2% in volume.

3 Sistema di trattamento reflui

Nella precedente annualità è stato realizzato l'impianto di trattamento delle acque reflue provenienti dagli impianti facenti parte della piattaforma sperimentale Sotacarbo. Tale impianto è stato realizzato dalla ditta Azienda Italiana Depuratori e consta delle seguenti sezioni:

- Pompa di alimentazione iniziale dell'impianto di tipo centrifugo orizzontale, con corpo e girante in acciaio inox AISI 316, portata 0,3 m³/h, prevalenza 8 mca, potenza installata 0,30 kW;
- Un bacino combinato di destabilizzazione, flocculazione, sedimentazione;
- Tre impianti di stoccaggio, diluizione e dosaggio dei reagenti chimici completi di tre serbatoi di tipo cilindrico verticale in LLDPE, con vasche esterne di sicurezza di volume utile 500 litri provvisti di tre elettro agitatori verticali con albero ed elica in materiale plastico anticorrosione, con velocità di rotazione 90 rpm e potenza installata 0,37 kW,
- Due impianti di stoccaggio, diluizione e dosaggio dei reagenti chimici completo di un serbatoio di tipo cilindrico verticale in LLDPE, con vasca esterne di sicurezza di volume utile 1.000 litri, provvisto di un elettro agitatore verticale con albero ed elica in materiale plastico anticorrosione di velocità di rotazione 90 rpm e di potenza installata 0,75 kW,
- Una pompa dosatrice elettronica a membrana, a portata costante tarabile sino a 10 l/h e di potenza installata 0,04 kW;
- Un filtro finale di sicurezza a letto misto (quarzite e a carboni attivi), con gruppo di valvole a sfera per il lavaggio periodico del letto filtrante-adsorbente, corpo in acciaio con rivestimento anticorrosivo, pressione di esercizio 2-5 bar, portata sino a 7 m³/h, diametro 600 mm, altezza 2.100 mm, attacchi idraulici 1½", 100 Kg di sabbia quarzifera di granulometria 1,5÷2 mm, 300 di carbone attivo ad alta capacità adsorbente con indice di iodio 1050 mg/g min;
- Una pompa di alimentazione del filtro di tipo centrifugo orizzontale con corpo e girante in acciaio inox AISI 316, portata 0,3 m³/h, prevalenza 20 mca, potenza installata 0,30 kW;
- Strumentazione elettronica di misura e controllo in continuo del pH, con campo di misura 0÷14, implementata nella pompa dosatrice del reattivo neutralizzante e completa di elettrodo combinato per immersione;
- Un container rigenerato da 20' per l'alloggiamento e la protezione di tutte le apparecchiature costituenti l'impianto di trattamento.

Il processo di trattamento è di tipo chimico fisico ed è dimensionato per una portata media omogeneizzata di 300 l/h.

Il trattamento consiste nel dosaggio di reattivi chimici con funzione di destabilizzazione degli inquinanti, loro flocculazione e addensamento.

Nell'impianto sono dosate soluzioni commerciali diluite dei seguenti reagenti chimici:

- Acido cloridrico o soda come neutralizzante,
- Cloruro ferrico come destabilizzante e flocculante,
- Latte di calce come coagulante,

- Polielettrolita come addensante.

Il fango di flocculazione creato dal trattamento consente di assorbire le sostanze inquinanti che vengono flottate per la piccola frazione leggera e, per la frazione pesante, sedimentate nell'apposita sezione, provvista di setti lamellari in grado di esaltare l'effetto trascinate verso il basso. La parte leggera è periodicamente spurgata mediante una valvola posizionata sul pelo libero interno del bacino, mentre il fango sedimentato viene raccolto nella apposita sezione sottostante a tronco di piramide rovescia e spurgato automaticamente e in modo temporizzato con una pompa monovite, programmabile in base al tempo di funzionamento dell'impianto, e inviato ad una vasca di ispessimento provvista di tubazione di ricircolo del surnatante.

L'impianto prevede le seguenti fasi di trattamento:

- Sollevamento all'impianto di depurazione
- Preparazione, stoccaggio e dosaggio reattivi
- Destabilizzazione e flocculazione
- Chiarificazione
- Spurgo del fango
- Filtrazione e adsorbimento

SOLLEVAMENTO

Le acque da trattare, convogliate alle vasche di accumulo, vengono sollevate all'impianto a portata costante durante le ore di trattamento giornalmente previste.

Per il sollevamento dalla vasca di accumulo all'impianto di trattamento è stata prevista una elettropompa centrifuga ad asse orizzontale a girante arretrata. La pompa è pilotata da interruttori a galleggiante.

PREPARAZIONE, STOCCAGGIO E DOSAGGIO DEI REATTIVI DI DESTABILIZZAZIONE - FLOCCULAZIONE

La depurazione delle sostanze inquinanti avviene mediante precipitazione chimico-fisica dovuta a destabilizzazione, flocculazione ed inglobamento nei fiocchi di fango prodotti dal dosaggio di un sale metallico, di latte di calce e di un addensante polielettrolitico.

Tali reazioni vengono realizzate mediante fasi successive, la prima di destabilizzazione/coagulazione, la seconda di flocculazione.

Le due fasi vengono realizzate in bacini contigui provvisti di agitazione meccanica, la prima veloce e la seconda lenta.

CHIARIFICAZIONE

La separazione fra l'acqua depurata ed il fango prodotto dalla coagulazione flocculazione viene effettuata in una apposita vasca provvista di setti lamellari.

L'acqua depurata sfiora dalla canalina superiore mentre il fango si addensa sul fondo da cui viene periodicamente estratto mediante una pompa di tipo monovite eccentrica per essere inviato alla successiva disidratazione.

SPURGO ED ISPESSIMENTO DEL FANGO

L'estrazione del fango derivante dalla flocculazione viene effettuata mediante una pompa monovite di alimentazione dell'impianto di disidratazione.

La pompa ha funzionamento temporizzato e programmabile da quadro in funzione del tempo di alimentazione dell'impianto. Il fango spurgato viene inviato ad una vasca di accumulo ed ispessimento.

FILTRAZIONE E ADSORBIMENTO

L'acqua depurata viene pressurizzata da una pompa centrifuga ad asse orizzontale, pilotata da sonde di livello poste nella vasca di raccolta dell'acqua chiarificata, che provvede ad alimentare un filtro a carbone

attivo provvisto di valvole per il controlavaggio periodico del filtro, che provvede anche al successivo assestamento del letto filtrante ed al ripristino in servizio finale.

In Figura 10 è riportato il layout dell'impianto sopra descritto.

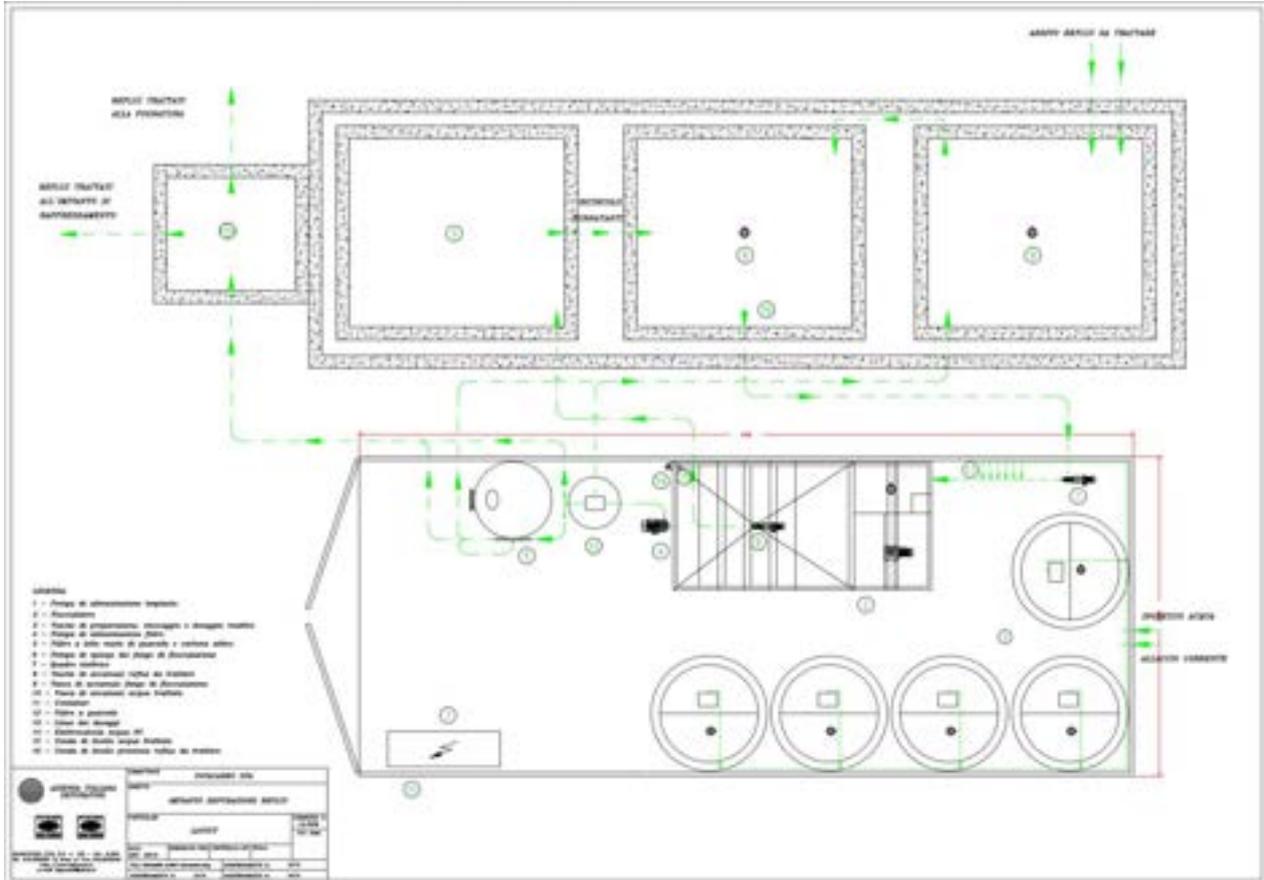


Figura 10. Layout dell'impianto di trattamento acque reflue.

