



Ricerca di Sistema elettrico

## Test sperimentale co-gassificazione di carbone e biomasse presso sull'impianto dimostrativo Sotacarbo

G. Calì, F. Tedde, P. Miraglia, D. Multineddu, A. Orsini,  
P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano

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

G. Calì, F. Tedde, P. Miraglia, D. Multineddu, A. Orsini (SOTACARBO)  
Paolo Deiana, Massimo Subrizi, Claudia Bassano (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo: Parte B1- a - Cattura della CO<sub>2</sub> in post e pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi

Task: a4: Sperimentazione presso Impianto Dimostrativo SOTACARBO

Responsabile del Progetto: ing. Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico Sotacarbo: ing. Enrico Maggio

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 L'IMPIANTO DIMOSTRATIVO SOTACARBO .....	6
2.1 IL REATTORE DI GASSIFICAZIONE .....	6
2.2 SCRUBBER E SISTEMI DI SCARICO E STOCCAGGIO REFLUI .....	11
2.3 SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO DELL'IMPIANTO .....	12
2.4 SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI .....	12
2.4.1 <i>Composizione del gas</i> .....	12
3 OBIETTIVI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	14
3.1 OBIETTIVI SPECIFICI DEI TEST SPERIMENTALI .....	14
3.2 COMBUSTIBILI IMPIEGATI .....	14
3.3 STRUMENTI E METODI DI ANALISI.....	15
3.3.1 <i>Analisi immediata</i> .....	15
3.3.2 <i>Analisi elementare</i> .....	16
3.3.3 <i>Determinazione del potere calorifico</i> .....	16
4 PROCEDURE OPERATIVE DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE .....	17
4.1 VERIFICHE E AVVIAMENTO DELLE APPARECCHIATURE AUSILIARIE.....	17
4.2 FASE DI START-UP.....	17
4.2.1 <i>Caricamento iniziale del reattore</i> .....	17
4.2.2 <i>Inertizzazione del sistema e accensione torcia</i> .....	18
4.2.3 <i>Accensione del letto combustibile</i> .....	18
4.2.4 <i>Analisi Syngas</i> .....	18
4.3 FASE OPERATIVA .....	19
4.4 FASE DI SHUT-DOWN.....	20
5 TEST SPERIMENTALI DI CO GASSIFICAZIONE .....	21
5.1 COLLAUDI A CALDO DELLE SEZIONI DELL'IMPIANTO DIMOSTRATIVO .....	21
5.2 ANALISI DATI SPERIMENTALI DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE .....	22
6 CONCLUSIONI.....	26

## Sommario

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nel test di gassificazione effettuato nel corso della campagna sperimentale sviluppata sull'impianto Dimostrativo della piattaforma Sotacarbo a Luglio e a Settembre 2014 al fine di: collaudare a caldo l'impianto Dimostrativo, verificare il funzionamento del gassificatore Dimostrativo da 5 MWt e studiare il processo di gassificazione con un combustibile misto di cippato e carbone Sulcis. Oltre a una descrizione sintetica dell'apparato sperimentale e delle modifiche impiantistiche ad esso recentemente apportate, sono illustrate le prestazioni generali del processo di gassificazione.

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente documento, la miscela di combustibile utilizzata per alimentare il gassificatore è una miscela di carbone Sulcis 75% e biomasse 25% le percentuali sono riferite al peso totale della miscela. I test sperimentali effettuati sono stati due della durata di circa 36 e sono stati i primi test a caldo effettuati sull'impianto Dimostrativo

Il presente rapporto presenta la verifica del funzionamento a caldo delle varie sezioni dell'impianto ed il collaudo di queste; inoltre è presente un'analisi dei dati di gassificazione ottenuti. Nella parte finale del rapporto è presente un'analisi: delle modifiche che sarebbe necessario apportare al fine di ottimizzare l'impianto e delle possibilità di utilizzo dell'impianto di gassificazione Dimostrativo

## 1 Introduzione

I test di gassificazione effettuati, nel corso della campagna sperimentale sviluppata sull'impianto Dimostrativo della piattaforma Sotacarbo a Luglio e a Settembre 2014, hanno permesso di: collaudare a caldo l'impianto Dimostrativo, verificare il funzionamento del gassificatore Dimostrativo da 5 MWt e studiare il processo di gassificazione con un combustibile misto di cippato e carbone Sulcis.

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test sperimentale di gassificazione effettuato sull'impianto di gassificazione Dimostrativo, In particolare:

- il secondo capitolo riporta una descrizione sintetica dell'impianto Dimostrativo Sotacarbo (con particolare riferimento alla sezione di gassificazione)
- il terzo capitolo riporta sinteticamente gli obiettivi e l'organizzazione della campagna sperimentale in oggetto, le caratteristiche dei combustibili impiegati;
- il quarto capitolo descrive per grandi linee le procedure operative adottate nel corso dei test;
- il capitolo cinque riporta l'analisi dei collaudi a caldo delle varie sezioni dell'impianto Dimostrativo e la valutazione dei dati sperimentali
- il sesto capitolo riporta le conclusioni sulla campagna sperimentale e gli spunti per un'ottimizzazione futura dell'impianto Dimostrativo.

## 2 L'impianto Dimostrativo Sotacarbo

L'impianto Dimostrativo della piattaforma Sotacarbo comprende, in estrema sintesi, una sezione di gassificazione, un sistema di lavaggio del syngas (scrubber) in equicorrente, una torcia. In particolare, la sezione di gassificazione è costituita principalmente da un reattore a letto fisso *up-draft*, utilizzando aria e vapore come agenti gassificanti ed è operante a pressione pressoché atmosferica. Il reattore è equipaggiato con una serie di apparecchiature ausiliarie per lo svolgimento delle varie funzioni a supporto della gassificazione, quali la produzione e l'immissione degli agenti gassificanti, il caricamento del combustibile, il controllo dei parametri di processo, la griglia di scarico ceneri.

### 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*, progettato per operare con alimentazione ad aria e a pressione pressoché atmosferica.

Il reattore, sviluppato per gassificare differenti tipologie di carbone, è stato impiegato per effettuare test preliminari di co-gassificazione di carbone e biomasse durante il progetto in corso.

Il gassificatore ha un diametro interno di 1300 mm e un'altezza complessiva pari a 2800 mm, con un'altezza massima del letto di combustibile pari a circa 2400 mm.

Il combustibile viene introdotto all'interno del gassificatore dall'alto, attraverso una tramoggia a cui segue un condotto con forma a Y con tre ghigliottine per la gestione della tempistica del caricamento.

