



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

## Test sperimentali di gassificazione e co-gassificazione di carbone e biomasse presso la piattaforma pilota Sotacarbo

*A.Pettinau, M.Caboni, G.Cali, F.Tedde, A.Madeddu, D.Multineddu, C.Frau*



Report RdS/2012/221

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

A.Pettinau, M.Caboni, G.Cali, F.Tedde, A.Madeddu, D.Multineddu, C.Frau

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: 2.2 – Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili, la cattura ed il sequestro della CO<sub>2</sub>

Responsabile del Progetto: Ing. Stefano Giammartini, ENEA

## Indice

<b>Sommario</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Introduzione</b> .....	<b>7</b>
<b>2. La sezione di gassificazione dell'impianto pilota Sotacarbo</b> .....	<b>8</b>
2.1 <i>Il reattore di gassificazione</i> .....	8
2.2 <i>Sistema di regolazione e controllo dell'impianto</i> .....	9
2.3 <i>Sistema di campionamento e analisi</i> .....	9
Composizione del gas.....	9
Nuovo sistema di analisi dei gas .....	10
Determinazione del profilo termico all'interno del gassificatore .....	10
<b>3. Obiettivi della campagna sperimentale</b> .....	<b>11</b>
3.1 <i>Programmazione e obiettivi delle singole prove</i> .....	11
3.2 <i>Combustibili impiegati</i> .....	12
Analisi immediata .....	13
Analisi elementare .....	13
Determinazione del potere calorifico .....	14
3.3 <i>Definizione dei parametri caratteristici delle prestazioni del processo</i> .....	14
Potenzialità .....	14
Resa del gassificatore.....	14
Rendimento di gas freddo.....	15
Rendimento di gas caldo.....	15
<b>4. Procedure operative del processo di gassificazione</b> .....	<b>16</b>
4.1 <i>Verifiche e avviamento delle apparecchiature ausiliarie</i> .....	16
4.2 <i>Fase di start-up</i> .....	16
Caricamento iniziale del reattore.....	16
Inertizzazione del sistema .....	16
Accensione del letto combustibile .....	17
Messa a regime del processo.....	17
4.3 <i>Fase operativa</i> .....	17
4.4 <i>Fase di shut-down</i> .....	18
<b>5. Test di gassificazione con carbone Usibelli (Alaska)</b> .....	<b>19</b>
5.1 <i>Test sperimentali con carbone Usibelli</i> .....	19
5.2 <i>Profili termici</i> .....	20
5.3 <i>Prestazioni globali del processo di gassificazione</i> .....	21
<b>6. Test di gassificazione con carbone sudafricano</b> .....	<b>23</b>
6.1 <i>Gassificazione del solo carbone sudafricano</i> .....	23

6.2 Gassificazione del carbone sudafricano miscelato con pellet di legno.....	24
6.3 Carbone sudafricano miscelato con pellet al 30% in volume .....	24
6.4 Carbone sudafricano miscelato con con pellet al 20% in volume.....	26
<b>7. Test di gassificazione con carbone russo.....</b>	<b>29</b>
7.1 Test sperimentale con solo carbone russo (100%).....	29
Prestazioni globali del processo di gassificazione .....	29
Profili termici.....	30
7.2 Test sperimentale con l'80% di carbone russo e il 20% di carbone Sulcis.....	32
Prestazioni globali del processo di gassificazione .....	32
Profili termici.....	33
7.3 Test sperimentale con il 60% di carbone russo e il 40% di carbone Sulcis.....	34
Prestazioni globali del processo di gassificazione .....	35
Profili termici.....	35
7.4 Alcune considerazioni comparative tra i vari test con carbone russo.....	36
<b>8. Test di gassificazione di lunga durata.....</b>	<b>37</b>
8.1 Test sperimentale con carboni russo, Sulcis e pellet.....	37
Prestazioni globali del processo di gassificazione .....	37
Andamento delle temperature .....	38
8.2 Test sperimentale con carbone russo e carbone Sulcis.....	39
Prestazioni globali del processo di gassificazione .....	40
Andamento delle temperature .....	41
<b>9. Test preliminari di gassificazione di cippato di legno.....</b>	<b>43</b>
9.1 Potenzialità del processo.....	43
9.2 Prestazioni globali del processo di gassificazione .....	43
9.3 Ipotesi di approccio sperimentale per future prove di biogassificazione.....	44
<b>Conclusioni.....</b>	<b>46</b>
<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>48</b>

## Sommario

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test di gassificazione effettuati nel corso della campagna sperimentale sviluppata tra ottobre 2011 e agosto 2012 al fine di ottimizzare il processo per l'utilizzo di differenti combustibili. Oltre a una descrizione sintetica del gassificatore pilota della piattaforma Sotacarbo e delle modifiche impiantistiche ad esso recentemente apportate, sono illustrate le prestazioni generali del processo di gassificazione con diversi combustibili o miscele di combustibili.

In particolare, nel corso della campagna sperimentale sono state utilizzate differenti tipologie di carbone (tra cui un carbone sudafricano, un carbone russo, una lignite dell'Alaska e il carbone locale Sulcis ad alto tenore di zolfo) e due biomasse legnose (un pellet di legno commerciale e un cippato di legno di origine forestale fornito dall'Ente Foreste della Sardegna).

Nel complesso le prestazioni migliori del processo di gassificazione, in termini di produzione di syngas e di potenza termica ad esso associata, sono state riscontrate alimentando il reattore con carbone Usibelli (Alaska), che per la sua elevata reattività appare essere ottimale per la gassificazione in letto fisso up-draft con alimentazione ad aria. Risultati piuttosto interessanti sono stati ottenuti anche nel corso dei test sperimentali nel quale è stata gassificata una miscela di carbone russo e carbone Sulcis (quest'ultimo al 40%).

Un aspetto estremamente interessante della campagna sperimentale alla quale il presente rapporto fa riferimento consiste nell'aver effettuato un primissimo test, seppur preliminare, di gassificazione del cippato di legno. Tale combustibile infatti può rappresentare una delle più interessanti soluzioni per un'applicazione commerciale della tecnologia di gassificazione sviluppata dalla Sotacarbo. Dal momento che l'impianto (e, in particolare, il sistema di caricamento dello stesso) non è stato progettato per l'impiego di biomasse, il test ha fornito risultati molto generali e non ha consentito una vera e propria ottimizzazione del processo; tuttavia sono emerse numerose indicazioni che potranno consentire, nel corso delle prossime campagne sperimentali, una messa a punto dell'impianto e delle procedure operative di gestione dello stesso per l'ottimizzazione del processo di gassificazione di biomasse.