L'acqua depurata può essere inviata all'impianto dimostrativo per alimentare la sezione di pulizia del syngas (scrubber) o nel caso non venga utilizzata per questo scopo può essere inviata alla rete fognaria. I parametri operativi di progetto dell'impianto sono i seguenti:

Volumi orari di dosaggio

- Acido cloridrico Dac = 1 l/h
- Soda caustica Dsc = 1 l/h
- Coagulante inorganico primario PAC (Aqualife CO 4800) = 0,15 l/h
- Polimero cationico liquido coagulante (Aqualife CO 3600 D) = 0,45 l/h
- Polielettrolita flocculante (Aqualife F 2700 CPH) = 3 l/h

Portata massima pompe dosatrici installate

- Acido cloridrico pacdil = 8 l/h
- Soda caustica pscdil = 8 l/h
- Coagulante inorganico primario PAC (Aqualife CO 4800) pcipdil = 8 l/h
- Polimero cationico liquido coagulante (Aqualife CO 3600 D) psdil = 8 l/h
- Soluzione di Polielettrolita flocculante (Aqualife F 2700 CPH) ppdil = 54 l/h

Percentuale da impostare sulle pompe dosatrici

- Acido cloridrico pcacdil = 13 %

- Soda caustica pscdil = 13%
- Coagulante inorganico primario PAC (Aqualife CO 4800) pccpdil = 2%
- Polimero cationico liquido coagulante (Aqualife CO 3600 D) pcsdil = 6%
- Soluzione di Polielettrolita flocculante (Aqualife F 2700 CPH) pppdil = 6%

Dai test condotti si è potuto constatare che vista la variabilità dei combustibili utilizzati, durante le campagne sperimentali, i reflui prodotti non mostrano sempre caratteristiche identiche. Per tale motivazione i dosaggi dei reagenti sono stati modificati e perfezionati per le diverse condizioni operative via via createsi.

L'impianto ha poi evidenziato dopo svariate ore di funzionamento anche dei limiti dovuti a depositi di inquinanti lungo le linee di adduzione chemicals delle pompe dosatrici e di scarico fanghi, questi problemi hanno portato alla messa a punto di una serie di procedure di manutenzione atte ad evitare che insorgano nuovamente i problemi sopra detti. Tali procedure prevedono:

- la pulizia settimanale delle linee delle pompe dosatrici dei reagenti tramite aspirazione di una soluzione composta da acqua e acido cloridrico all'1%;
- lo smontaggio della condotta di scarico dei fanghi e la relativa pulizia;
- lo svuotamento e la pulizia del serbatoio della soluzione polietrolitica.

In tale modo si è arrivati ad oggi ad avere un impianto funzionale e in grado di operare sia in discontinuo 8 ore al giorno per 5 giorni alla settimana, che in continuo per più di 24 ore durante i test sperimentali.

Dopo i vari step di ottimizzazione sopra descritti i parametri operativi odierni sono i seguenti:

Percentuali operative delle pompe dosatrici

- Acido cloridrico pcacdil = 20 %.
- Soda caustica pscdil = 20%.
- Coagulante inorganico primario PAC (Aqualife CO 4800) pccpdil = 10%.
- Polimero cationico liquido coagulante (Aqualife CO 3600 D) pcsdil = 20%.
- Soluzione di Polielettrolita flocculante (Aqualife F 2700 CPH) pppdil = 45%.

Volumi orari di dosaggio

- Acido cloridrico Dac = 2 l/h.
- Soda caustica Dsc = 2 l/h.
- Coagulante inorganico primario PAC(Aqualife CO 4800) =1,08 l/h.
- Polimero cationico liquido coagulante (Aqualife CO 3600 D) = 2,4 l/h.
- Polielettrolita flocculante (Aqualife F 2700 CPH) = 22,5 l/h.

È stato necessario modificare la diluizione della soluzione di polietrolita dal 2/1000 al 3/1000 dopo le ultime campagne sperimentali effettuate con un combustibile misto carbone/cippato di legno. Esso produce un refluo differente da quello prodotto dal solo carbone, in particolare possiede una concentrazione maggiore di TAR e quindi necessita di un trattamento più spinto.

Si è aggiunta al processo una sezione di dosaggio di soluzione antischiumogena per evitare la formazione eccessiva di schiume dovute alla natura dei reflui alimentanti.

4 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, modificando e studiando alcune parti quali: camicia di raffreddamento, griglia di scarico ceneri, torcia, sistema di caricamento del combustibile;
- testare il processo di gassificazione di miscele di carbone e biomasse e di carbone. I combustibili utilizzati in alimentazione sono stati carbone Colombiano e 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).

4.1 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 (escluso lo spegnimento). I test sono stati effettuati nelle seguenti date:

- 10-12/02/2016, effettuato con carbone Colombiano;
- 06-08/04/2016, effettuato con una miscela di carbone Colombiano (90% in peso) e cippato di pino (10% in peso) (Cip6);
- 04-07/07/2016, effettuato con una miscela di carbone Colombiano (90% in peso) e cippato di pino (10% in peso) (Cip6);
- 05-08/09/2016, effettuato con carbone Colombiano.

Nella Tabella 1 sono riportati i test sperimentali effettuati nel 2016.

Tabella 1. Test sperimentali con biomasse e con mix di carbone e biomasse.

Data	Obiettivo principale	Sperimentazione (ore)
10-12/02/2016	Gassificazione carbone Colombiano	56:00
06-08/04/2016	Co-Gassificazione carbone Colombiano/cippato di pino	56:00
04-07/07/2016	Co-Gassificazione carbone Colombiano/cippato di pino	80:00
05-08/09/2016	Gassificazione carbone Colombiano	80:00
	Totale	272

4.2 Combustibili impiegati

Come risulta dalla Tabella 2, i test sperimentali sulla piattaforma pilota sono stati eseguiti con differenti tipologie di combustibili. Questi 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 4.3. In particolare, i combustibili impiegati sono principalmente i seguenti:

- Carbone colombiano: carbone sub-bituminoso;
- Cip6: cippato di legno di pino proveniente da Villaspeciosa (Cagliari – Sardegna).

Tabella 2. Caratterizzazione dei combustibili impiegati nei test.

Nome	Carbone Colombiano	Cip6
Classificazione	Sub-bituminoso	Pinus Pinea
Provenienza	Colombia	Villaspeciosa
Densità a mucchio (kg/m³)		
Densità	850	250
Analisi immediata (% in massa)		
Carbonio fisso	57,49	21,09
Umidità	3,12	9,25
Volatili	35,00	66,92
Ceneri	4,40	2,75
Analisi elementare (% in massa)		
Carbonio totale	86,85	50,88
Idrogeno	5,22	6,71
Azoto	1,65	0,50
Zolfo	0,53	0,08
Analisi calorimetrica (MJ/kg)		
Pot. Calor. Sup. Secco	32,29	19,64
Pot. Calor. Inf. Secco	31,09	17,97
Pot. Calor. Inf. Tal quale	30,04	16,08

4.3 Strumenti e metodi di analisi

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

4.3.1 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 4.2, sono la media di un'analisi termogravimetrica effettuata su diversi campioni di ciascun combustibile macinati in tempi diversi nel corso della campagna sperimentale.

4.3.2 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 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.

4.3.3 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.

I risultati finali delle analisi, riportati in Tabella 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 4.2). In particolare, i poteri calorifici superiore e inferiore possono essere calcolati, rispettivamente, secondo le due seguenti formule (la prima espressa in forma semplificata):

$$PCS [kJ/kg] = 33950 * X_C + 144200 * (X_{H_2} - X_{O_2}/8) + 9400 * X_S \quad (4.1)$$

$$PCI_0 [kJ/kg] = PCS - 2400 * (X_{H_2O} + 9 * X_{H_2}) \quad (4.2)$$

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. 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 4.2.

Il potere calorifico inferiore sul tal quale è determinato a partire dalla percentuale di umidità presente nel combustibile. L'umidità del combustibile 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:

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

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

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

L'energia effettivamente utilizzabile dal punto di vista pratico, non è il potere calorifico inferiore sul secco (PCI_0 , calcolato secondo la 4.2) 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:

$$PCI [kJ/kg] = (1-U)*PCI_0 - U*r = PCI_0 - U * (PCI_0+r) \quad (4.3)$$

5 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.

5.1 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.

5.3 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 dal valore di accensione 50 kg/h (aria agli irradiator) fino al valore previsto per i test sperimentali all'incirca 650 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 big-bag per step 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);
- 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 800 °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: da 150 a 200 kg/h;

- reintegro acqua scrubber: livelli costanti a 1600 mm;
- Reintegro STEAM DRUM: livello costante a 217 mm.

5.4 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.

6 Test sperimentali di gassificazione e co-gassificazione

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto sono stati effettuati due test di gassificazione con carbone colombiano al 100% e due test di co-gassificazione di carbone colombiano e cippato di legno di origine forestale locale; i test sperimentali hanno avuto una differente durata: 48 ore per i primi due, 72 ore per il terzo ed il quarto. In Tabella 3 è riportata la caratterizzazione dei combustibili impiegati nelle prove.

Tabella 3. Caratterizzazione delle miscele di carbone colombiano e cippato di legno.

Nome	Carbone Colombiano	Cip6	Mix
			90% Carbone 10% Cip6
Classificazione	Sub-bituminoso	Pinus Pinea	Sub-bituminoso Pinus Pinea
Provenienza	Colombia	Villaspeciosa	
Densità a mucchio (kg/m³)			
Densità	850	250	685
Analisi immediata (% in massa)			
Carbonio fisso	57,49	21,09	54,47
Umidità	3,12	9,25	3,12
Volatili	35,00	66,92	38,68
Ceneri	4,40	2,75	3,75
Analisi elementare (% in massa)			
Carbonio totale	86,85	50,88	85,15
Idrogeno	5,22	6,71	5,27
Azoto	1,65	0,50	1,56
Zolfo	0,53	0,08	0,44
Analisi calorimetrica (MJ/kg)			
Pot. Calor. Sup. Secco	32,29	19,64	30,89
Pot. Calor. Inf. Secco	31,09	17,97	29,68
Pot. Calor. Inf. Tal quale	30,04	16,08	28,68

6.1 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 10-12/02/2016

L'analisi del processo di gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 10-12/02/16 (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, 100 kg/h circa di carbone colombiano con potere calorifico inferiore pari a 30 MJ/kg. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 500-600 m³/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".