Il combustibile viene caricato sulla tramoggia attraverso l'utilizzo di big bag con volume pari a 1 m<sup>3</sup>, il quale ha la possibilità di essere svuotato dal basso e di venire sollevato tramite l'utilizzo di un paranco. Il gassificatore al suo interno ha delle pareti in acciaio raffreddate tramite una camicia dove è presente 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 determinato mediante 36 termocoppie posizionate sulle pareti del gassificatore su sei livelli differenti. Su ogni livello sono presenti sei termocoppie a 60° l'una dall'altra. Riportiamo di seguito un'immagine del gassificatore e una tabella della disposizione delle termocoppie rispetto all'altezza (espressa in mm) del gassificatore.



Figura 2.1. La parte inferiore del gassificatore Dimostrativo.

altezza						
2700	TIT-184P\PV	TIT-183P\PV	TIT-172P\PV	TIT-171P\PV	TIT-160P\PV	TIT-154P\PV
1600	TIT-185P\PV	TIT-182P\PV	TIT-173P\PV	TIT-170P\PV	TIT-161P\PV	TIT-155P\PV
800	TIT-186P\PV	TIT-181P\PV	TIT-174P\PV	TIT-169P\PV	TIT-162P\PV	TIT-156P\PV
650	TIT-187P\PV	TIT-180P\PV	TIT-175P\PV	TIT-168P\PV	TIT-163P\PV	TIT-157P\PV
500	TIT-188P\PV	TIT-179P\PV	TIT-176P\PV	TIT-167P\PV	TIT-164P\PV	TIT-158P\PV
350	TIT-189P\PV	TIT-178P\PV	TIT-177P\PV	TIT-166P\PV	TIT-165P\PV	TIT-159P\PV
	Nord Est	Fila NORD	Nord Ovest	Sud OVEST	Sud	Sud EST
Fila	A	B	C	D	E	F

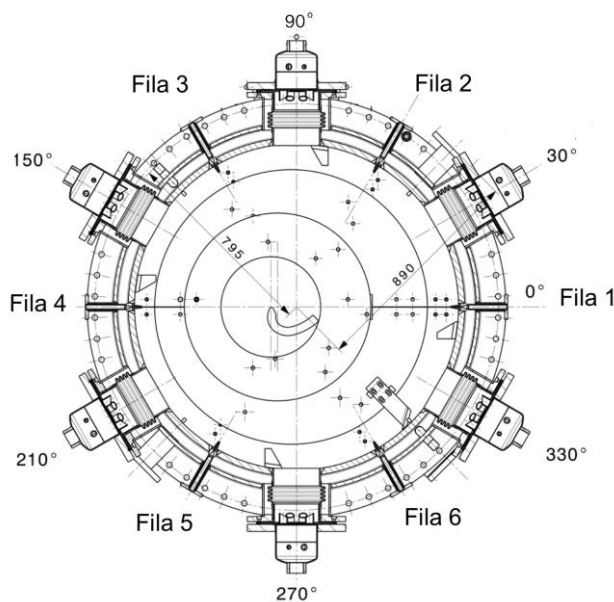
**Tabella 2.1. posizionamento termocoppie**

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 .



**Figura 2.2. La parte esterna della griglia del gassificatore Dimostrativo.**

Come si nota in figura i piani concentrici tra di loro hanno degli spazi da cui passano le ceneri da scaricare, la griglia per funzionare deve essere fatta ruotare da un motore che è collegato alla griglia stessa tramite un braccio meccanico. L'introduzione nel letto di combustibile degli agenti gassificanti (aria e vapore, nelle condizioni nominali di funzionamento) avviene al di sotto della griglia stessa; prima di entrare nel reattore di gassificazione si miscelano all'esterno. La fase di avviamento avviene tipicamente mediante l'introduzione nel reattore di un letto costituito da uno strato di materiale inerte (argilla espansa, nelle ultime prove sostituita con della ghiaia di granulometria compresa tra 8 e 50 mm) a protezione della griglia, sopra il quale è posizionato uno strato di pellet di legno imbevuto di gasolio (nell'ultimo test sperimentale è stato utilizzato unicamente cippato di legno) ed uno strato di combustibile come carica iniziale. La fase di accensione avviene tramite sei irradiatori ceramici da 800 W disposti in maniera concentrica ad una altezza di circa 500 mm dal fondo del reattore di gassificazione dove è stato posizionato lo strato di pellet o cippato. Riportiamo di seguito la sezione del gassificatore Dimostrativo dove si può verificare il posizionamento degli irradiatori:



**Figura 2.3. Sezione del gassificatore dove sono presenti gli irradiator di accensione.**

Come si può notare dalla figura 2.3 i sei irradiatori ceramici ad infrarosso sono disposti a 60 ° l'uno dall'altro ed hanno dimensioni 125\* 125 mm sono dotati di termocoppia interna di tipo K (0-1000 °C). L'irradiatore è inserito in una custodia metallica realizzata per il suo montaggio sul gassificatore a forma di lampada. Riportiamo di seguito un'immagine di un irradiatore con la sua lampada:



**Figura 2.4 IRRADIATORE.**

Gli irradiator 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 Dimostrativo, possiede un sistema di movimentazione del letto (STIRRER) interrefrigerato. Esso è costituito principalmente da: un albero verticale cavo (per poter effettuare il raffreddamento con circolazione di 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 salire e scendere, un motore di rotazione con una cella di carico per stimare la resistenza alla rotazione stessa. Lo STIRRER ha la forma di una T rovesciata di seguito riportiamo la figura in cui si notano i motori di rotazione e traslazione insieme al sistema con la corda di acciaio che collega lo stirrer al pistone oleodinamico:





**Figura 2.5. STIRRER.**

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

Lo spostamento viene rilevato da un misuratore con un campo scala 0-1000 mm ed il segnale inviato in sala controllo da dove viene inviato il comando di salita o di discesa impostando direttamente il valore numerico in mm. Alle estremità del pistone sono posizionati dei finecorsa per bloccarne la corsa stessa. Lo STIRRER è dotato di un motore direttamente posizionato sulla estremità superiore che ne permette la rotazione in ambo i sensi. La rotazione oraria permette allo STIRRER di mescolare il letto al suo interno, ed essendo concorde con quella della griglia di scarico di agevolarne lo scarico stesso; inoltre grazie alla cella di carico si registra lo sforzo sostenuto dal motore durante la rotazione in maniera tale da bloccarlo se troppo elevata. Viceversa in senso antiorario lo STIRRER si posiziona sulla superficie del letto permettendone il suo livellamento.