D'altra parte, uno dei principali problemi riscontrati nel corso delle prove sperimentali e attualmente non risolti è legato alla formazione di agglomerati nella parte bassa del reattore (agglomerati che si sono formati anche quando è stata impiegata la ghiaia come materiale inerte a protezione della griglia). Ciò indica che tale fenomeno è dovuto quasi certamente alla fusione delle ceneri nella parte bassa del gassificatore, dovuta alla presenza di zone molto localizzate del letto (non rilevate dalla strumentazione del sistema) in cui le temperature raggiungono valori significativamente superiori a quelli riscontrati dalla sonda di misurazione delle temperature.

## 1. Introduzione

Al fine di approfondire le conoscenze e di migliorare le prestazioni del processo di gassificazione impiegato nell'impianto pilota della piattaforma Sotacarbo, tra ottobre 2011 e agosto 2012 è stata effettuata una campagna sperimentale in cui è stato possibile testare il processo in diverse condizioni operative.

L'impianto pilota su cui sono state effettuate le sperimentazioni oggetto del presente lavoro comprende una sezione di gassificazione (descritta più nel dettaglio nel capitolo 2 del presente rapporto) e due linee di trattamento del syngas per la produzione di idrogeno ed energia elettrica.

Rispetto alle annualità precedenti del progetto CERSE, l'impianto nel suo complesso e il gassificatore nello specifico sono stati opportunamente modificati e messi a punto per migliorare la stabilità del processo e integrare, in termini di quantità e attendibilità delle informazioni acquisite, il sistema di analisi dei dati sperimentali.

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test di gassificazione effettuati nel corso della campagna sperimentale suddetta. In particolare:

- il secondo capitolo riporta una descrizione sintetica del gassificatore pilota Sotacarbo e delle modifiche impiantistiche recentemente apportate;
- il terzo capitolo riporta sinteticamente gli obiettivi e l'organizzazione della campagna sperimentale in oggetto, le caratteristiche dei combustibili impiegati e la definizione dei principali parametri di valutazione del processo di gassificazione;
- il quarto capitolo descrive per grandi linee le procedure operative adottate nel corso dei test;
- i capitoli cinque, sei e sette riportano l'analisi delle prestazioni generali del processo di gassificazione con diversi combustibili o miscele di combustibili;
- l'ottavo capitolo riporta alcune considerazioni risultanti dall'esito di alcuni test di gassificazione di lunga durata;
- infine, il nono capitolo presenta una elaborazione di massima dei risultati sperimentali ottenuti nel corso di un test preliminare di gassificazione di cippato di legno.

## 2. La sezione di gassificazione dell'impianto pilota Sotacarbo

La sezione di gassificazione dell'impianto pilota Sotacarbo è costituita principalmente da un reattore di gassificazione a letto fisso up-draft, utilizzando principalmente (ma non esclusivamente) aria come agente gassificante 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 e il controllo dei parametri di processo.

### 2.1 Il reattore di gassificazione

Il gassificatore pilota 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. Come anticipato, il reattore, sviluppato per gassificare differenti tipologie di carbone, è stato impiegato anche per effettuare test preliminari di gassificazione e co-gassificazione di biomasse.

Il gassificatore ha un diametro interno di 300 mm e un'altezza complessiva pari a 2000 mm, con un'altezza massima del letto di combustibile pari a circa 1750 mm.

Il combustibile viene introdotto all'interno del gassificatore dall'alto, attraverso un condotto coassiale allo stesso reattore; il profilo termico è determinato mediante tre differenti sistemi di analisi delle temperature:

- una termocoppia multipla dotata di undici sensori distribuiti lungo tutta l'altezza del reattore, leggermente decentrata (per ragioni di carattere costruttivo) rispetto all'asse;
- una serie di 30 termocoppie disposte, su 10 differenti livelli, sulla superficie esterna del reattore;
- una serie di 7 termocoppie disposte in punti differenti della griglia di supporto del letto combustibile.



Figura 2.1. La parte inferiore del gassificatore pilota.

Il letto di combustibile poggia sopra una griglia metallica messa a punto da Sotacarbo, nel corso della precedente campagna sperimentale, in sostituzione della griglia originale, che presentava notevoli problemi relativi allo scarico delle ceneri. La griglia consente l'introduzione nel letto di combustibile degli agenti gassificanti (aria e vapore, nelle condizioni nominali di funzionamento), i quali vengono miscelati all'esterno

del reattore, portati alla temperatura desiderata (fino a 350 °C, mediante un apposito riscaldatore elettrico) e immessi al di sotto della griglia stessa.

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 12 mm) a protezione della griglia, sopra il quale è posizionato uno strato di pellet di legno (additivato con un materiale paraffinico altamente infiammabile per favorire l'avvio delle reazioni di combustione) e uno strato di coke e carbone, per un totale di 60 dm<sup>3</sup> di carica iniziale.

L'accensione vera e propria del letto avviene con l'ausilio di tre lampade ceramiche a irraggiamento, che riscaldano il pellet di legno in loro prossimità favorendo l'avvio delle reazioni di combustione [1, 2].

## 2.2 Sistema di regolazione e controllo dell'impianto

La maggior parte delle operazioni di gestione e controllo dell'impianto vengono gestite in modalità manuale da un apposito sistema di regolazione e controllo. In particolare, il sistema permette di regolare i principali parametri di processo (sia del gassificatore che delle varie linee di trattamento del syngas), l'apertura o chiusura delle valvole e così via, nonché di acquisire in automatico i principali dati di processo (pressioni, temperature, portate, eccetera).

A titolo di esempio, la figura 2.2 mostra uno dei sinottici di controllo del processo di gassificazione.