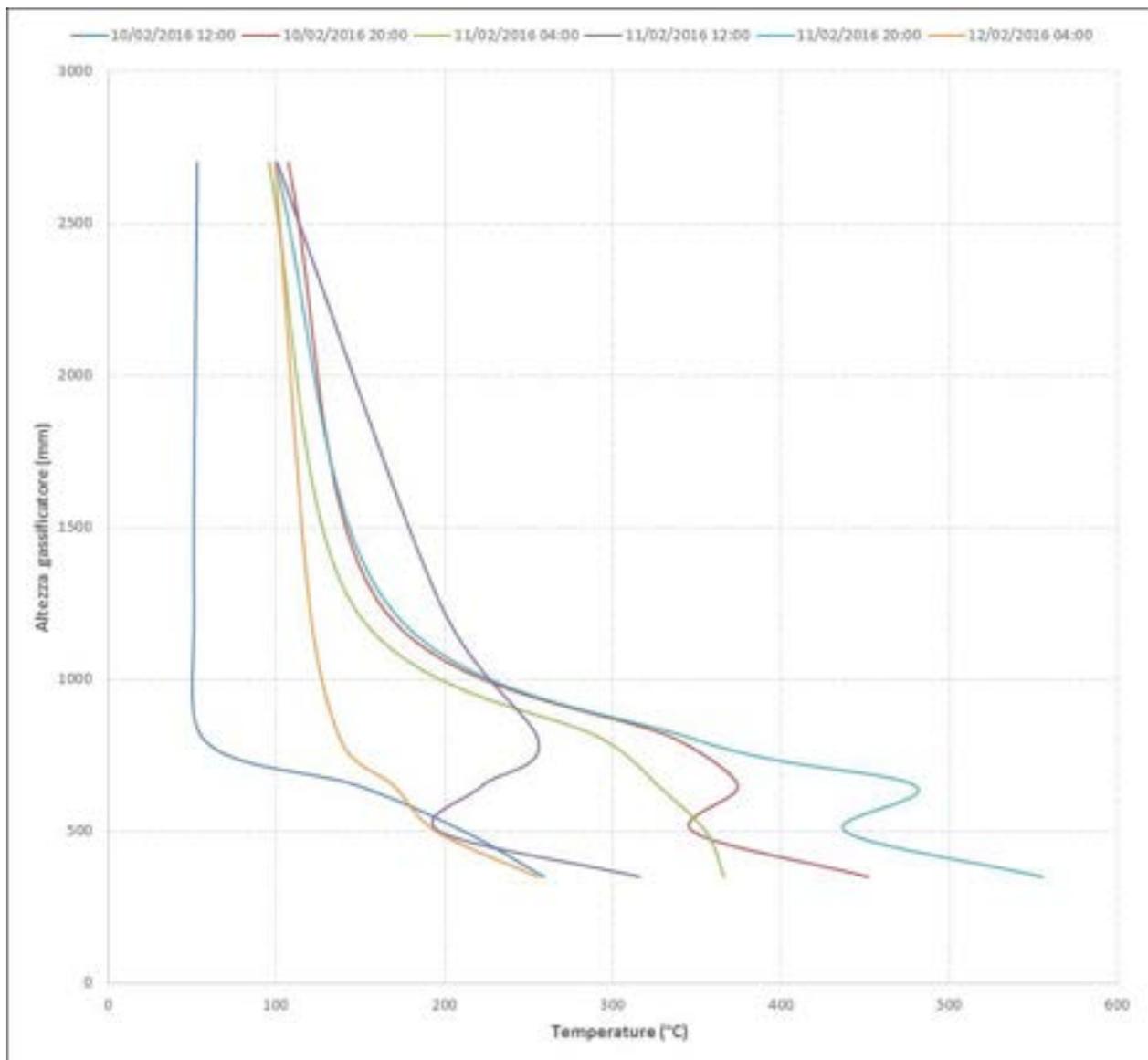


Figura 11. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 10-12/02/2016.

In Figura 12 e Figura 13 è mostrato 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.

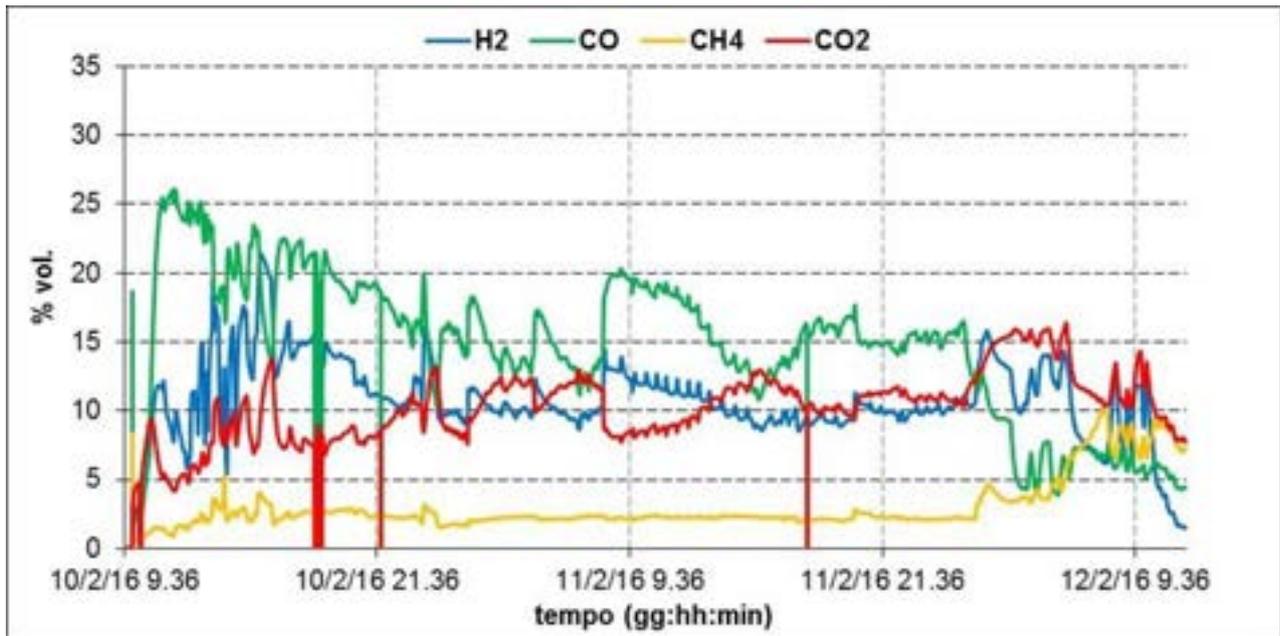


Figura 12. Andamento della composizione del syngas alla DJ001P durante la prova del 10-12/02/2016.

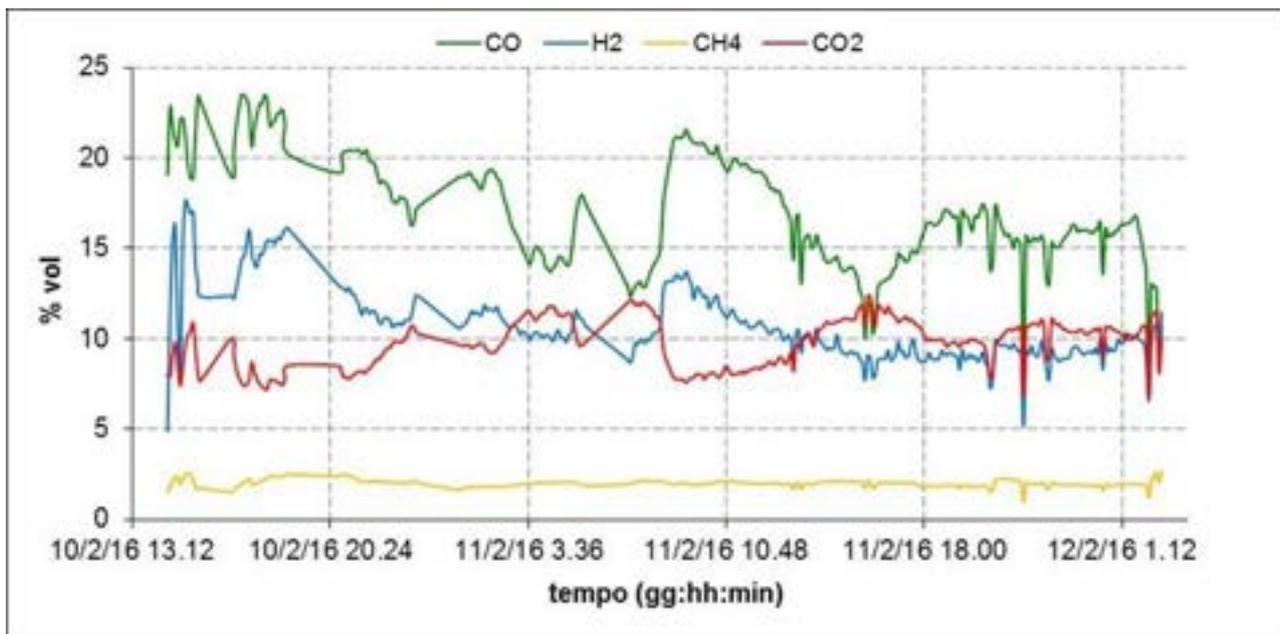


Figura 13. Andamento della composizione del syngas alla DJ002P durante la prova del 10-12/02/2016.

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 10,6%, quella di CO pari a circa il 17%, quella di CH₄ pari al 2% e quella di CO₂ pari a circa 9,8% per un rapporto CO/CO₂ pari a 1,7 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 0,62 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 valori compresi fra i 600 e i 700 m³/h.

Di seguito si riportano nella Tabella 4 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e del combustibile consumato.

Tabella 4. Dati processo di gassificazione del 10-12/02/2016.

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	100
Aria (kg/h)	650
Vapore (kg/h)	-
<i>Composiz. syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,1699
CO ₂	0,0977
H ₂	0,1065
CH ₄	0,0199
H ₂ S	0,0009
<i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (m ³ /h)	600-700
LHV (MJ/kg)	3,417

Come riportato in Tabella 5, la percentuale di carbonio fisso riscontrata sugli scarichi è compresa fra il 35 e il 55%, ciò indica la possibilità di migliorare ulteriormente la conduzione del processo di gassificazione.