Il gassificatore Dimostrativo ha delle pareti di acciaio refrigerate con acqua. La camicia di raffreddamento possiede dell'acqua che vaporizza a causa del calore scambiato con il reattore di gassificazione durante il suo funzionamento. Il vapore, che si forma nella camicia, giunge per circolazione naturale nel corpo cilindrico superiore "Steam Drum". Si tratta di un serbatoio orizzontale di volume 0,2 m<sup>3</sup>, con pressione massima ammissibile di progetto pari a 0,5 bar e una temperatura massima di 220 °C. Progettato per contenere una miscela bifasica di acqua e vapore, tale corpo cilindrico è in collegamento con un condensatore ad aria a convezione forzata tramite due ventole con motori da 1,5 kW 6 poli trifase.

Di seguito riportiamo due figure che illustrano lo steam drum e il condensatore



Figura 2.6. Steam Drum.

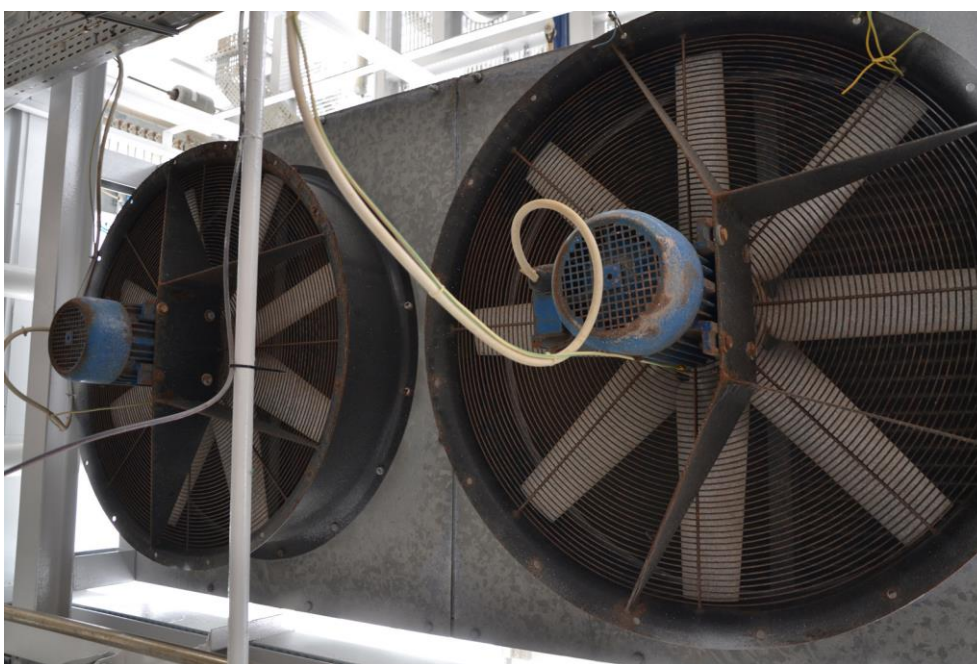


Figura 2.7. Condensatore.

Il sistema di raffreddamento ha la capacità di dissipare al massimo 500 kW termici corrispondenti ad una portata massima di 800 kg/h di vapore con salto termico dalla temperatura di circa 100 °C a quella di circa 50-70 °C.

Il gassificatore Dimostrativo possiede una serie di ausiliari di cui descriviamo i principali: il sistema di produzione e adduzione aria processo, il sistema di produzione e adduzione vapore, il sistema di stoccaggio e adduzione azoto. Gli agenti gassificanti necessari al funzionamento del gassificatore dell'impianto dimostrativo sono aria processo e vapore, forniti rispettivamente da una soffiante con una portata massima di 1100 m<sup>3</sup>/h e da due caldaie in grado di produrre una portata pari a 250 kg/h ognuna. Il sistema è composto da due caldaie per la generazione di vapore con una potenzialità di 250 kg/h ciascuna a 4 bar,

successivamente è presente una valvola di laminazione della pressione fino ai 0.5 bar come previsto dal progetto.

Il sistema di stoccaggio e adduzione Azoto all'impianto di gassificazione Dimostrativo è composto da un serbatoio di stoccaggio dell'azoto in fase liquida di capacità pari a 40 m<sup>3</sup> un sistema di vaporizzatori per trasformare l'azoto liquido in gas ed un sistema di decompressione per regolare la pressione dell'azoto a circa 0,5 bar come da specifica. L'azoto è necessario per motivazioni di sicurezza ad esempio per uno spegnimento rapido e dunque per motivazioni di sicurezza dell'impianto stesso.

Sulla base dei dati di progetto l'impianto dovrà erogare 2000 m<sup>3</sup>/h alla pressione di 0.5 bar tale progettazione si è resa necessaria per poter inertizzare l'intero l'impianto in circa 5 minuti in caso di spegnimento rapido.

## 2.2 *Scrubber e sistemi di scarico e stoccaggio reflui*

Lo scrubber ha lo scopo di effettuare un lavaggio ad acqua del syngas tramite un flusso equi corrente immesso mediante tre ugelli conici. Al fine di migliorare il lavaggio gli ugelli sono di tipo cono pieno e sono stati posizionati su tre rampe sovrapposte. Lo scrubber svolge anche la funzione di guardia idraulica antiritorno di fiamma; essa è dovuta dalla parte del corpo cilindrico della torre di lavaggio che è immersa per 200 mm al di sotto del pelo libero dell'acqua. 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 qui mediante una pompa monovite viene rimosso. Il volume di acqua contenuto nello scrubber è di 6 m<sup>3</sup>; tale invaso unito a quello del contenitore di accumulo (successivamente descritta), 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 m<sup>3</sup> 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 un 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 alla colonna di lavaggio tramite un sistema di pompe e di filtri dell'acqua rilanciata. Riportiamo di seguito due immagini dello scrubber e della vasca di accumulo insieme al sistema di ricircolo e lavaggio acqua:



**Figura 2.8 Scrubber.**



Figura 2.9 vasca di accumulo e sistema di ricircolo acqua di lavaggio.

### 2.3 Sistema di regolazione e controllo dell'impianto

La maggior parte delle operazioni di regolazione e controllo dell'impianto vengono gestite in modalità manuale da un apposito sistema. In particolare, il sistema di regolazione e controllo permette di variare i principali parametri di processo. I valori dei parametri misurati (temperature, pressioni, portate) sull'impianto Dimostrativo vengono trasmessi tramite segnale 4-20 mA e registrati dallo stesso. Inoltre il sistema di regolazione e controllo permette la movimentazione delle valvole pneumatiche di regolazione e ON-OFF

### 2.4 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 in gioco: pressioni, portate e temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto, nonché i profili termici all'interno del reattore.

#### 2.4.1 Composizione del gas

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

- un gas cromatografo portatile;
- un sistema di analisi in tempo reale.

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  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  e  $\text{C}_3\text{H}_8$  [2, 4].