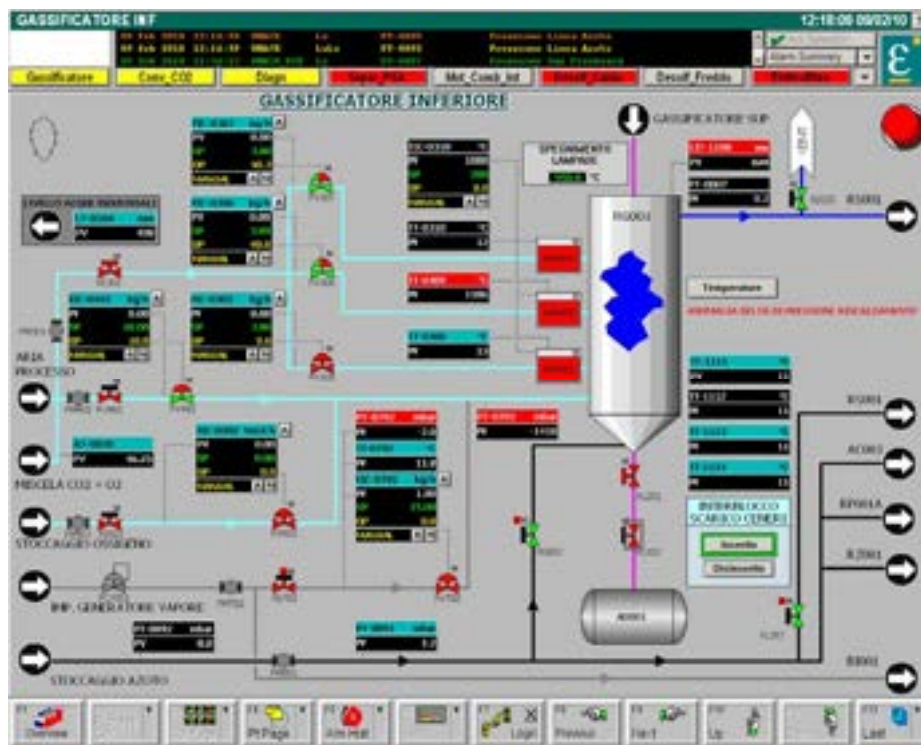


Figura 2.2. Uno dei sinottici del sistema di regolazione e controllo dell'impianto pilota.

## 2.3 Sistema di campionamento e analisi

A supporto delle sperimentazioni, il sistema 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.

### Composizione del gas

La composizione del syngas è misurata principalmente mediante un gas cromatografo portatile Agilent 3000, 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<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, COS, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> [2, 3]. Sono inoltre

installati due misuratori di ossigeno che assolvono al doppio ruolo di controllo di sicurezza, al fine di evitare il crearsi di atmosfere esplosive, e di indicatore delle prestazioni del processo.

È inoltre presente un sistema di campionamento e analisi del tar, descritto più nel dettaglio nel documento “Caratterizzazione sistemi di campionamento e analisi a supporto delle attività d’impianto” (Plaisant et al., 2011), elaborato nell’ambito dello stesso progetto di ricerca.

#### Nuovo sistema di analisi dei gas

Al fine di ottenere una ridondanza delle misure e una maggiore frequenza delle stesse, è stato recentemente acquistato un nuovo sistema di analisi del gas. Esso è costituito da un armadio ABB contenente i seguenti analizzatori gas:

- misura delle concentrazioni di CO, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> tramite modulo URAS26 di tipo IR (raggi infrarossi), con i seguenti campi di misura:
  - CO<sub>2</sub>: 0-25% in volume;
  - CH<sub>4</sub>: 0-5% in volume;
  - CO: 0-30% in volume;
- misura della concentrazione di H<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> tramite modulo Magnos 206 di tipo paramagnetico, con campo di misura tra lo 0 e il 25% in volume;
- misura della concentrazione di H<sub>2</sub>S tramite modulo Limas 11 di tipo a raggi ultravioletti, con campo di misura tra lo 0 e il 2% in volume.

L’armadio è inoltre dotato di un sistema di aspirazione e condizionamento del gas campione, dotato di un sistema di aspirazione e raffreddamento e di un filtro ceramico sinterizzato, assemblato all’esterno dell’armadio di analisi

Il sistema di analisi del syngas è completato da un sistema di trasporto, acquisizione e registrazione dati di fornitura Fluenter Srl.

Per una descrizione dettagliata di tale sistema di analisi si rimanda al documento “Acquisizione e sperimentazione di un sistema di analisi online del syngas” (Orsini et al., 2012), redatto nell’ambito dello stesso progetto di ricerca.

#### Determinazione del profilo termico all’interno del gassificatore

Come accennato, il profilo di temperatura all’interno del gassificatore è misurato mediante tre differenti sistemi di analisi.

Il primo sistema è costituito da una termocoppia multipla dotata di undici sensori, disposti l’uno dall’altro a una distanza di 15 o 20 mm, a seconda della posizione all’interno del reattore [4, 5]. La termocoppia, disposta verticalmente in prossimità dell’asse del gassificatore, è capace di resistere a temperature fino ai 1250 °C.

Il secondo sistema, di recente introduzione, è costituito da una serie di 30 termocoppie disposte su 10 livelli sulla superficie esterna del gassificatore. Tale sistema consente di analizzare l’andamento, nel corso della prova, delle temperature superficiali del letto combustibile.

Infine, il terzo sistema è costituito da 7 termocoppie disposte in differenti punti della griglia di sostegno del letto combustibile.

### 3. Obiettivi della campagna sperimentale

Con riferimento al solo processo di gassificazione, il principale obiettivo dell'intera campagna sperimentale è stato quello di perfezionare le modalità di gestione del processo andando a determinare le condizioni operative che consentano di ottenere, con differenti combustibili o miscele di combustibili, una elevata stabilità principalmente in termini di profili termici e composizione del syngas.

Oltre a tale obiettivo generale, la campagna sperimentale è stata programmata al fine di raggiungere una serie di ulteriori obiettivi complementari, necessari per una maggiore conoscenza del processo di gassificazione. Tra tali obiettivi, i principali sono quelli di seguito riportati:

- determinazione dell'influenza, sulle prestazioni del processo, della tipologia di combustibile;
- analisi preliminare del processo di gassificazione di biomasse e di co-gassificazione delle stesse con il carbone;
- verifica, mediante prove sperimentali specifiche, della possibilità del gassificatore di mantenere per lunghi periodi condizioni di funzionamento ottimali e quanto più possibile stabili.

#### 3.1 Programmazione e obiettivi delle singole prove

Relativamente al solo processo di gassificazione, al fine di raggiungere gli obiettivi suddetti, è stata programmata una serie di 17 prove sperimentali (per un totale di circa 300 ore di sperimentazione) nelle quali il processo di gassificazione è stato testato in differenti condizioni operative e con differenti combustibili. Fatta eccezione per alcuni test di sola gassificazione, in generale le prove sperimentali sono state programmate anche per analizzare le prestazioni delle altre apparecchiature dell'impianto pilota.

In particolare, la tabella 3.1 riporta una sintesi schematica delle prove sperimentali finora effettuate sul processo di gassificazione e i combustibili impiegati volta per volta. Per una caratterizzazione più dettagliata degli stessi si rimanda al successivo paragrafo 3.2. Come evidente dalla tabella, in alcuni di tali test sperimentali il processo di gassificazione è stato impiegato per la produzione di syngas da inviare ad alcuni dei sistemi di trattamento o di utilizzo dello stesso (tra cui la linea a caldo e il motore a combustione interna). In alcuni di questi casi, le prestazioni vere e proprie del processo di gassificazione sono meno significative dal punto di vista dell'analisi e della comparazione dei dati, in quanto effettuate con condizioni operative stabilite ad hoc per il funzionamento dei processi a valle.

Tabella 3.1. Organizzazione dei test sperimentali.