Tabella 5. Analisi di laboratorio relative agli scarichi: SC1 - Scarico delle ore 18:00 del 10/02/2016, SC2 - Scarico delle ore 23:30 del 10/02/2016, SC4 - Scarico delle ore 08:30 del 11/02/2016, SC6 - Scarico delle ore 18:45 del 11/02/2016.

Sample Name	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed Carbon %
SC1	0,82	18,90	43,44	36,86
SC2	0,47	4,36	49,72	45,45
SC4	0,40	3,18	58,33	38,10
SC6	0,38	1,88	43,46	54,30

6.2 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di cogassificazione del 06-08/04/2016

Nel corso della prova sperimentale del 06-08/04/2016 (56 ore), sono stati gassificati mediamente 80 kg/h di miscela 90/10 (Carbone colombiano/Cippato di legna vergine Cip6) di combustibile con potere calorifico inferiore pari 28,68 MJ/kg.

La portata di aria utilizzata si è attestata sui 450-550 m³/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".

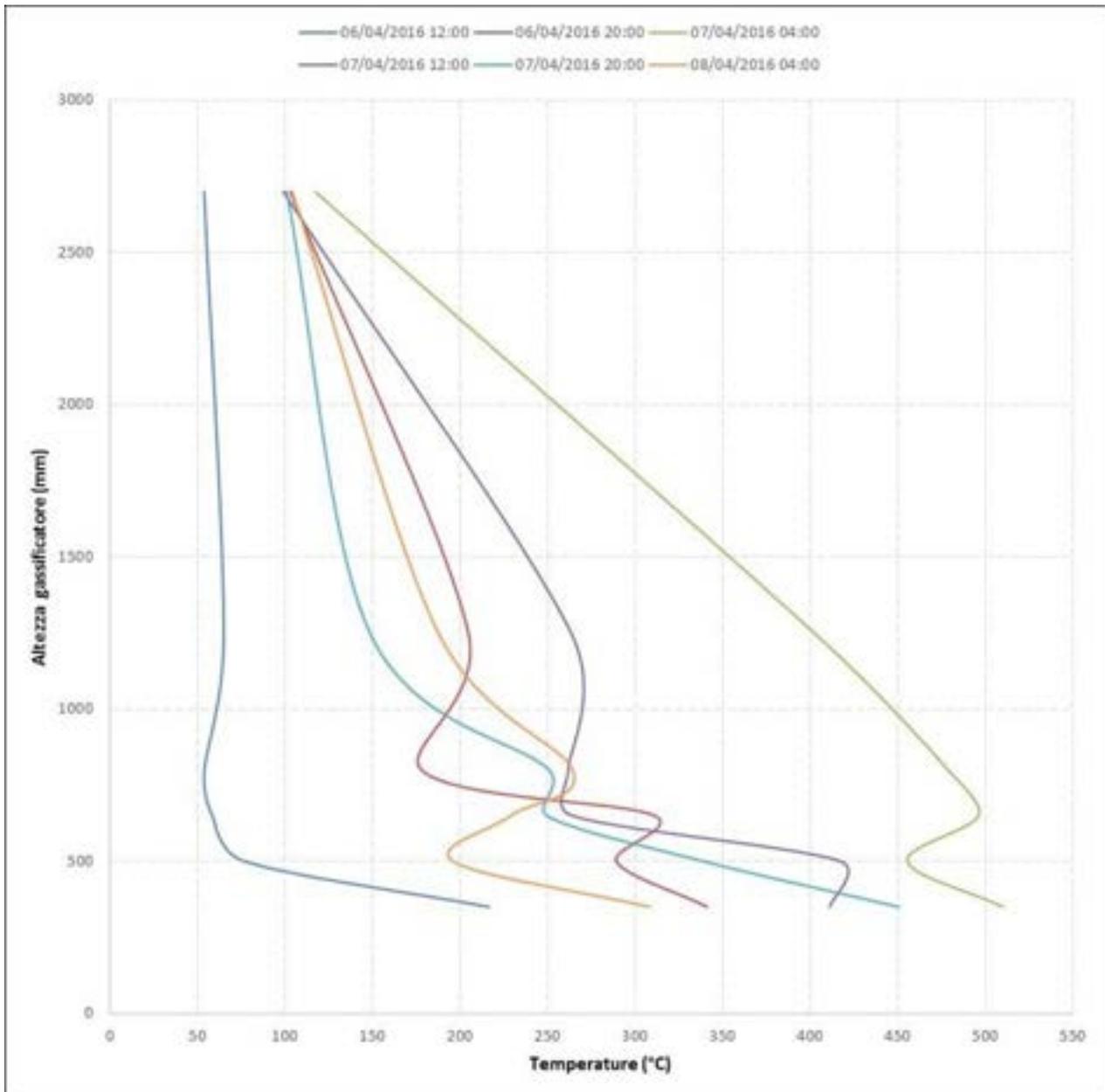


Figura 14. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di cogassificazione del 06-08/04/2016.

In Figura 15 e Figura 16 è mostrato 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

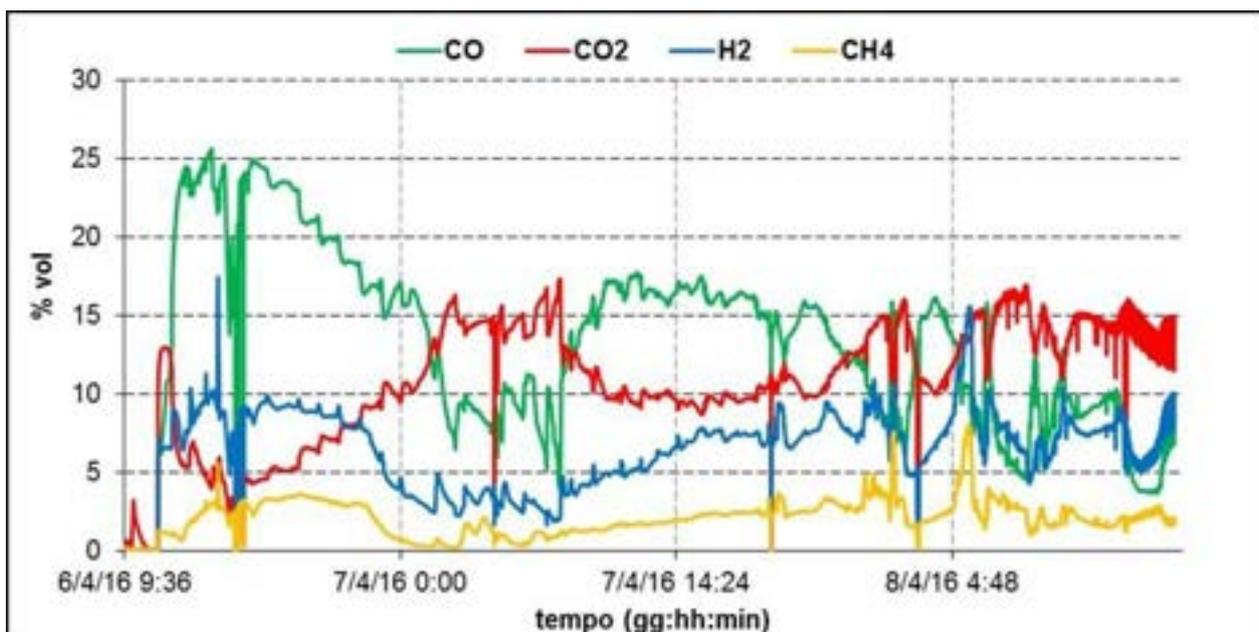


Figura 15. Andamento della composizione del syngas alla DJ001P durante la prova del 06-08/04/2016.

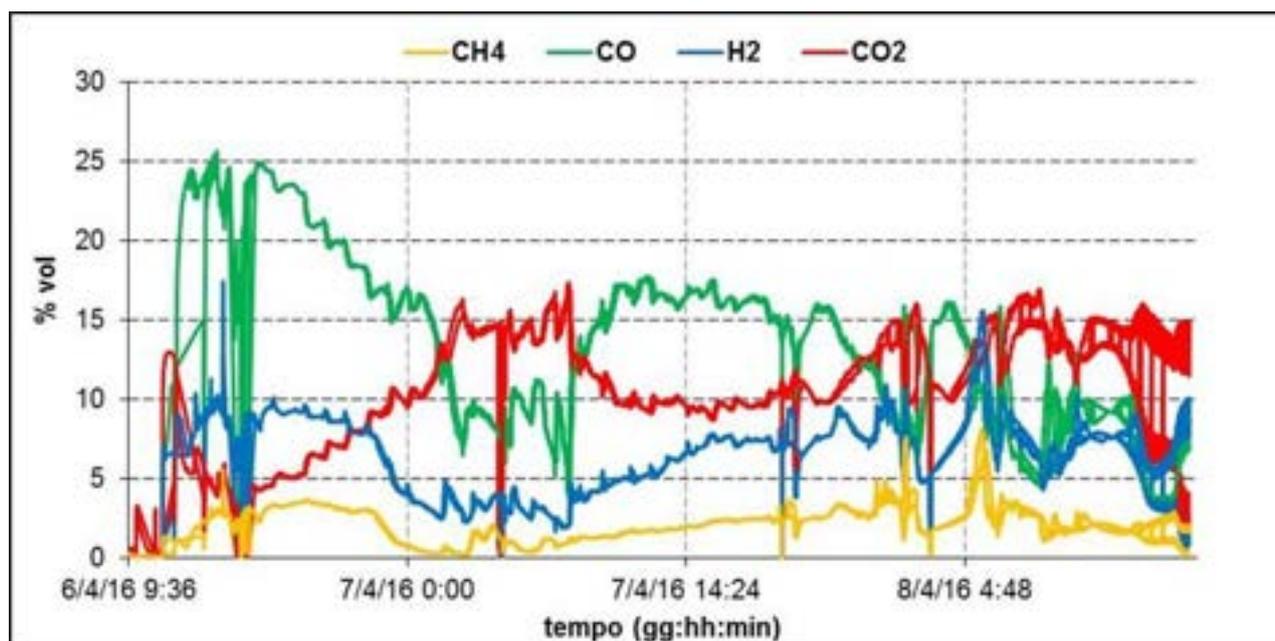


Figura 16. Andamento della composizione del syngas alla DJ002P durante la prova del 06-08/04/2016.