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  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  tramite modulo URAS26 di tipo IR (raggi infrarossi), con i seguenti campi di misura:
  - $\text{CO}_2$ : 0-25% in volume;
  - $\text{CH}_4$ : 0-5% in volume;
  - $\text{CO}$ : 0-30% in volume;
- misura della concentrazione di  $\text{H}_2$  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 Obiettivi della campagna sperimentale

L'impianto di gassificazione Dimostrativo non è mai stato testato (un tentativo di accensione è stato effettuato nell'anno 2009) a causa di problematiche presenti sul sistema di scarico ceneri. Pertanto il principale obiettivo della campagna sperimentale da svolgersi all'interno dell'attuale progetto di ricerca è rappresentato dal collaudo a caldo dell'interno impianto Dimostrativo; inoltre si è voluto sperimentare il funzionamento della sezione di gassificazione (cuore dell'impianto Dimostrativo) con un combustibile in miscela carbone e biomassa. L'impianto Dimostrativo infatti è stato progettato e concepito per testare il processo di gassificazione con differenti tipologie di carbone e biomasse o con miscele di esse.

In particolare, nel corso della campagna descritta nel presente documento, è stato possibile testare il gassificatore con una miscela: carbone Sulcis ad alto tenore di zolfo e cippato di legno (eucalipto), le percentuali sono state calcolate in peso rispettivamente: 75% carbone Sulcis, 25% cippato di legno

#### 3.1 Obiettivi specifici dei test sperimentali

Al fine di raggiungere gli obiettivi suddetti, sono stati programmati due test sperimentali della durata di 36 ore ciascuno: il primo è stato effettuato il 29-30/07/2014, il secondo il 16-17/09/2014. I test sperimentali hanno avuto il principale obiettivo di collaudare a caldo le sezioni dell'impianto Dimostrativo e di testare il processo di gassificazione, nella seguente tabella riportiamo gli obiettivi specifici dei due test sperimentali.

	<i>Obiettivo dei test sperimentali</i>	<i>Tipologia di valutazione dell'obiettivo</i>
1	Collaudo a caldo sistema di caricamento combustibile	Valutazione delle tempistiche di caricamento ed di eventuali problemi dovuti a impaccamento del combustibile
2	Movimentazione del letto di gassificazione (stirrer)	Valutazione della traslazione e della rotazione dello stirrer e del sistema di refrigerazione
3	Sistema di monitoraggio della temperatura in parete	Valutazione della disposizione delle termocoppie sulle pareti del gassificatore e della loro funzionalità
4	Sistema di accensione del gassificatore	Valutazione della funzionalità dell'intero sistema (irradiatori, SCR, ecc)
5	Sistema di raffreddamento del gassificatore	Verifica dell'intero circuito e della sua potenzialità
6	Sistema di scarico ceneri	Verifica della funzionalità del sistema e della tempistica di scarico ceneri
7	Sistema di clean-up (scrubber)	Verifica della capacità del sistema di pulizia syngas
8	Torcia	Verifica del consumo syngas e perdite di carico generate a causa della valvola rompifiamma
9	Sistema di analisi syngas	Verifica della capacità di analizzare il syngas
10	Sistema di regolazione e controllo	Verifica della sua funzionalità
11	Processo di gassificazione	Analisi dei primi dati di processo del gassificatore

**Tabella 3.1. obiettivi dei test sperimentali.**

#### 3.2 Combustibili impiegati

Come risulta dalla tabella 3.1, i test sperimentali sulla piattaforma pilota sono stati eseguiti con differenti tipologie di carbone e di biomasse. Tali combustibili sono stati caratterizzati presso i laboratori Sotacarbo con differenti strumentazioni e metodi di analisi.

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

La seguente tabella 3.2 riporta, in sintesi, i risultati medi 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 Sulcis – carbone sub-bituminoso proveniente dalla miniera di Monte Sinni, gestita dalla Carbosulcis S.p.A. e situata in Sardegna Sud-Occidentale a pochi chilometri dalla piattaforma Sotacarbo;
- cippato di legno – biomassa di origine forestale eucalipto e pinus pinea prodotto in Sardegna
- pellet di legno – materiale commerciale comunemente impiegato per l'alimentazione di stufe e utilizzato comunemente nella piattaforma Sotacarbo, tra l'altro, per le procedure di accensione del gassificatore.

Tipologia	sub-bit.	Cippato	cippato	pellet
Nome	Sulcis	Eucalipto	Pinus pinea	-
Provenienza	Sardegna	Sardegna	Sardegna	n.d.
<i>Densità in mucchio (kg/dm<sup>3</sup>)</i>				
Densità	0,8	0,3	0,2	0,6
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>				
Carbonio fisso	40,65	19,15	18,30	17,70
Umidità	7,45	7,84	7,70	8,57
Volatili	40,45	63,03	73,63	73,32
Ceneri	11,45	9,92	0,37	0,42
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>				
Carbonio totale	66,49	39,40	49,95	79,51
Idrogeno	6,18	4,94	6,14	11,18
Azoto	1,41	0,18	0,11	0,32
Zolfo	7,02	0,01	0,00	0,00
Ossigeno	n.d.	n.d.	35,74	n.d.
Umidità	7,45	7,84	7,70	8,57
Ceneri	11,45	9,92	0,37	0,42
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>				
Pot. Calor. Superiore	22,59	14,51	19,42	18,45
Pot. Calor. Inferiore	21,07	13,25	18,25	16,85

**Tabella 3.2. Caratterizzazione dei combustibili impiegati.**

### 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 SO<sub>2</sub> 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 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 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):

$$Q_{sup} = \frac{1}{100} \left[ X_C \cdot 33900 + X_H \cdot 141800 + X_S \cdot 9280 + X_{H_2O} \cdot 22600 \right] \quad (3.1)$$

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

in cui X<sub>C</sub>, X<sub>H<sub>2</sub></sub>, X<sub>O<sub>2</sub></sub>, X<sub>S</sub>, X<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 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 tipicamente impiegate per l'esecuzione dei test sperimentali sull'impianto di gassificazione Dimostrativo. Tali modifiche non hanno subito sostanziali variazioni rispetto all'ultima parte della precedente campagna sperimentale e vengono comunque qui riportate per completezza.

Nel complesso, le procedure operative constano delle seguenti fasi principali:

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

### 4.1 Verifiche e avviamento delle apparecchiature ausiliarie

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

In particolare, le apparecchiature ausiliarie vanno 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. Riempimento camicia water jacket e controllo che il livello dello steam drum raggiunga circa 220 mm;
10. Posizionare lo stirrer ad un'altezza massima all'interno del gassificatore di 2400 mm.