	<i>Data</i>	<i>Obiettivo principale della prova</i>	<i>Combustibile impiegato</i>
1	27/10/2011	Test preliminare gassif. carbone Usibelli	Carbone Usibelli (Alaska)
2	10/11/2011	Gassificazione carbone Usibelli	Carbone Usibelli (Alaska)
3	16/11/2011	Gassificazione carbone Usibelli	Carbone Usibelli (Alaska)
4	14/12/2011	Funzionamento motore	70% carbone sudafricano + 30% pellet legno
5	02/02/2012	Gassificazione e motore	Carbone Usibelli (Alaska)
6	05/04/2012	Gassificazione e motore	90% carbone Usibelli + 10% carbone Sulcis
7	03/05/2012	Gassificazione e motore	Carbone russo
8	09/05/2012	Test preliminare di biogassificazione	Cippato di legno locale (pinus pinea)
9	07/06/2012	Gassificazione e motore	95% carbone Usibelli + 5% carbone Sulcis
10	14/06/2012	Gassificazione e linea a caldo	95% carbone russo + 5% carbone Sulcis
11	20/06/2012	Test di gassificazione di lunga durata (36 ore)	95% carbone russo + 5% carbone Sulcis
12	28/06/2012	Gassificazione e linea a caldo	95% carbone russo + 5% carbone Sulcis
13	05/07/2012	Gassificazione e linea a caldo	80% carbone sudafricano + 20% pellet di legno
14	12/07/2012	Gassificazione ed elettrifiltro	80% carbone russo + 20% carbone Sulcis
15	19/07/2012	Test di gassificazione di lunga durata (36 ore)	60% carbone russo + 40% carbone Sulcis
16	26/07/2012	Gassificazione e rimozione CO <sub>2</sub> linea a freddo	60% carbone russo + 40% carbone Sulcis
17	02/08/2012	Gassificazione e rimozione CO <sub>2</sub> linea a freddo	60% carbone russo + 40% carbone Sulcis

### 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 nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente documento.

Tabella 3.2. Caratterizzazione dei combustibili impiegati.

Tipologia di combustibile	carbone carbone Sulcis	carbone Usibelli	carbone sudafricano	carbone russo	cippato di legno	pellet di legno
Provenienza	Sardegna	Alaska	Sudafrica	Russia	Sardegna	n.d.
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>						
Carbonio fisso	40,65	31,33	72,58	80,19	18,30	17,70
Umidità	7,45	17,64	3,64	2,38	7,70	8,57
Volatili	40,45	41,00	8,81	4,81	73,63	73,32
Ceneri	11,45	10,02	14,97	12,62	0,37	0,42
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>						
Carbonio totale	66,49	48,56	75,56	81,55	49,95	79,51
Idrogeno	6,18	5,96	3,86	1,64	6,14	11,18
Azoto	1,41	0,50	1,40	0,79	0,11	0,32
Zolfo	7,02	0,18	0,57	1,01	0,00	0,00
Ossigeno	n.d.	17,14	n.d.	n.d.	35,74	n.d.
Umidità	7,45	17,64	3,64	2,38	7,70	8,57
Ceneri	11,45	10,02	14,97	12,62	0,37	0,42
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>						
Potere calorifico superiore	22,59	19,46	28,10	29,39	18,76	18,45
Potere calorifico inferiore	21,07	17,75	27,18	28,96	17,25	16,85

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

#### 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.

#### 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.

### 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):

$$H_s \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = 33950 \cdot X_C + 144200 \cdot \left( X_{H_2} - \frac{X_{O_2}}{8} \right) + 9400 \cdot X_S \quad (3.1)$$

$$H_i \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = H_s - 2400 \cdot (X_{H_2O} + 9 \cdot X_{H_2}) \quad (3.2)$$

in cui  $X_C$ ,  $X_{H_2}$ ,  $X_{O_2}$ ,  $X_S$ ,  $X_{H_2O}$  rappresentano rispettivamente le frazioni massiche di carbonio, idrogeno, ossigeno, zolfo e umidità.

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.

### 3.3 Definizione dei parametri caratteristici delle prestazioni del processo

Nel presente paragrafo sono definiti i parametri impiegati nel seguito per caratterizzare le prestazioni del processo di gassificazione nelle diverse condizioni operative.

#### Potenzialità

La potenzialità dell'impianto è stata espressa in termini di consumo orario di combustibile nelle fasi di funzionamento "a regime" del processo di gassificazione. La valutazione è stata fatta mediando, in un intervallo di tempo congruo, la quantità di combustibile introdotta nel reattore al fine di mantenere quanto più possibile costante il livello del letto. Per come è determinato, tale parametro è tanto più accurato quanto maggiore è la reattività del combustibile (o della miscela di combustibili) a cui è riferito. Infatti, a parità di ampiezza dell'intervallo temporale considerato per la valutazione delle prestazioni medie del processo, per combustibili più reattivi la potenzialità è calcolata sulla base di un maggiore numero di caricamenti ed è meno condizionata dalla quantità di materiale residuo scaricato dal fondo del reattore.

È importante sottolineare che, in generale, la potenzialità del processo è fortemente dipendente dalla reattività e dalla composizione del combustibile impiegato e dalle condizioni operative dell'impianto (portate di agenti gassificanti, tempi di permanenza del combustibile nel letto, profili termici e così via).

#### Resa del gassificatore

La resa del gassificatore (*gasifier yield*) esprime la quantità specifica di syngas prodotto in rapporto alla portata massica del combustibile gassificato:

$$Y = \frac{\dot{V}_S}{\dot{m}_C} \quad (3.3)$$

dove con  $\dot{V}_S$  si indica la portata volumetrica del syngas (espressa in Nm<sup>3</sup>/h) e con  $\dot{m}_C$  la portata massica di carbone (in kg/h).

### Rendimento di gas freddo

Il principale parametro comunemente utilizzato per una valutazione generale di un processo di gassificazione è il rendimento di gas freddo  $\eta_{GF}$  (*cold gas efficiency*), definito come il rapporto tra la potenza chimica (prodotto tra portata e potere calorifico) prodotta dal gassificatore sotto forma di syngas e quella introdotta nel gassificatore sotto forma di carbone:

$$\eta_{GF} = \frac{\dot{m}_S \cdot H_{iS}}{\dot{m}_C \cdot H_{iC}} \quad (3.4)$$

in cui  $\dot{m}_S$  ed  $\dot{m}_C$  sono rispettivamente le portate massiche di syngas e carbone (in kg/h), mentre  $H_{iS}$  e  $H_{iC}$  sono rispettivamente i poteri calorifici inferiori (in MJ/kg) degli stessi combustibili.