Dal momento in cui il sistema raggiunge le condizioni di funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 6,5%, quella di CO pari a circa il 15,4%, quella di CH₄ pari al 2,2% e quella di CO₂ pari a circa 10,3% per un rapporto CO/CO₂ pari circa 1,5 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 0,42 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 valori compresi fra i 550 e i 650 m³/h (con una portata di aria intorno a 450-550 m³/h ed una portata di combustibile in ingresso di circa 80 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 cogassificazione del 06-08/04/2016.

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	80
Aria (m ³ /h)	450-550
Vapore (kg/h)	-
<i>Composiz. syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,1537
CO ₂	0,1032
H ₂	0,0658
CH ₄	0,0217
H ₂ S	0,0033
<i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (m ³ /h)	550-650
LHV (MJ/kg)	2,783

Tabella 7. Analisi delle ceneri - SC1 - Scarico ore 15:20 del 06/04/2016 - SC3 - Scarico delle 23:00 del 06/04/2016 - SC5 - Scarico delle 11:30 del 07/04/2016 - SC7 - Scarico delle 23:16 del 07/04/2016.

Sample Name	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed C %	Total C %	H %	N %	HHV MJ/Kg	LHV ₀ MJ/Kg	LHV MJ/Kg
SC1	0,70	10,56	53,07	35,67	47,45	0,00	0,95	14,42	14,40	14,28
SC3	0,12	4,73	57,09	38,06	42,95	0,00	0,49	12,96	12,96	12,94
SC5	0,16	1,46	60,26	38,13	39,90	0,00	0,47	6,93	6,93	6,91
SC7	0,16	0,97	47,37	51,51	55,65	0,00	0,66	11,65	11,65	11,62

Come si evince dalla Tabella 7 l'analisi del carbonio fisso contenuto negli scarichi del gassificatore evidenzia una percentuale compresa fra il 35 e il 51%; questo, insieme all'elevato valore del potere calorifico delle ceneri, indica la possibilità di migliorare ulteriormente le condizioni di gassificazione all'interno del reattore.

6.3 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di cogassificazione del 04-07/07/2016

Questa analisi del processo di co gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 04-07/07/16 (80 ore). Nel corso della prova sperimentale sono stati gassificati mediamente, è stata gassificata una miscela 90/10 (Carbone colombiano/Cippato di legna vergine Cip6) di combustibile con potere calorifico inferiore pari 28,68 MJ/kg, al ritmo di:

- 200 kg/h durante la giornata del 04/07/2016;
- 150 kg/h durante la giornata del 05/07/2016;
- 100 kg/h durante la giornata del 06/07/2016.

Considerando unicamente la fase di funzionamento a regime del gassificatore, la portata di combustibile utilizzata è stata di 130 kg/h. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 550-600 m³/h nei periodi di regime del gassificatore.

Durante la sperimentazione è stata inoltre mantenuta una portata costante di vapore di 80 kg/h, a partire dalle ore 17:45 della prima giornata di test.

La Figura 17 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".

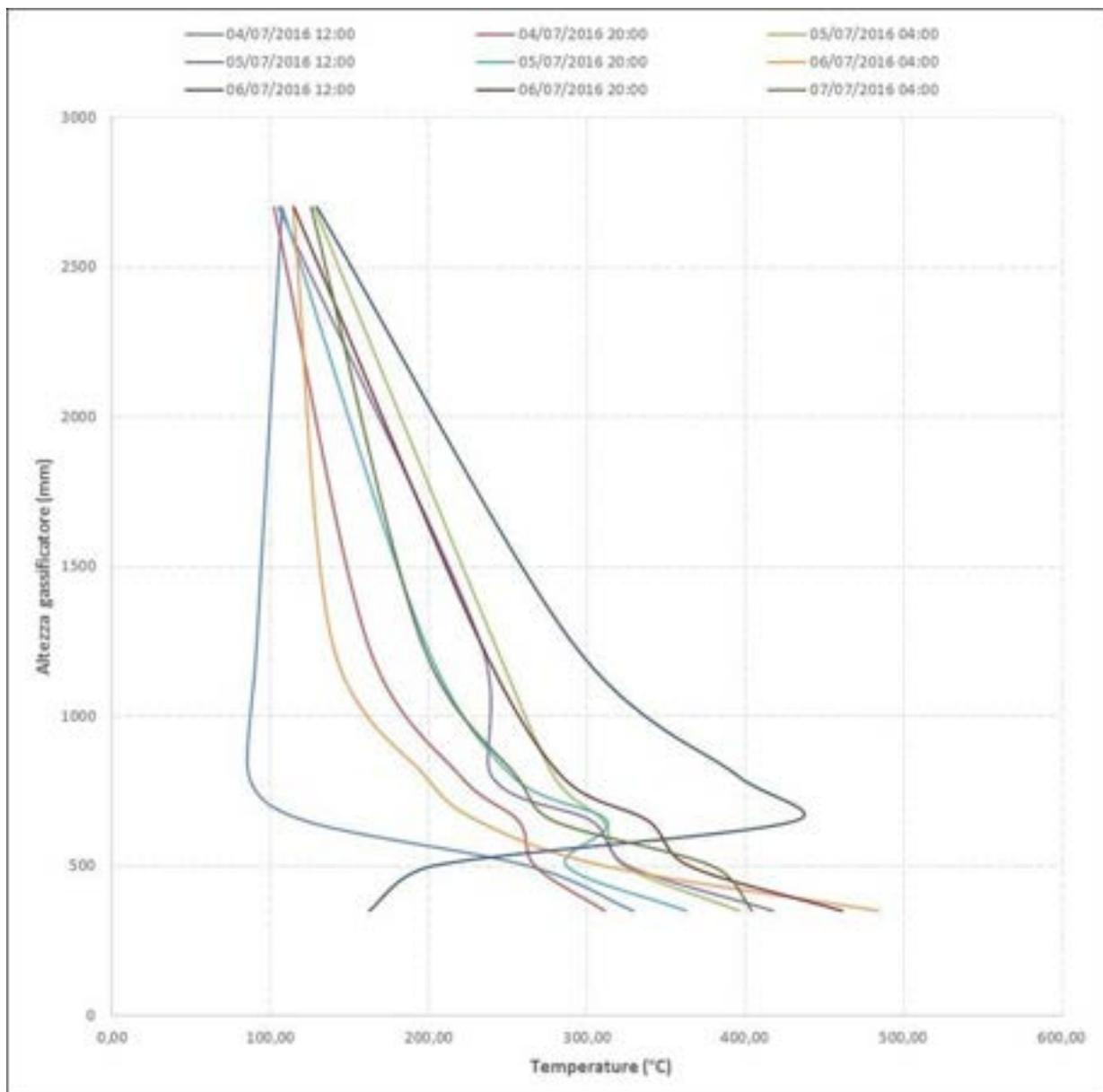


Figura 17. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 04-07/07/2016.

In Figura 18 e Figura 19 è mostrato 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.

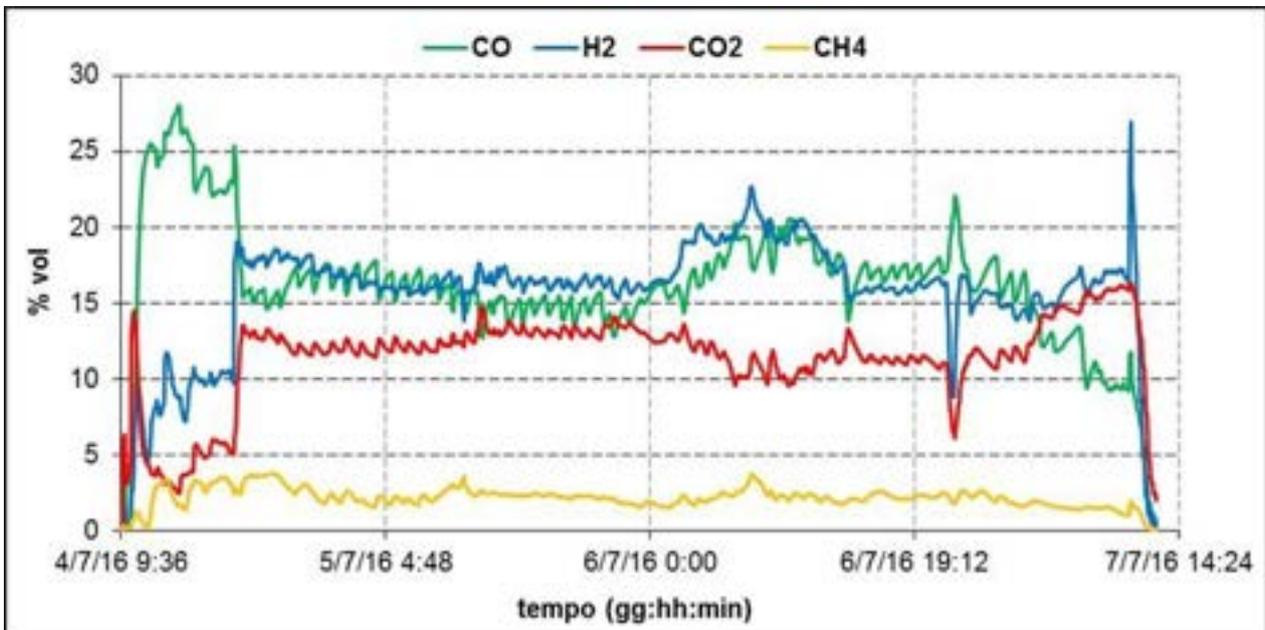


Figura 18. Andamento della composizione del syngas alla DJ001P durante la prova del 04-07/07/2016.