### 4.2 Fase di start-up

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

#### 4.2.1 Caricamento iniziale del reattore

Il caricamento iniziale del gassificatore è stato 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 primo test sperimentali il 29-30/07/2014:

- |                       |        |              |             |
|-----------------------|--------|--------------|-------------|
| • Argilla espansa     | 400 mm | circa 500 lt | circa 100kg |
| • Pellet              | 400 mm | circa 500 lt | circa 250kg |
| • Mix carbone/cippato | 650 cm | circa 870 lt | circa 500kg |

L'argilla è il primo materiale caricato a contatto con la griglia per effettuare da isolante durante la fase di accensione (successivamente ci saranno le ceneri prodotte dalla gassificazione); il livello dell'argilla caricata arriva fino bordo lampade. Successivamente viene caricato il combustibile di accensione formato da: Pellet miscelato con un agente che accelera la combustione (gasolio), un big-bag con il combustibile mix di carbone/cippato nelle percentuali precedentemente descritte. 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 il secondo test

sperimentale effettuato il 16-17/09/2014 il caricamento iniziale è stato effettuato utilizzando i seguenti materiali:

- Ghiaia                            400 mm            circa 500 lt        circa 500kg
- Cippato di legno(Pinus Pinea) 400 mm    circa 500 lt        circa 100kg
- Mix carbone/cippato    650 cm            circa 870 lt        circa 500kg

La modifica della carica di accensione è dovuta alla ricerca di un materiale isolante più resistente al calore rispetto all'argilla e di maggiore dimensione. Inoltre il pellet imbevuto di gasolio è stato sostituito con del semplice cippato di legno al fine di eliminare le problematiche di riscaldamento del cono di gassificazione verificatesi durante il primo test sperimentale. Il gasolio o qualsiasi altro acceleratore di combustione sono stati sostituiti con della semplice carta posizionata nelle vicinanze degli irradiatori per eliminare le problematiche agli irradiatori stessi verificatesi durante il primo test sperimentale.

#### 4.2.2 Inertizzazione del sistema e accensione torcia

Allo scopo di evitare la presenza di ossigeno residuo all'interno del reattore di gassificazione e delle apparecchiature poste subito a valle dello stesso, l'intero sistema viene inertizzato mediante una corrente di azoto, inviata per un tempo prestabilito. Un'attenta regolazione della portata di azoto è necessaria per evitare una movimentazione del letto, che ne comprometterebbe la perdita della stratificazione. In particolare, l'invio di una corrente di azoto di circa 2000 m<sup>3</sup>/h per sette minuti assicura l'inertizzazione di tutto l'impianto Dimostrativo. Successivamente all'inertizzazione viene effettuata l'accensione della torcia con GPL e si aspetta che la temperatura misurata in uscita dalla camera di combustione si autoregoli al valore di set-point di 800 °C. L'inertizzazione iniziale durante il secondo test sperimentale è stata eliminata a causa di problematiche verificatesi al letto di gassificazione in fase di accensione (formazioni di cammini preferenziali, disposizione scorretta del letto).

#### 4.2.3 Accensione del letto combustibile

L'accensione del reattore di gassificazione avviene per mezzo di sei resistenze elettriche (irradiatori di accensione) in materiale ceramico poste a contatto con il letto del gassificatore in prossimità dello strato di pellet di legno o cippato di legno del secondo avviamento.

Gli irradiatori vengono alimentati elettricamente, portati alla temperatura di 750-800 °C e mantenuti in tale condizione per dieci minuti circa, al fine di consentire il riscaldamento delle zone limitrofe del letto combustibile. Dopo tale tempo viene inviata, una portata d'aria pari a circa 100 kg/h al fine di dare avvio alla combustione. Una volta verificata 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 200-250 kg/h e viene interrotto l'invio dell'aria attraverso gli irradiator di accensione.

#### 4.2.4 Analisi Syngas

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

- in uscita dal gassificatore
- in uscita dallo scrubber
- in uscita dalla torcia

La misura di composizione verrà effettuata con un doppio sistema di analisi (per avere comunque una misura anche in caso di avaria) gas cromatografo portatile e multimodulare ABB(già descritti nei paragrafi precedenti).

### 4.3 Fase operativa

La fase operativa dell'impianto riguarda tutte quelle operazioni e verifiche necessarie per portare il gassificatore Dimostrativo in una condizione di regime e mantenerlo in quella 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 corrette. Riportiamo di seguito le procedure messe a punto durante i due test sperimentali al fine di portare il gassificatore in una condizione di regime:

- Regolazione aria processo: aumentare per step l'aria sottogriglia dal valore di accensione 200-250 kg/h fino al valore di previsto per il test sperimentale all'incirca 450-500 kg/h; l'aumento dell'aria sottogriglia deve essere effettuato sulla base: del consumo di ossigeno (le analisi del syngas devono mostrare valori sempre sotto 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 la cella di carico) al fine di compattare il combustibile e valutare il livello del riempimento; successivamente è necessario far risalire lo stirrer fino ad una quota dove non è presente il combustibile (o comunque fredda) per evitare surriscaldamenti dello stesso e verificare il livello del riempimento del gassificatore
- carico combustibile e scarico ceneri: è necessario caricare un big bag di carbone/cippato (500 kg pari a 870 lt) ogni ora e mezza circa. La griglia dovrebbe scaricare circa 100 lt/h ossia lavorare 20min ogni ora o meglio 5 min ogni 15 min. La potenzialità globale di scarico della griglia è di circa 350 lt/h (anche se dipende dalla granulometria e dalla tipologia del materiale).
- 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 scende sotto i 180 mm reintegrare con acqua dal circuito principale fino al valore soglia di 220 mm
- invio vapore: quando la temperatura monitorata sulle pareti del gassificatore si mantiene in maniera costante sopra i 1000-1050 °C iniziare ad 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 in efficienza lo scrubber è necessario: scambiare i filtri posti prima della pompa di lavaggio quando la pompa in funzione inizia a perdere portata, scaricare per 2 min ogni ora il tank dove avviene il lavaggio e per 2 min ogni 2 ore quello da cui aspirano le pompe, reintegrare lo scrubber con acqua fresca quando il livello di uno dei due tank scende sotto i 1700 mm
- utilizzo soda: è stato predisposto l'utilizzo di soda per abbattere H<sub>2</sub>S 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 H<sub>2</sub>S 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 20-30mbar)

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

- aria sottogriglia: circa 500 kg/h
- vapore: all'occorrenza con portata da verificare
- consumo di combustibile: circa 350 kg/h
- SCARICO CENERI: circa 50 kg/h
- reintegro acqua scrubber: livelli costanti a 1700 mm
- reintegro SODA: sulla base dell'analitica
- Reintegro Steam DRUM: livello costante a 220 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 ogni tipo di caricamento,
- interruzione dell'invio di vapore
- parzializzazione dell'invio 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 (effettuati mediante il gascromatografo);
- spegnimento della torcia;
- 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 co gassificazione

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto sono stati effettuati due test preliminare di co-gassificazione di carbone Sulcis e cippato di legno (*Eucalipto*) di origine forestale locale della durata di 36 ore ciascuno il 29-30/07/2014 ed il 16-17/09/2014. La miscela, costituita per il 75% in peso da carbone Sulcis e per il restante 25% da cippato di legno, risulta essere particolarmente interessante sia per l'elevata reattività di entrambi i costituenti della miscela, sia per l'origine dei combustibili stessi, entrambi provenienti dalla Sardegna Sud-Occidentale.