Tutti gli altri contributi energetici (quali, ad esempio, il contributo energetico associato all'immissione di vapore) non sono considerati da tale parametro, che è una conseguenza diretta del potere calorifico inferiore del carbone e della composizione del syngas prodotto.

### Rendimento di gas caldo

Un ulteriore parametro frequentemente utilizzato per caratterizzare un processo di gassificazione è il cosiddetto rendimento di gas caldo (*hot gas efficiency*) che, rispetto al rendimento di gas freddo, tiene conto di tutti gli apporti e le produzioni energetiche del processo di gassificazione.

Tale rendimento è definito dalla relazione generale seguente:

$$\eta_{GC} = \frac{\dot{m}_S \cdot (H_{iS} + h_S) + \dot{m}_V \cdot (h_V - h_A)}{\dot{m}_C \cdot H_{iC} + Q_p + \frac{L_p}{\eta_e}} \quad (3.5)$$

Il primo termine a numeratore indica la somma dell'energia chimica e termica associata al syngas prodotto, tenente conto sia del contributo chimico, espresso in termini di potere calorifico inferiore, che dell'energia termica associata al gas (e ipoteticamente recuperabile da un suo raffreddamento fino a temperatura ambiente), moltiplicati per la portata massica. Il secondo termine a numeratore indica l'energia termica (espressa come prodotto tra portata massica e variazione di entalpia) associata all'eventuale produzione di vapore all'interno del processo, termine che dunque non sussiste nel caso del processo in questione [4].

I termini indicati a denominatore rappresentano invece i consumi di energia chimica, termica e meccanica, rispettivamente. In particolare, l'energia chimica associata al combustibile gassificato è pari al prodotto tra portata e potere calorifico inferiore. Il termine  $Q_p$  rappresenta l'apporto esterno di energia termica che, nella fattispecie, può essere assunto pari all'energia termica necessaria per la produzione del vapore di processo (vapore che, alla pressione di 0,14 MPa passa dalla fase liquida alla temperatura di 25 °C alla fase vapore alla temperatura di 110 °C, con una variazione di entalpia pari a 2585,35 kJ/kg). Infine, nel caso in esame, per via delle specifiche caratteristiche del gassificatore Sotacarbo, il termine relativo all'energia meccanica può essere completamente trascurato.

## 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 sul processo di gassificazione. Le modifiche alle procedure operative rispetto a quelle impiegate nelle precedenti campagne sperimentali e all'inizio della campagna oggetto del presente documento sono state principalmente due.

1. Nei test condotti con tipologie di carbone differenti da quello sud africano (carboni Usibelli e russo e miscele di carboni russo e Sulcis) la tempistica di aumento della temperatura (successivamente al completamento della fase di accensione con le lampade ceramiche) è risultata essere molto lenta (alcune ore). Per tale ragione, la portata dell'aria viene aumentata già nella fase di start-up fino a circa 50-60 kg/h, per poi essere regolata diversamente durante il funzionamento. Nei test con il carbone sud africano, invece, la portata d'aria durante la fase di start-up viene mantenuta pari a circa 20 kg/h.
2. L'argilla, utilizzata come materiale inerte a protezione della griglia in fase di accensione, è stata sostituita con della ghiaia di granulometria tra 8 e 12 mm. Tale modifica è stata adottata principalmente al fine di risolvere il problema dell'agglomerazione dei residui sul fondo del gassificatore, favorita, alle alte temperature, dalla presenza dell'argilla espansa.

### 4.1 Verifiche e avviamento delle apparecchiature ausiliarie

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

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. torcia per la combustione del syngas;
5. generatore di vapore;
6. pompe di invio dell'acqua all'impianto;
7. altre apparecchiature eventualmente impiegate per alcuni test sperimentali specifici.

### 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.

#### Caricamento iniziale del reattore

Il reattore viene inizialmente caricato dall'alto con 10 dm<sup>3</sup> di argilla espansa (introdotta allo scopo di proteggere la griglia di sostegno del letto dal materiale in fase di combustione e, come anticipato, sostituita, nel corso della campagna sperimentale con ghiaia), 10 dm<sup>3</sup> di pellet di legno (al quale viene aggiunto del materiale paraffinico per facilitarne l'ignizione), 10 dm<sup>3</sup> di coke e 30 dm<sup>3</sup> di carbone o, in generale, del combustibile impiegato per la prova. Tali materiali, caricati in successione e in maniera stratificata per un totale di 60 dm<sup>3</sup> (corrispondenti a un'altezza di circa 850 mm), costituiscono il letto del reattore nel corso della fase di avviamento.

#### Inertizzazione del sistema

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 30 m<sup>3</sup>/h per sette minuti assicura l'inertizzazione di tutto l'impianto pilota (qualsiasi sezione sia coinvolta durante la prova).

#### Accensione del letto combustibile

L'accensione del reattore di gassificazione avviene per mezzo di tre resistenze elettriche (lampade di accensione) in materiale ceramico poste a contatto con il letto di combustibile in prossimità dello strato di pellet di legno.

Le lampade vengono alimentate elettricamente, portate alla temperatura di 750-800 °C e mantenute in tale condizione per dieci minuti circa, al fine di consentire il riscaldamento delle zone limitrofe del letto combustibile. Dopo tale tempo viene inviata, attraverso ciascuna lampada, una portata d'aria pari a circa 3 kg/h al fine di dare avvio alla combustione. Una volta verificata l'accensione del letto (in base all'incremento di temperatura in prossimità delle resistenze ceramiche), l'alimentazione elettrica delle lampade viene interrotta, come pure l'invio dell'aria attraverso le stesse; contestualmente viene attivato l'invio dell'aria (inizialmente con una portata di circa 20 kg/h) attraverso la griglia di supporto del letto combustibile. Successivamente viene acceso il riscaldatore elettrico degli agenti gassificanti al fine di velocizzare e favorire l'accensione del gassificatore.

Tipicamente, nel corso di tale fase si avvia il campionamento del gas, al fine di verificare il comportamento del processo.

#### Messa a regime del processo

Una volta terminata la fase di accensione vera e propria, il processo di gassificazione dev'essere portato a regime per l'esecuzione della prova sperimentale.

Quando la temperatura in prossimità dell'ultimo sensore (il più vicino alla griglia) della termocoppia multipla interna al gassificatore raggiunge il valore di circa 900 °C si opera lo scarico graduale del materiale inerte e si carica progressivamente il reattore con la quantità di carbone necessaria a portare il livello del letto ai valori predefiniti per la specifica prova. Successivamente, quando sono stati scaricati circa 7 dm<sup>3</sup> di ghiaia o argilla, si inizia a inviare il vapore, la cui portata, insieme a quella dell'aria, viene regolata progressivamente fino a raggiungere i valori prefissati per lo specifico test sperimentale. Infine si carica una quantità di carbone sufficiente a raggiungere il livello richiesto all'interno del gassificatore (pari generalmente a 1,5 m).