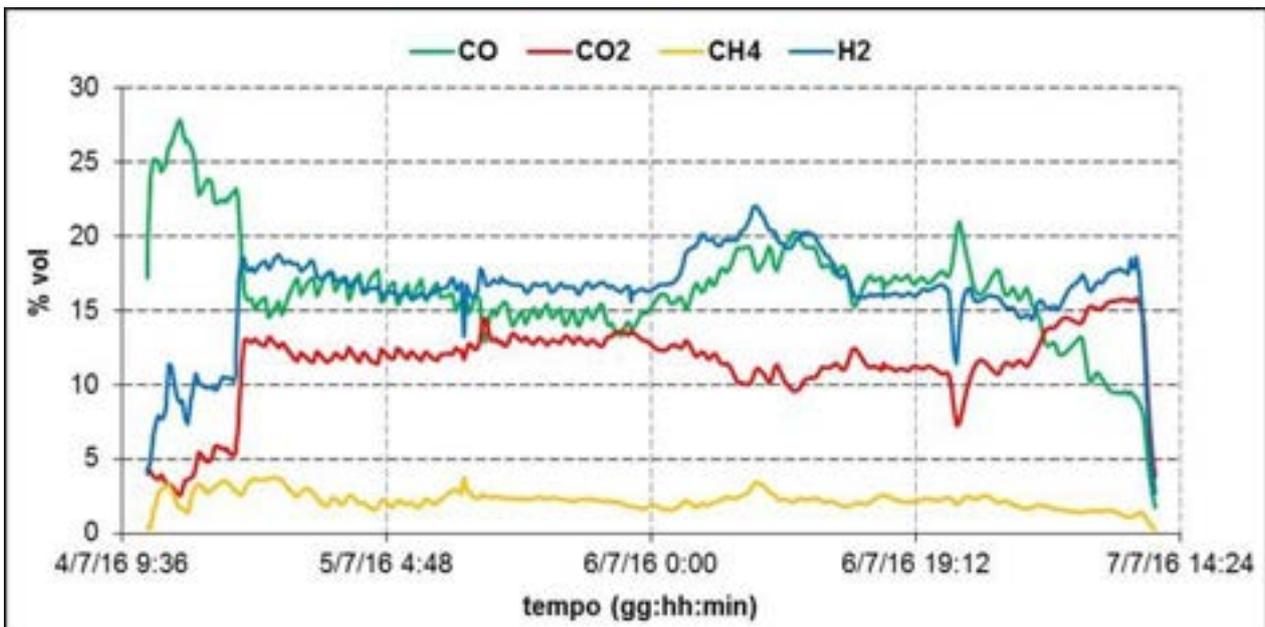


Figura 19. Andamento della composizione del syngas alla DJ002P durante la prova del 04-07/07/2016.

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 16,9%, quella di CO pari al 16,66%, quella di CH₄ pari al 2,33% e quella di CO₂ pari a circa 11,61% per un rapporto CO/CO₂ pari a 1,43 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 1,01 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 valori oscillanti intorno ai 750 m³/h. Di seguito riportiamo nella Tabella 8 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 8. Dati processo di cogassificazione del 04-07/07/2016.

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	130
Aria (kg/h)	675
Vapore (kg/h)	80
<i>Composiz. syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,1666
CO₂	0,1161
H₂	0,1692
CH₄	0,0233
H₂S	0,0037
<i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (m³/h)	750
LHV (MJ/kg)	4,240

Tabella 9. Analisi relative agli scarichi: SC1 - Scarico delle ore 16:00 del 04/07/2016, SC2 - Scarico delle ore 21:00 del 04/07/2016, SC5 - Scarico delle ore 13:30 del 05/07/2016, SC7- Scarico delle ore 02:00 del 06/07/2016, SC8 – Scarico delle ore 08:30 del 06/07/2016, SC9 – Scarico delle ore 14:00 del 07/07/2016.

Sample Name	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed Carbon %	C %	H %	N %	HHV MJ/Kg	LHV0 MJ/Kg	LHV MJ/Kg
SC1	0,19	5,44	40,38	54,01	64,70	0,02	0,62	19,18	19,17	19,13
SC2	0,61	5,79	42,35	51,26	60,65	0,13	0,82	18,65	18,61	18,48
SC5	0,69	4,62	56,90	37,80	46,90	0,13	0,70	13,05	13,01	12,90
SC7	0,15	7,17	62,02	30,66	35,95	0,13	0,55	10,99	10,96	10,94
SC8	0,61	4,23	40,22	54,95	63,60	0,21	0,92	19,11	19,05	18,92
SC9	0,51	3,77	53,12	42,62	49,50	0,22	0,81	14,30	14,24	14,16

Come si evince dalla Tabella 9 l'analisi del carbonio fisso contenuto negli scarichi del gassificatore evidenzia una percentuale compresa fra il 30 ed il 55%; questo suggerisce la possibilità di migliorare ulteriormente le condizioni di gassificazione all'interno del reattore.

6.4 Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 05-08/09/2016

L'analisi del processo di gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 05-09/09/16 (80 ore). Nel corso della prova sperimentale, sono stati gassificati mediamente, considerando unicamente i periodi in cui il gassificatore si trovava in condizioni di regime, 100 kg/h circa di carbone colombiano con potere calorifico inferiore pari a 30 MJ/kg. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 550-650 m³/h nei periodi di regime del gassificatore. Durante la sperimentazione è stata inoltre mantenuta una portata di vapore di 85-90 kg/h, a partire dalle ore 11:00 della seconda giornata di test.

La Figura 20 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".

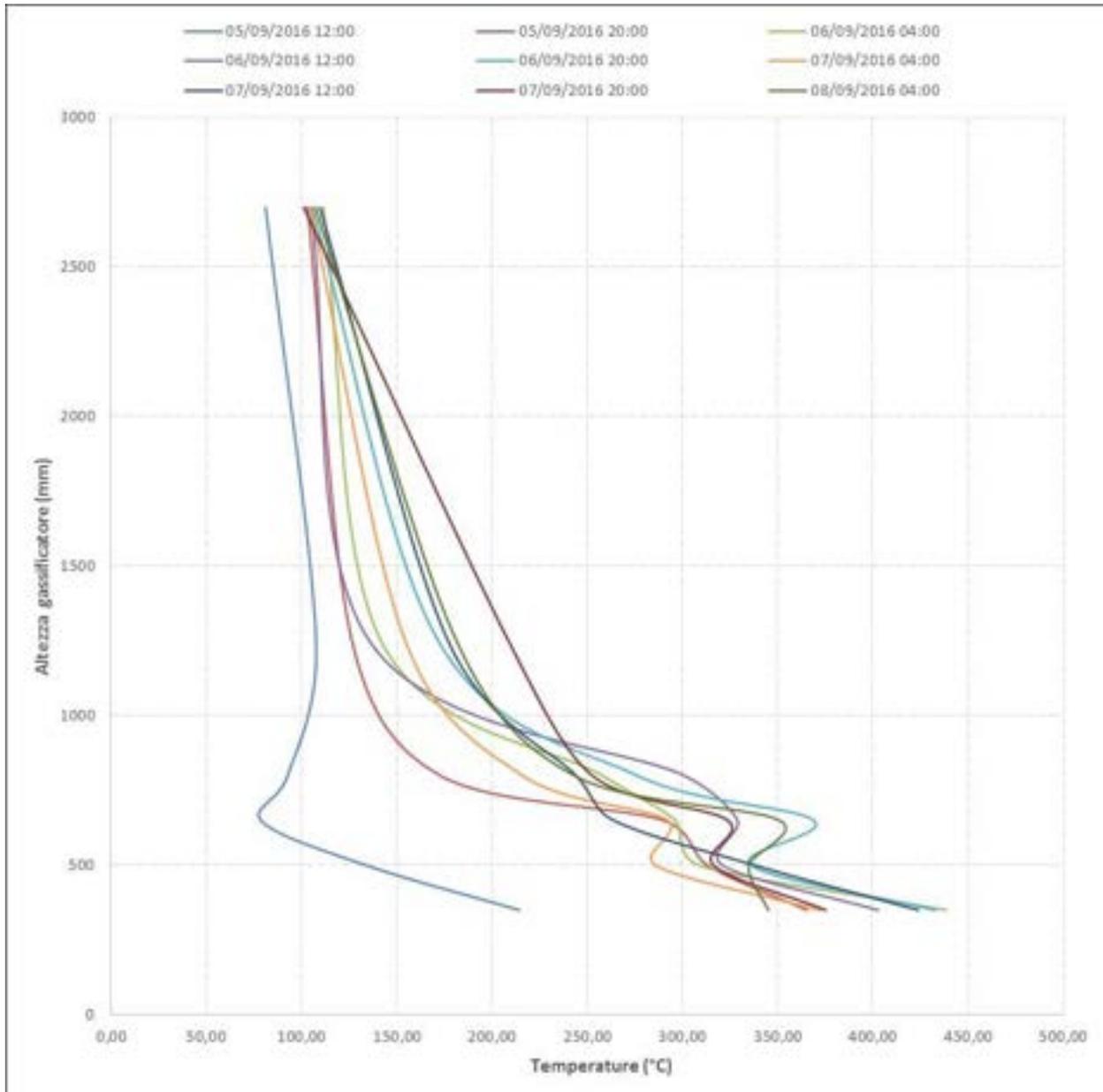


Figura 20. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 05-08/09/2016.

In Figura 21 e Figura 22 è mostrato 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.