<i>Tipologia</i>	<i>sub-bit.</i>	<i>Cippato</i>	<i>Miscela</i>
<i>Nome</i>	<i>Sulcis</i>	<i>Eucalipto.</i>	-
<i>Provenienza</i>	<i>Sardegna</i>	<i>Sardegna</i>	-
<i>Percentuali nella miscela</i>			
<i>Percentuale in peso</i>	<i>75%</i>	<i>25%</i>	-
<i>Densità in mucchio (kg/dm<sup>3</sup>)</i>			
<i>Densità</i>	<i>0,8</i>	<i>0,3</i>	<i>0,7</i>
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>			
<i>Carbonio fisso</i>	<i>40,65</i>	<i>19,10</i>	<i>32,40</i>
<i>Umidità</i>	<i>7,45</i>	<i>7,75</i>	<i>7,48</i>
<i>Volatili</i>	<i>40,45</i>	<i>63,14</i>	<i>44,00</i>
<i>Ceneri</i>	<i>11,45</i>	<i>9,96</i>	<i>16,08</i>
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>			
<i>Carbonio totale</i>	<i>66,49</i>	<i>39,40</i>	<i>51,85</i>
<i>Idrogeno</i>	<i>6,18</i>	<i>4,98</i>	<i>5,17</i>
<i>Azoto</i>	<i>1,41</i>	<i>0,18</i>	<i>1,17</i>
<i>Zolfo</i>	<i>7,02</i>	<i>0,01</i>	<i>5,12</i>
<i>Ossigeno</i>	<i>n.d.</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Umidità</i>	<i>7,45</i>	<i>7,70</i>	<i>7,46</i>
<i>Ceneri</i>	<i>11,45</i>	<i>9,96</i>	<i>16,08</i>
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>			
<i>Potere calorifico superiore</i>	<i>22,59</i>	<i>14,51</i>	<i>20,82</i>
<i>Potere calorifico inferiore</i>	<i>21,07</i>	<i>13,25</i>	<i>19,51</i>

**Tabella 6.1. Caratterizzazione della miscela di carbone Sulcis (75%) e cippato di legno (25%).**

### 5.1 Collaudi a caldo delle sezioni dell'impianto Dimostrativo

Durante i due test di gassificazione un importante obiettivo è rappresentato dal collaudo a caldo delle varie sezioni dell'impianto di gassificazione sulle quali possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- **Sistema di caricamento del combustibile:** in entrambi gli avviamenti tale sistema ha funzionato bene non dando mai problematiche di nessuna tipologia (impaccamenti, blocco delle valvole a ghigliottina, tenuta sul syngas nel momento del caricamento).
- **Movimentazione del letto del gassificatore(stirrer):** in entrambi i test sperimentali tale sistema ha risposto bene sia in traslazione che in rotazione (qualche problema di funzionalità nella rotazione si

è registrato solo nel primo test sperimentale) permettendo, tramite considerazioni sullo sforzo misurato dalla cella di carico, la misura del livello del combustibile all'interno del gassificatore

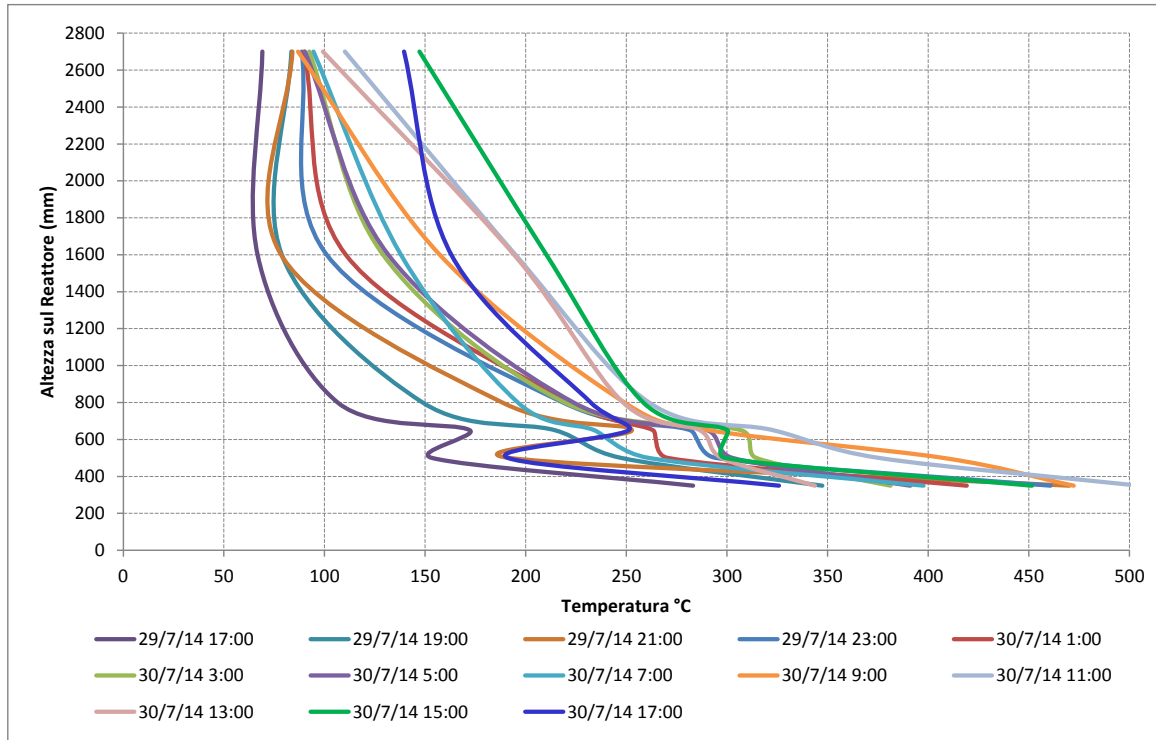
- Sistema di monitoraggio della temperatura sulle pareti del gassificatore: la disposizione e la quantità delle termocoppie presenti sulle pareti del gassificatore si è dimostrata corretta in entrambi i test sperimentali, dando la possibilità di registrare al meglio il profilo termico del gassificatore e le sue variazioni.
- Sistema di accensione del gassificatore: nel primo test sperimentale tale sistema ha dato alcune problematiche a causa di una rapida salita delle temperatura degli irradiator (che ha comportato la rottura degli stessi) gli stessi si sono fermati alla temperatura di 650 °C; nel secondo test sperimentale grazie ad una migliore gestione della loro funzionalità (gli step di aumento di temperatura sono stati dati con minore rapidità) gli irradiator hanno raggiunto la temperatura di 800 °C e non si sono verificate problematiche.
- Sistema di raffreddamento del gassificatore: nel primo test sperimentale tale sistema ha dato alcune problematiche a causa di una realizzazione errata del piping in uscita dal condensatore. Le eccessive perdite di carico, causate dalla presenza di un rotometro (sovradimensionato) montato all'uscita del condensatore, non permettevano la circolazione naturale del vapore condensato generando un aumento di pressione sul circuito con conseguente apertura della valvola di sicurezza presente sul circuito e continua immissione di acqua fresca nello steam drum. Nel secondo test sperimentale il rotometro è stato eliminato ed il piping modificato per minimizzare le perdite di carico; ciò ha reso possibile la circolazione naturale del vapore condensato evitando l'apertura della valvola di sicurezza e minimizzando l'immissione di acqua fresca nel circuito.
- Sistema di scarico ceneri: nel primo test sperimentale tale sistema ha funzionato correttamente non facendo rilevare nessuna problematica, nel secondo test sperimentale si sono verificate alcune problematiche ancora in fase di valutazione.
- Sistema di clean-up(scubber): tale sistema è formato principalmente dallo scrubber che ha funzionato in maniera corretta in entrambi i test sperimentali, sarà necessario in futuro mettere a punto alcune modifiche per renderlo più efficace.
- Torcia: il sistema in questione è completamente automatico e di semplice utilizzo in entrambi i test sperimentali ha funzionato correttamente. L'unica problematica registrata è data dallo sporco della valvola rompifiamma che provoca un aumento della pressione sull'impianto Dimostrativo; essa è stata pulita diverse volte durante i test sperimentali.
- Sistema analisi syngas: il sistema come già spiegato è composto da due strumenti: il gas cromatografo e il sistema ABB. Il gascromatografo nel primo test sperimentale ha registrato dati poco attendibili, nel secondo test sperimentale la sua funzionalità è migliorata. Il sistema ABB ha funzionato correttamente in entrambi i test sperimentali ed i suoi dati sono attendibili, ma ha tempi di risposta lunghi (da una prima analisi dovrebbero essere intorno ai 10 minuti)
- Sistema di regolazione e controllo: Tale sistema non ha dato alcuna problematica durante entrambi i test sperimentali.