### 4.3 Fase operativa

La fase operativa dell'impianto e, nello specifico, della sezione di gassificazione è fortemente condizionata dai parametri operativi individuati per la specifica prova sperimentale; oltre ad essi è altresì necessario controllare una serie di parametri chiave per la sicurezza dell'impianto.

A tale proposito si può osservare quanto segue:

1. l'ossigeno nel syngas (misurato mediante gli appositi rilevatori posti a valle del gassificatore) dovrebbe tipicamente mantenersi intorno all'1% in volume (spesso, soprattutto nelle prime fasi della prova, si riscontrano concentrazioni superiori a tale valore, generalmente conseguenza delle basse temperature operative o del livello troppo basso del letto combustibile o delle basse pressioni nelle linee di processo che provocano l'aspirazione, nelle fasi di campionamento del gas, anche di aria esterna);
2. gli scarichi delle ceneri vengono tipicamente operati ogni 120 minuti; in generale si tende a limitare la quantità di materiale scaricato (con valori massimi di 1-2 dm<sup>3</sup>) al fine di alterare il meno possibile la stabilità del processo;
3. i caricamenti di combustibile vengono effettuati periodicamente al fine di mantenere quanto più possibile costante l'altezza del letto; anche in tal caso si tende a limitare il singolo caricamento a circa 10 dm<sup>3</sup>, al fine di non perturbare in maniera eccessiva il processo;
4. la temperatura massima di gassificazione viene mantenuta a valori dell'ordine 1050-1100 °C (sufficientemente distanti dal limite massimo ammissibile di temperatura, determinato dai materiali di cui è costituita la termocoppia multipla e pari a 1250 °C).

#### 4.4 Fase di shut-down

Al termine della fase sperimentale vera e propria, si procede allo spegnimento (*shut-down*) del processo, effettuato secondo le fasi di seguito descritte per grandi linee:

1. spegnimento del riscaldatore della miscela gassificante;
2. riduzione della portata di aria inviata dal di sotto della griglia di sostegno del letto fino a 10 kg/h;
3. incremento della portata di vapore fino ai valori massimi consentiti dal generatore, al fine di accelerare il raffreddamento del letto;
4. scarico, in fasi successive, dell'intero materiale costituente il letto di combustibile, fino al completo svuotamento del reattore;
5. apertura degli scarichi del gas in atmosfera;
6. incremento della portata d'aria fino a 50 kg/h e verifica (per un tempo prestabilito, pari tipicamente a 15 minuti) delle temperature all'interno del gassificatore (una risalita delle temperature è indice della presenza di materiale residuo all'interno del reattore; in tal caso si ripete la procedura dal sopra citato punto 4);
7. spegnimento del generatore di vapore e interruzione dei campionamenti e delle analisi del gas (effettuati mediante il gascromatografo);
8. spegnimento della torcia;
9. inertizzazione dell'impianto mediante una corrente di azoto per un tempo prefissato;
10. disattivazione delle pompe di ricircolo dello scrubber e svuotamento del serbatoio di accumulo dell'acqua di lavaggio;
11. disattivazione delle apparecchiature ausiliarie ancora in funzione e interruzione dell'alimentazione elettrica.

## 5. Test di gassificazione con carbone Usibelli (Alaska)

I primi test di gassificazione effettuati nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente documento sono stati condotti con un carbone proveniente dall'Alaska e fornito dalla Usibelli Coal Mine, Inc.

Il carbone Usibelli è una lignite, con un'età geologica che va dagli 8 ai 20 milioni di anni, situata in vene in gran parte superficiali. Nel 2011 la Usibelli Coal Mine, Inc. ha estratto circa 2,2 milioni di tonnellate di carbone, in parte impiegato localmente per la generazione di energia elettrica e in parte esportato, principalmente in Asia e Sud America<sup>1</sup>.

Come verrà esposto nel seguito del presente capitolo, grazie alla sua elevata reattività e all'alto contenuto di volatili, il carbone Usibelli ha mostrato, tra i vari combustibili sperimentati, le migliori prestazioni in termini di produttività del syngas.

### 5.1 Test sperimentali con carbone Usibelli

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente documento, sono stati effettuati sette test sperimentali con carbone Usibelli, in tre occasioni miscelato con il 5 o il 10% di carbone Sulcis (anch'esso molto reattivo).

I primi tre test sperimentali, effettuati tra ottobre e novembre 2011 (vedasi al riguardo la tabella 3.1) sono da considerarsi preliminari. Infatti, essendo tale carbone molto differente dai vari combustibili precedentemente impiegati, è stato necessario effettuare più test per trovare le condizioni operative ottimali. Nel corso del primo di tali test (effettuato in data 27/10/2011) si sono presentati numerosi problemi di controllo della temperatura, mentre nel corso dei due test successivi diversi problemi tecnici (tra cui la parziale fusione delle ceneri per via del raggiungimento di temperature di processo elevate) hanno reso impossibile un preciso controllo dell'impianto. Conseguentemente i risultati di tali test preliminari, pur fornendo le informazioni necessarie all'ottimizzazione del processo, non hanno fornito dati sperimentali significativi ai fini della presente analisi globale del processo di gassificazione.

Nel corso della quarta prova sperimentale con carbone Usibelli (effettuata in data 2/02/2012) si sono avuti ulteriori problemi di stabilità delle temperature, anche alla luce del fatto che, al fine di avviare il motore, le condizioni di gassificazione sono state ripetutamente modificate. Nel corso del test sono stati comunque gassificati mediamente 8-10 kg/h di carbone, con una produzione di syngas contenente tipicamente fino al 20% (in volume) di idrogeno e al 30% (sempre in volume) di monossido di carbonio.

Risultati molto più interessanti si sono avuti nel corso delle prove nelle quali il carbone Usibelli è stato miscelato al carbone Sulcis. In particolare, nel seguito si fa riferimento al test sperimentale del 7/06/2012, effettuato con il 95% di carbone Usibelli e solo il 5% di carbone Sulcis, durante il quale, nella fase di maggior carico, sono stati consumati circa 24 kg/h di carbone con una elevata produzione di syngas che ha consentito l'impiego del motore a combustione interna al carico massimo raggiungibile (24 kW).

La seguente tabella 5.1 riprende le composizioni dei carboni Usibelli e Sulcis e presenta la composizione media della miscela considerata nel corso della suddetta prova sperimentale.

---

<sup>1</sup> Fonte: Usibelli Coal Mine, Inc. website: [www.usibelli.com](http://www.usibelli.com), giugno 2012.

Tabella 5.1. Caratterizzazione della miscela combustibile Usibelli (95%) e Sulcis (5%).