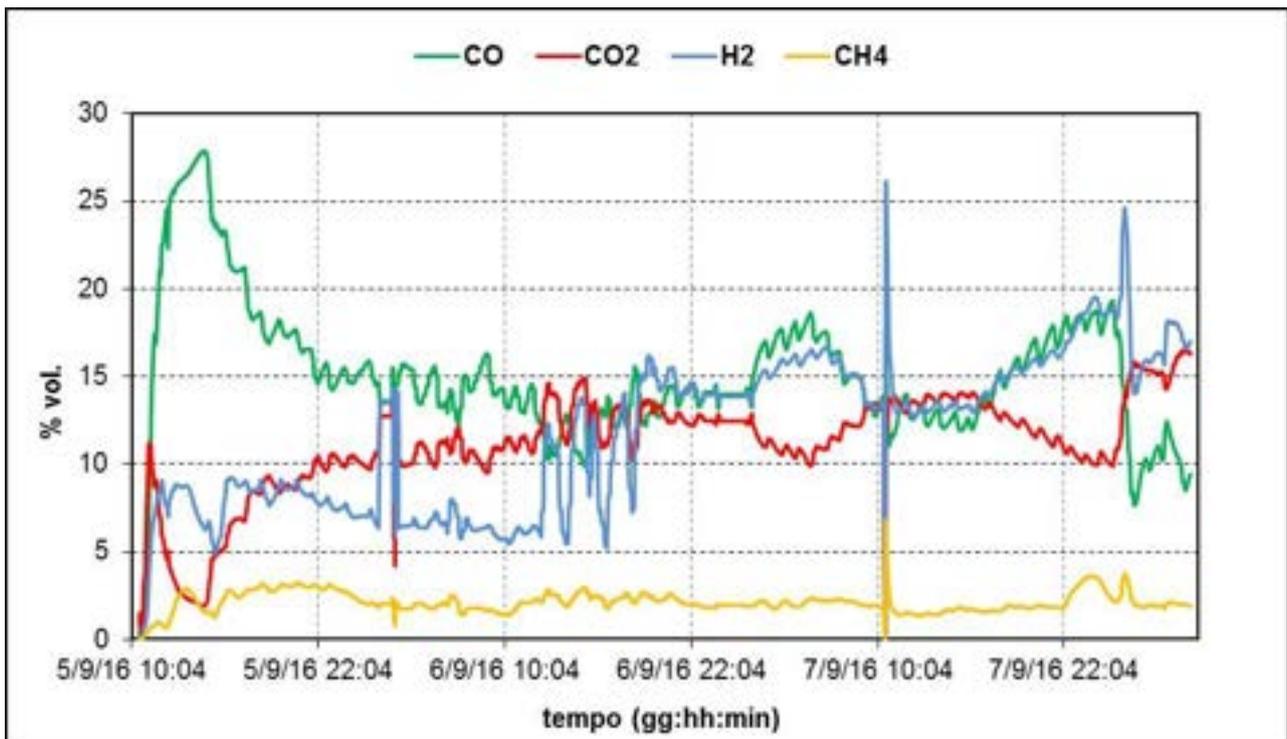


Figura 21. Andamento della composizione del syngas alla DJ001P durante la prova del 05-08/09/2016.

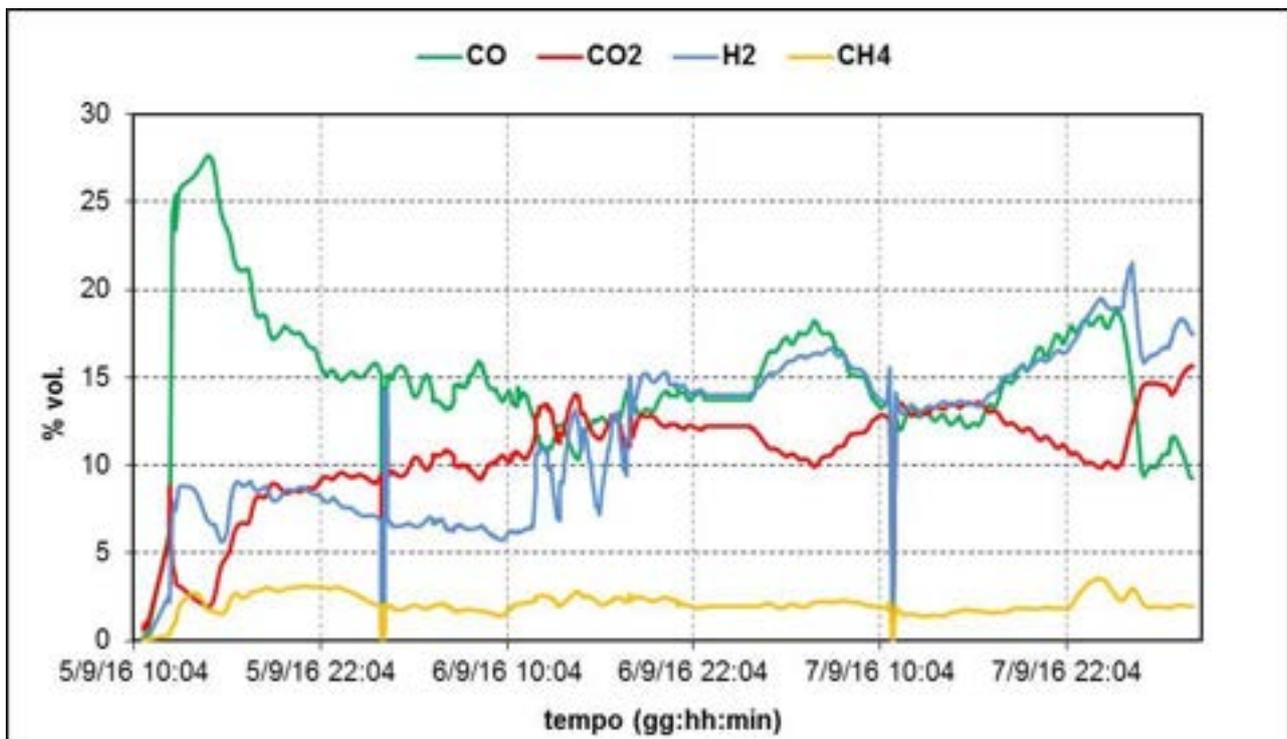


Figura 22. Andamento della composizione del syngas alla DJ002P durante la prova del 05-08/09/2016.

Dal momento in cui il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 11,2%, quella di CO pari a circa il 14,1%, quella di CH₄ pari al 2,1% e quella di CO₂ pari a circa 11,8% per un rapporto CO/CO₂ pari a 1,2 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H₂/CO pari a 0,95 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 test sperimentale il misuratore di portata syngas ha restituito

valori compresi fra i 650 e i 700 m³/h. Di seguito si riportano nella Tabella 10 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.

Tabella 10. Dati processo di gassificazione del 05-08/09/2016.

<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	100
Aria (kg/h)	670
Vapore (kg/h)	85
Composiz. syngas (fraz. molari su base secca)	
CO	0,1411
CO₂	0,1180
H₂	0,1120
CH₄	0,0210
H₂S	0,0035
Proprietà del syngas grezzo (su base secca)	
Portata volumetrica (m³/h)	650-700
LHV (MJ/kg)	3,80

Ulteriori indicazioni sulle prestazioni del processo di gassificazione del test sperimentale del 05-08 Settembre 2016, saranno ottenibili a seguito delle analisi, tuttora in corso, sulla percentuale di carbonio fisso contenuta nel materiale di scarico.

Nel corso della sperimentazione è stata effettuata una verifica di funzionamento del gruppo elettrogeno, provvedendo all'alimentazione del motore con il syngas prodotto durante la prova.

Durante il test si è sperimentato un nuovo filtro a cippato per il sistema di filtrazione a monte del motore, in sostituzione ai già descritti filtri di carta. L'utilizzo di questi ultimi aveva in precedenza dato problematiche di intasamento, con conseguente calo delle prestazioni del motore, a causa dell'elevato contenuto in polveri, TAR e umidità nel syngas utilizzato.

La prova di funzionamento, della durata di circa 20', portata avanti con la generazione di una potenza elettrica pari a 18 kWe, ha permesso di valutare la qualità del combustibile in relazione al processo di generazione elettrica.

Nonostante il potere calorifico del syngas risulti sufficiente per l'alimentazione del motore, un sistema di clean-up e filtrazione più efficiente risulta necessario, come indicato nel report "Progettazione e realizzazione modifiche e migliorie dell'impianto dimostrativo di gassificazione Sotacarbo".

In Figura 23 è riportato l'andamento della pressione e della portata del syngas in alimentazione al motore.

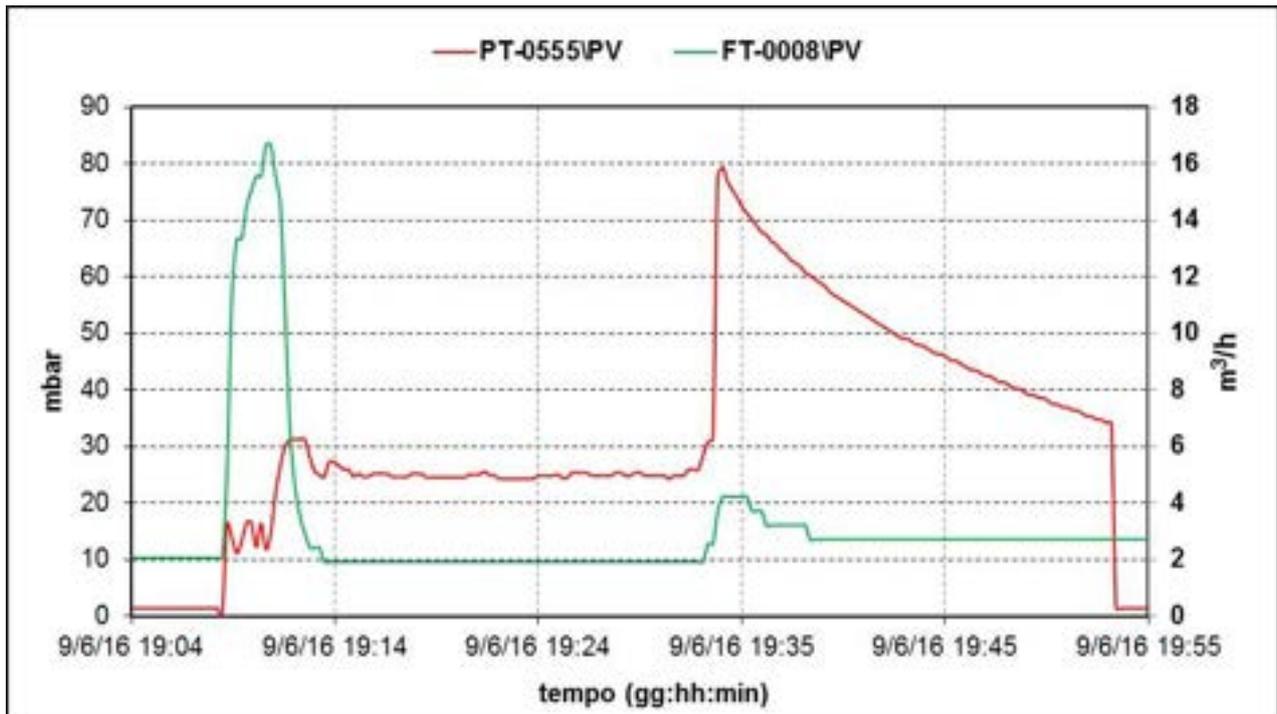


Figura 23. Andamento della portata e della pressione del syngas in alimentazione al motore durante la prova del 05-08/09/2016.