## 5.2 *Analisi dati sperimentali del processo di gassificazione*

L'analisi dei dati sperimentali si basata principalmente sul primo test sperimentale del 29-30/07/2014 poiché nel secondo test sperimentale i dati sperimentali risentono di alcune problematiche verificatesi sullo scarico ceneri. Nel corso della prova sperimentale del 29-30/07/2014, sono stati gassificati mediamente, considerando unicamente i periodi in cui il gassificatore si trovava in condizioni di regime, 150-200 kg/h di combustibile (mix carbone Sulcis/cippato di legno), con potere calorifico inferiore pari a 19,51 MJ/kg. La

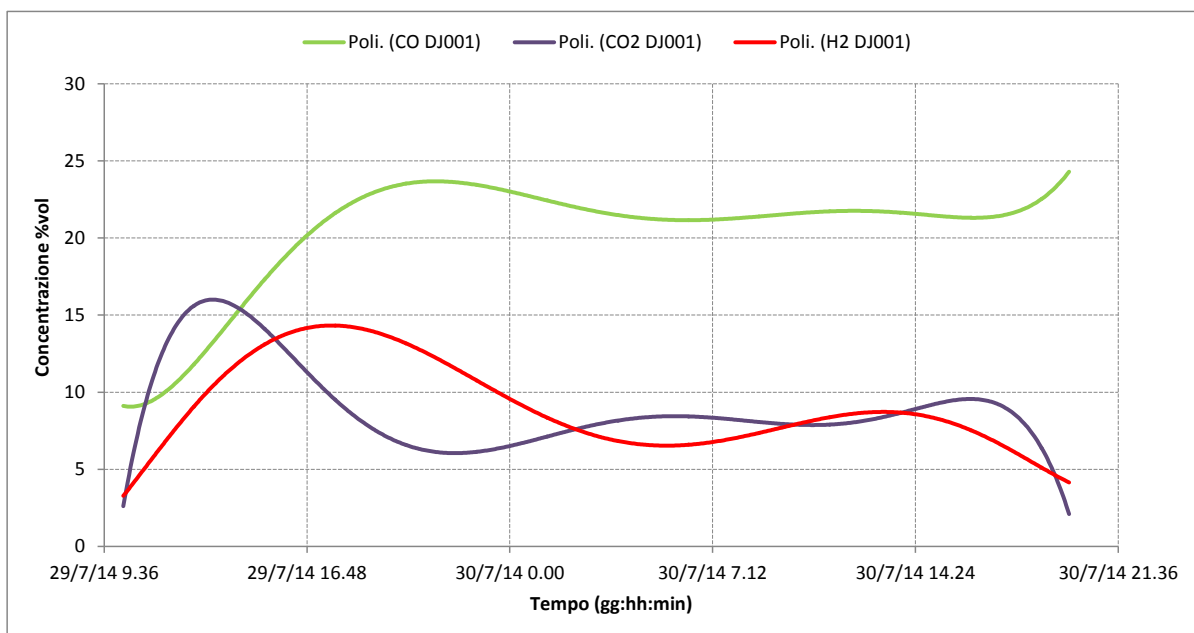
portata di aria utilizzata, si è attestata sui 400-500 kg/h nei periodi di regime del gassificatore anche se le variazioni sono state diverse durante entrambi i test sperimentali. Il vapore è stato poco utilizzato a causa delle temperature non eccessive raggiunte dal gassificatore (comunque mai per lunghi periodi).

La figura 6.1 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore di gassificazione rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova, circa ogni 2 ore a partire da quando il gassificatore è entrato a "regime".