Tipologia di combustibile Provenienza	Carbone		miscela
	Usibelli Alaska	carbone Sulcis Sardegna	
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>			
Carbonio fisso	31,33	40,65	31,80
Umidità	17,64	7,45	17,12
Volatili	41,00	40,45	40,97
Ceneri	10,02	11,45	10,09
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>			
Carbonio totale	48,56	66,49	49,46
Idrogeno	5,96	6,18	5,97
Azoto	0,50	1,41	0,54
Zolfo	0,18	7,02	0,52
Ossigeno	17,14	n.d.	16,28
Umidità	17,64	7,45	17,13
Ceneri	10,02	11,45	10,09
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>			
Potere calorifico superiore	19,46	22,59	19,62
Potere calorifico inferiore	17,75	21,07	17,92

## 5.2 Profili termici

Sempre con riferimento al test sperimentale del 7/06/2012, la figura 5.1 mostra i profili termici istantanei all'interno del gassificatore in tre fasi differenti della prova:

- inizio dell'invio di vapore nel gassificatore (ore 16:00);
- fase di funzionamento a pieno carico (ore 18:30);
- circa 30 minuti prima dell'inizio della procedura di *shut-down* (ore 21:30).

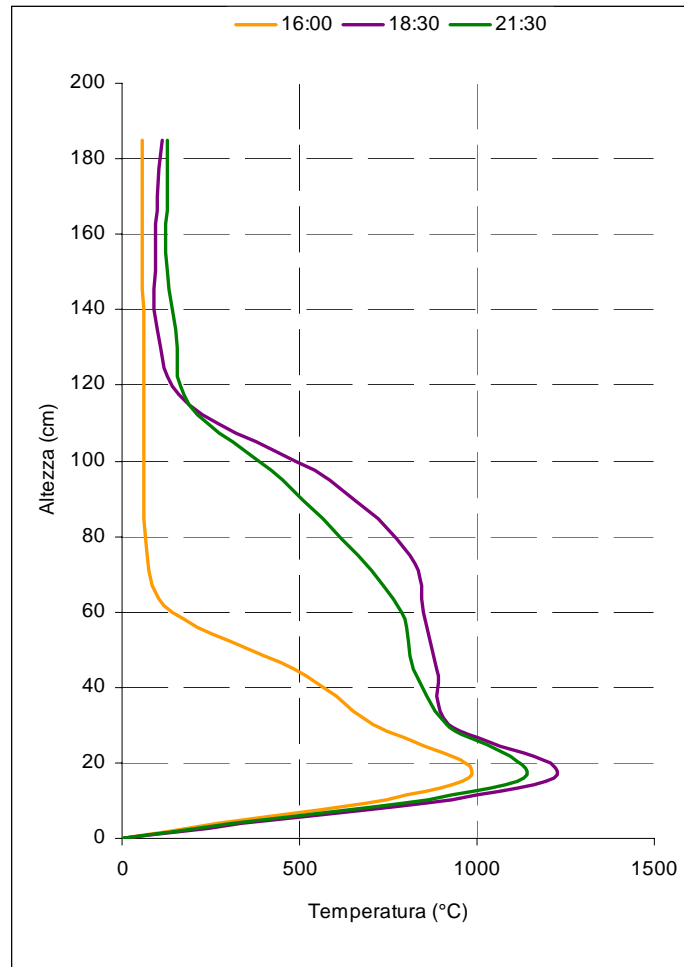


Figura 5.1. Profili termici all'interno del gassificatore.

Dalla figura è evidente il tipico profilo a “naso”, caratteristico dei processi di gassificazione in letto fisso *up-draft*. Trattandosi inoltre di profili termici istantanei, è anche evidente la stabilità della temperatura nel corso della prova, palesata dalla somiglianza tra il profilo termico rilevato alle 18:30 e quello misurato prima dell’inizio della procedura di *shut-down*.

### 5.3 Prestazioni globali del processo di gassificazione

La tabella 5.2 riporta una sintesi delle prestazioni globali del processo di gassificazione riscontrate nel corso del test sperimentale del 7/06/2012 effettuato con una miscela di carbone Usibelli (95%) e carbone Sulcis (5%).

Tabella 5.2. Prestazioni globali del processo di gassificazione di miscele di carbone Usibelli/Sulcis.

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo carbone (kg/h)	24,0
Potere calorifico inferiore della miscela (MJ/kg)	18,03
Portata d'aria (kg/h)	57,63
Portata di vapore (kg/h)	9,54
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,2367
CO <sub>2</sub>	0,0770
H <sub>2</sub>	0,1778
N <sub>2</sub>	0,4726
CH <sub>4</sub>	0,0173
H <sub>2</sub> S	0,0007
COS	0,0002
O <sub>2</sub>	0,0018
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	79,67
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	72,90
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	5,114
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,226
Pressione del syngas (MPa)	0.14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	79,4
Temperatura massima di reazione (°C)	992,6
Rendimento di gas freddo	94,16
Rendimento di gas caldo	90,25
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	3,04

Dalla tabella emerge che la gassificazione di 24 kg/h di carbone Usibelli (contenente un 5% di carbone Sulcis) ha consentito la produzione di circa 73 Nm<sup>3</sup>/h di syngas, caratterizzato da un contenuto medio di idrogeno del 17-18% (in volume), da una concentrazione di monossido di carbonio del 23-24% (anch'essa in volume) e da un potere calorifico inferiore pari a 5,1 MJ/kg. In tali condizioni, il rendimento di gas freddo è pari al 94,16% e la resa del gassificatore è di 3,04 Nm<sup>3</sup>/kg.

L'elevata portata di syngas prodotta è dovuta principalmente alla maggiore reattività del carbone Usibelli rispetto, ad esempio, al carbone sudafricano e alla conseguente maggiore portata di aria che è stato possibile inviare al gassificatore. La gestione del gassificatore con un'elevata portata di aria è stata possibile anche grazie all'elevata stabilità termica di cui si è accennato in precedenza, che ha permesso alle temperature di non aumentare eccessivamente.

Infatti nel corso della prova le temperature sono rimaste piuttosto basse, con poco meno di 1000 °C in prossimità della griglia e circa 80 °C nel freeboard del reattore. Questo è dovuto in gran parte all'elevata umidità e al basso potere calorifico inferiore della miscela combustibile impiegata; d'altra parte, per via delle basse temperature di rammollimento delle ceneri del carbone Usibelli.

## 6. Test di gassificazione con carbone sudafricano

Nel corso delle precedenti campagne sperimentali, il carbone sudafricano ha confermato di avere una reattività estremamente limitata per il processo di gassificazione della piattaforma Sotacarbo. Ciò è evidente, tra le altre cose, dal basso contenuto di volatili (mediamente poco meno del 9%) che caratterizza tale combustibile.