7 Campionamento TAR

Nel syngas prodotto dalla gassificazione del carbone e dalla co-gassificazione di carbone e biomassa 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 11:

Tabella 11. Tipologie di TAR secondo le definizioni dell'ECN

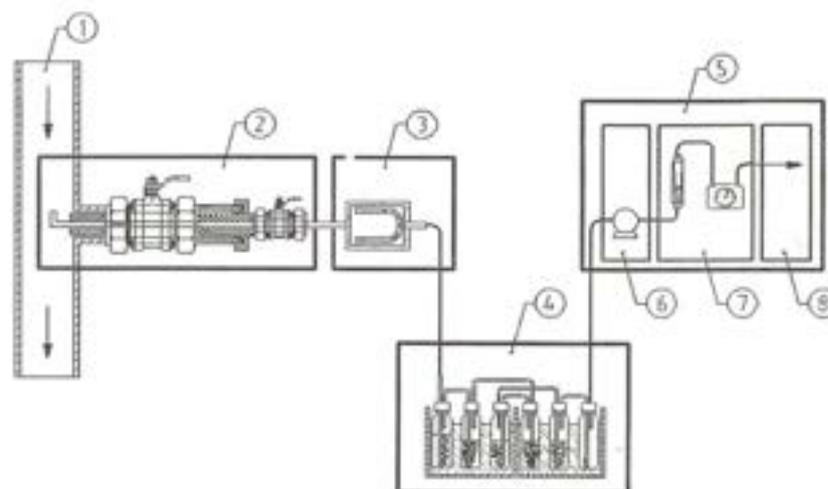
Class	Type	Examples
1	GC undetectable tars.	biomass fragments, heaviest tars (pitch)
2	Heterocyclic compounds. These are components that generally exhibit high water solubility.	phenol, cresol, quinoline, pyridine
3	Aromatic components. Light hydrocarbons, which are important from the point view of tar 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 diversi combustibili come carbone e biomassa 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.

La quantità e composizione dei TAR cambiano molto sia in funzione del tipo di combustibile alimentato, 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 fornisce indicazioni sulla quantità e sulla identificazione dei composti presenti nel TAR prodotto con determinate condizioni operative e di alimentazione dell'impianto Dimostrativo Sotacarbo.

Il sistema di campionamento generalmente adottato per la cattura dei TAR è schematizzato in Figura 24 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 24. Schema semplificato del sistema di campionamento dei TAR

Il sistema di campionamento del TAR è stato testato in occasione di diverse prove sperimentali condotte sull'impianto dimostrativo. Nel dettaglio sono stati presi in considerazione i seguenti test sperimentali, condotti anche con diverse tipologie di alimentazione:

- 4-7 luglio 2016 con alimentazione a carbone colombiano (90%) e cippato di pino (10%);
- 5-8 settembre 2016 con alimentazione a carbone colombiano.

In occasione dei suddetti test sperimentali 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 25). 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 26.



Figura 25. Punto di campionamento gas in corrispondenza del condotto uscente dalla sommità del gassificatore



Figura 26. 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 12 si riporta il dettaglio dei campionamenti effettuati durante l'anno 2016, nel corso delle sperimentazioni di gassificazione di carbone e di co-gassificazione di carbone e biomassa.

Tabella 12. Campionamenti di TAR effettuati nel 2016 nel corso delle prove di gassificazione di carbone e co-gassificazione di carbone e biomassa.

	<i>Data</i>	<i>Durata</i>	<i>Volume gas campionato [l]</i>	<i>Tipologia combustibile</i>
C1	05 lug	85'	263	Carbone + cipp. pino
C2	05 lug	50'	51	Carbone + cipp. pino
C3	6 set	60'	210	Carbone
C4	6 set	100'	366	Carbone

Ciascun 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 di ciascun test di campionamento effettuato il contenuto dei condensatori è stato messo assieme (circa 300 ml di soluzione) in un recipiente in vetro e conservato in frigorifero.

Successivamente ciascun campione è stato filtrato utilizzando un sistema di filtrazione (Figura 27) 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 27. 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.

Specie in alcuni campionamenti effettuati, 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 dalle prove di campionamento eseguite presso l'impianto dimostrativo e dalle successive analisi condotte nei laboratori Sotacarbo.

Campionamento del 05/07/2016.

Sono stati effettuati due diversi campionamenti in occasione del test sperimentale condotto utilizzando come combustibile una miscela di carbone colombiano e di cippato di pino. Nel primo campionamento eseguito non si è osservata un'elevata presenza di polveri; la soluzione di partenza ha acquisito una colorazione bruna per effetto della raccolta di parte della sostanza più viscosa e oleosa, avvenuta principalmente nel tubo di raccordo tra il filtro e il primo condensatore. A campionamento concluso, dopo aver smontato il filtro in quarzo posto in corrispondenza della sonda riscaldata, si è osservato un elevato deposito di materiale oleoso e viscoso dalla colorazione bruna in corrispondenza del filtro stesso e delle parti in acciaio che lo contengono.

Nel secondo campionamento si è rinunciato a posizionare il filtro in quarzo, cosicché il syngas è arrivato più facilmente nei condensatori: specie nel primo dei tre si è registrata una colorazione bruno-giallastra del solvente (di base trasparente).

Ciascun campione (volume di circa 300 ml) è stato poi filtrato in laboratorio. In Figura 28 sono mostrati i due filtri utilizzati per la separazione dei campioni, dopo l'essiccazione in stufa.



Figura 28. Particolare dei filtri utilizzati per la separazione dei due campioni .

Successivamente parte del campione filtrato è stato sottoposto ad evaporazione per separare, ulteriormente, la frazione più pesante.

La Tabella 13 riporta i dati ottenuti sui campioni in esame.

Tabella 13. Dati ottenuti sui campioni del 05/07/2016.

	<i>Massa solido dopo filtrazione [g]</i>	<i>Massa solido dopo evaporazione [g]</i>	<i>Concentrazione nel gas [g/m³]</i>
C1	0,1	0,9	3,8
C2	0,08	0,48	10,98

Campionamento del 06/09/2016.

Il test sperimentale è stato condotto con il solo utilizzo di carbone colombiano come combustibile. Le prove di campionamento effettuate hanno rivelato una modestissima cattura di polveri e TAR con le soluzioni di solvente pressoché invariate nella colorazione. Come nelle prove precedenti, buona parte dei composti pesanti è rimata intrappolata nel sistema costituito dal filtro in quarzo e dai raccordi metallici che lo

contenevano. Sui campioni raccolti è stata eseguita la sola filtrazione ma si è rinunciato ad effettuare l'evaporazione, data l'esigua quantità di campione raccolto.

Tabella 14. Dati ottenuti sui campioni del 06/09/2016

	<i>Massa solido dopo filtrazione [g]</i>	<i>Massa solido dopo evaporazione [g]</i>	<i>Concentrazione nel gas [g/m3]</i>
C3	0,001	n.d.	Trascurabile
C4	0,096	n.d.	0,262

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

- 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.

8 Conclusioni

Durante questa annualità sono stati effettuati quattro test sperimentali per ottimizzare il processo di gassificazione: due test sono stati eseguiti utilizzando come combustibile di partenza carbone e due test sono stati eseguiti utilizzando un mix di carbone e cippato di legno di pino con percentuali in peso rispettivamente pari al 90% e 10%.

I test di gassificazione di carbone sono stati due: il primo è stato eseguito a inizio Febbraio, l'ultimo test è stato eseguito a Settembre 2016, riportiamo di seguito le seguenti valutazioni: la tecnologia di gassificazione del reattore dell'impianto Dimostrativo ben si presta all'utilizzo di carbone anche se il carbone Colombiano appare essere troppo poco reattivo e sarebbe necessario un carbone più reattivo. Nel primo test sperimentale, eseguito a Febbraio 2016, non è stato utilizzato vapore come agente gassificante, il potere calorifico del syngas è stato pari a 3,42 MJ/kg, e tale valore risulta essere insufficiente per poter collegare un motore a combustione interna per generare corrente elettrica. Nel secondo test, eseguito a Settembre 2016, è stato utilizzato vapore come agente gassificante, il potere calorifico del syngas è migliorato salendo 3,8 MJ/kg, e tale valore risulta essere sufficiente per poter collegare un motore a combustione interna per generare corrente elettrica. Durante quest'ultimo test sperimentale è stato acceso il motore a combustione interna dell'impianto Pilota generando un totale di 18 kWe per circa 20 minuti.

Nel test sperimentale, effettuato ad Aprile 2016, è stato aggiunto il 10% in peso di cippato di pino al combustibile per aumentarne la reattività, i risultati della sperimentazione non sono stati ottimali ed è stato ottenuto un syngas con uno scarso potere calorifico 2,78 MJ/kg.

Durante il test sperimentale di inizio Luglio 2016 è stato utilizzato il medesimo combustibile del precedente test, i risultati sono stati migliori rispetto al precedente grazie all'utilizzo del vapore come agente gassificante, il potere calorifico è aumentato fino a 4,24 MJ/kg. L'efficienza del processo di gassificazione è salita notevolmente è il syngas potrebbe alimentare in maniera costante un motore a combustione interna. Effettuando per i quattro 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 test, eseguito a Febbraio, è stata ricavata un'efficienza di gassificazione di circa 65-70%, per il test sperimentale, eseguito ad Aprile 2016, l'efficienza è diminuita fino al 50%, per il test, eseguito a luglio 2016, l'efficienza è stata pari al 80%. Nell'ultimo test sperimentale, eseguito a Settembre 2016, l'efficienza è stata pari a circa il 70%.

Si può concludere che il processo di gassificazione di carbone migliora utilizzando vapore come agente gassificante, se poi si aggiunge anche un po' di cippato (10% in peso) al carbone il miglioramento è notevole. A dimostrazione di quanto sopra detto il gassificatore è in grado di generare il syngas capace di alimentare un motore di circa 250 kWe, con un'efficienza di circa 80%, gassificando un combustibile composto da un mix di carbone e cippato di legno e utilizzando vapore come agente gassificante.

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