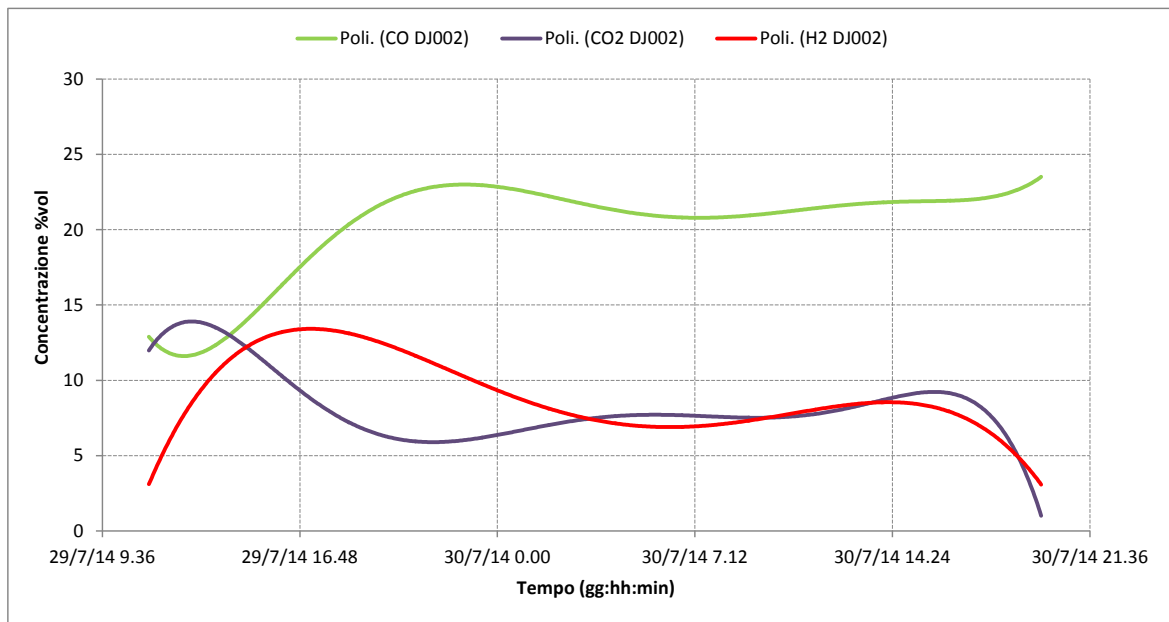


**Figura 6.1. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore.**

Le figura 6.2, 6.3, mostrano l'andamento nel tempo delle concentrazioni, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> sulle prese di campionamento DJ001P e DJ002P



**Figura 6.2. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P.**



**Figura 6.3. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ002P.**

Da quando il sistema raggiunge il funzionamento a regime, la concentrazione media di H<sub>2</sub> risulta pari a circa il 9%, quella di CO pari a circa il 20% e quella di CO<sub>2</sub> pari a circa 8% per un rapporto CO/CO<sub>2</sub> pari a 2,5 kg<sub>CO</sub>/kg<sub>CO2</sub> ed un rapporto H<sub>2</sub>/CO pari a 0,45 kg<sub>H2</sub>/kg<sub>CO</sub>. Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione media di O<sub>2</sub> pari a 0,9 % in volume.

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 tale misura non è stata registrata nella maniera corretta; nel secondo test sperimentale, grazie alla taratura dello strumento, il misuratore di portata ha misurato un valore di circa 400 m<sup>3</sup>/h.

Di seguito riportiamo nella tabella 6.2 i dati complessivi del processo di gassificazione in termini di composizione e portata del syngas e combustibile consumato.



<i>Parametri di processo</i>	
Combustibile (kg/h)	200
Aria (kh/h)	400
Vapore (kg/h)	-
<i>Composiz. syngas (fraz. molari su base secca)</i>	
CO	0,2074
CO <sub>2</sub>	0,0852
H <sub>2</sub>	0,0921
N <sub>2</sub>	0,5529
CH <sub>4</sub>	0,0373
H <sub>2</sub> S	0,0146
COS	0,0014
O <sub>2</sub>	0,0091
<i>Proprietà del syngas grezzo (su base secca)</i>	
Portata volumetrica (Nm <sup>3</sup> /h)	400
LHV (MJ/kg)	4,2
Pressione (MPa)	0,014
Temperatura (°C)	50,4

**Tabella 6.2. Dati processo di gassificazione.**

## 6 Conclusioni

La campagna sperimentale sul processo di gassificazione del impianto Dimostrativo Sotacarbo è stata programmata ed effettuata al fine di collaudare a caldo le varie sezioni dell'impianto Dimostrativo e di migliorare ed aumentare le conoscenze del processo di gassificazione facendo funzionare un impianto di taglia nominale 5 MWt. Come combustibile di prova è stato utilizzato una miscela di carbone Sulcis, e cippato di legno Eucalipto. Sono stati effettuati due test sperimentali della durata di 36 ore ciascuno: il 29-30/07/2014 ed il 16-17/09/2014 in entrambi i test l'impianto Dimostrativo è stato esercito ad 1/3 della sua potenzialità nominale. Tale scelta è stata effettuata per motivazioni di sicurezza e di opportunità (si è preferito procedere per step in futuri test sperimentali si aumenterà la potenzialità). I test sperimentali in generale sono stati positivi in quanto: i collaudi a caldo delle varie sezioni sono stati effettuati ed hanno avuto esito positivo; inoltre sono stati raccolti dei primi dati sperimentali. Tali dati sperimentali hanno permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- Il gassificatore ha mantenuto durante tutto il test sperimentale (naturalmente si considera la sola fase di "regime") un profilo termico costante e tipico di un gassificatore a letto fisso *up-draft*
- La qualità del syngas è stata buona con un potere calorifico inferiore di circa 4,2-4,5 MJ/kg
- Il syngas prodotto si è dimostrato essere molto costante durante tutto il test sperimentale

Tali indicazioni sono preliminari ed andranno verificate in ulteriori campagne sperimentali di più lunga durata. Comunque sulla base di questi risultati e delle principali problematiche emerse nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto è possibile definire quelle che possono essere le principali linee di ottimizzazione dell'impianto Dimostrativo. Esse riguardano principalmente i seguenti aspetti:

- verifica dei dati sperimentali raccolti in ulteriori campagne sperimentali di maggiore durata;
- ulteriore messa a punto di alcuni strumenti di misura e acquisto di nuovi (verifica del misuratore di portata degli agenti gassificanti e del syngas grezzo, misuratore di portata di del vapore condensato);
- miglioramento dei sistemi di analisi syngas al fine di: renderli più affidabili e diminuire i tempi di risposta degli strumenti;
- Caratterizzazione dell'impianto di gassificazione Dimostrativo
- individuazione della taglia reale dell'impianto Dimostrativo con test sperimentali al 100% della sua taglia reale
- ottimizzazione del sistema di scarico ceneri;
- ottimizzazione del sistema di pulizia syngas;
- ottimizzazione delle procedure per l'effettuazione dei test sperimentali

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