Proprio per tale motivo, nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente lavoro il carbone sudafricano è stato impiegato esclusivamente in tre test di gassificazione, in uno dei quali è stato utilizzato da solo mentre negli altri due è stato impiegato in miscela con pellet di legno (al 30 e al 20% in volume, rispettivamente).

### 6.1 Gassificazione del solo carbone sudafricano

Il test di gassificazione del solo carbone sudafricano è stato effettuato in data 15/03/2012 non tanto per testare il processo con tale combustibile, quanto piuttosto per avere un syngas dalle caratteristiche idonee a specifici test di funzionamento del precipitatore elettrostatico. Per tale ragione (unitamente ad alcuni problemi sul sistema di analisi dei gas), i risultati sperimentali di tale test non sono significativi ai fini dell'ottimizzazione del processo di gassificazione.

Nel complesso, nel corso del test di gassificazione del solo carbone sudafricano, sono stati consumati mediamente 3,1 kg/h di carbone, dato notevolmente inferiore ai valori ottimali (8-10 kg/h) riscontrati nella precedente campagna sperimentale [4]. Ciò è dovuto alla necessità di operare numerose regolazioni della portata d'aria, spesso anche inferiore ai 10 kg/h, al fine di verificare la concentrazione di ossigeno nel syngas nell'ottica dei citati test sul precipitatore elettrostatico.

Mediamente sono stati prodotti circa 15-20 Nm<sup>3</sup>/h di syngas, caratterizzato da una concentrazione di idrogeno del 9-10% e da una concentrazione di CO del 12-16% (entrambi in volume).

Le prestazioni ottimali del gassificatore Sotacarbo alimentato con solo carbone sudafricano sono quelle indicate nella tabella 6.1 [4], i cui risultati sono stati ottenuti nelle precedenti campagne sperimentali.

Tabella 6.1. Prestazioni ottimali del processo alimentato con solo carbone sudafricano.

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo carbone (kg/h)	8,0
Potere calorifico inferiore del carbone (MJ/kg)	27,2
Portata d'aria (kg/h)	36,8
Portata di vapore (kg/h)	6,0
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1807
CO <sub>2</sub>	0,0947
H <sub>2</sub>	0,1889
N <sub>2</sub>	0,5128
CH <sub>4</sub>	0,0151
H <sub>2</sub> S	0,0003
COS	0,0001
O <sub>2</sub>	0,0074
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	46,83
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	42,90
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	4,50
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,23
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	126
Temperatura massima di reazione (°C)	1034
Rendimento di gas freddo	96,93%
Rendimento di gas caldo	92,90%
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	5,36

### 6.2 Gassificazione del carbone sudafricano miscelato con pellet di legno

Nel corso di due differenti test sperimentali, il carbone sudafricano è stato miscelato con pellet di legno (al 30 e al 20% in volume, corrispondenti rispettivamente al 21 e al 14% in peso) al fine di incrementare la produzione di syngas da inviare al motore a combustione interna e alla linea di trattamento a caldo dello stesso syngas.

Nello specifico, la tabella 6.2 mostra le composizioni dei due differenti combustibili e delle miscele considerate.

Tabella 6.2. Caratterizzazione delle miscele di carbone sudafricano e pellet di legno.

Tipologia di combustibile Provenienza	carbone sudafricano Sudafrica	pellet di legno n.d.	misc. 30% (vol.) pellet	misc. 20% (vol.) pellet
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>				
Carbonio fisso	72,58	17,70	56,116	61,604
Umidità	3,64	8,57	5,119	4,626
Volatili	8,81	73,32	28,163	21,712
Ceneri	14,97	0,42	10,605	12,06
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>				
Carbonio totale	75,56	79,51	76,745	76,35
Idrogeno	3,86	11,18	6,056	5,324
Azoto	1,40	0,32	1,076	1,184
Zolfo	0,57	0,00	0,399	0,456
Ossigeno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Umidità	3,64	8,57	5,119	4,626
Ceneri	14,97	0,42	10,605	12,06
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>				
Potere calorifico superiore	28,10	18,45	25,20	26,17
Potere calorifico inferiore	27,18	16,85	24,08	25,11

Le due prove, per ragioni differenti, sono state condotte in condizioni differenti da quelle generalmente utilizzate per la gassificazione del carbone. Per tale ragione i risultati ottenuti dimostrano la necessità di una ulteriore ottimizzazione del processo di gassificazione delle miscele considerate.

### 6.3 Carbone sudafricano miscelato con pellet al 30% in volume

Come anticipato, nel corso del test del 14/12/2011, principalmente finalizzato all'accensione del motore a combustione interna, è stata gassificata una miscela di carbone sudafricano con pellet di legno (quest'ultimo al 30% in volume, corrispondente a circa il 21% in peso).

La seguente tabella 6.3 riepiloga le prestazioni globali del processo riscontrate nel corso di tale prova sperimentale.

Tabella 6.3. Prestazioni globali del processo di gassificazione (30% di pellet di legno).

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	7,1
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	24,1
Portata d'aria (kg/h)	61,6
Portata di vapore (kg/h)	11,5
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1751
CO <sub>2</sub>	0,1166
H <sub>2</sub>	0,1952
N <sub>2</sub>	0,4898
CH <sub>4</sub>	0,0103
H <sub>2</sub> S	0,0003
COS	0,0000
O <sub>2</sub>	0,0127
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	31,05
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	28,14
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	4,275
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,226
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	464
Temperatura massima di reazione (°C)	1000
Rendimento di gas freddo	77,64
Rendimento di gas caldo	74,47
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	3,96

Nel complesso, la gassificazione di 7,1 kg/h della miscela considerata ha consentito la produzione di circa 28 Nm<sup>3</sup>/h di syngas grezzo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore di 4,27 MJ/kg e da una concentrazione media di idrogeno e monossido di carbonio pari rispettivamente al 19,5 e al 17,5% (in volume).

Si fa notare che, a causa delle particolari condizioni di esercizio (dovute alla necessità di alimentare il motore a combustione interna) e di conseguenti problemi di pressione all'interno del reattore, parte dell'aria inviata al reattore non ha preso parte alle reazioni fuoriuscendo dal di sotto della griglia di scarico. Ciò spiega la minore portata di syngas prodotto rispetto all'aria immessa in ingresso al reattore.

La figura 6.1 riporta il profilo di temperatura all'interno del gassificatore registrato dalla sonda interna al gassificatore in tre differenti momenti della prova:

- inizio dell'invio di vapore nel gassificatore (ore 14:09);
- fase di funzionamento a pieno carico (ore 17:30);
- circa 30 minuti prima dell'inizio della procedura di *shut-down* (ore 22:55).

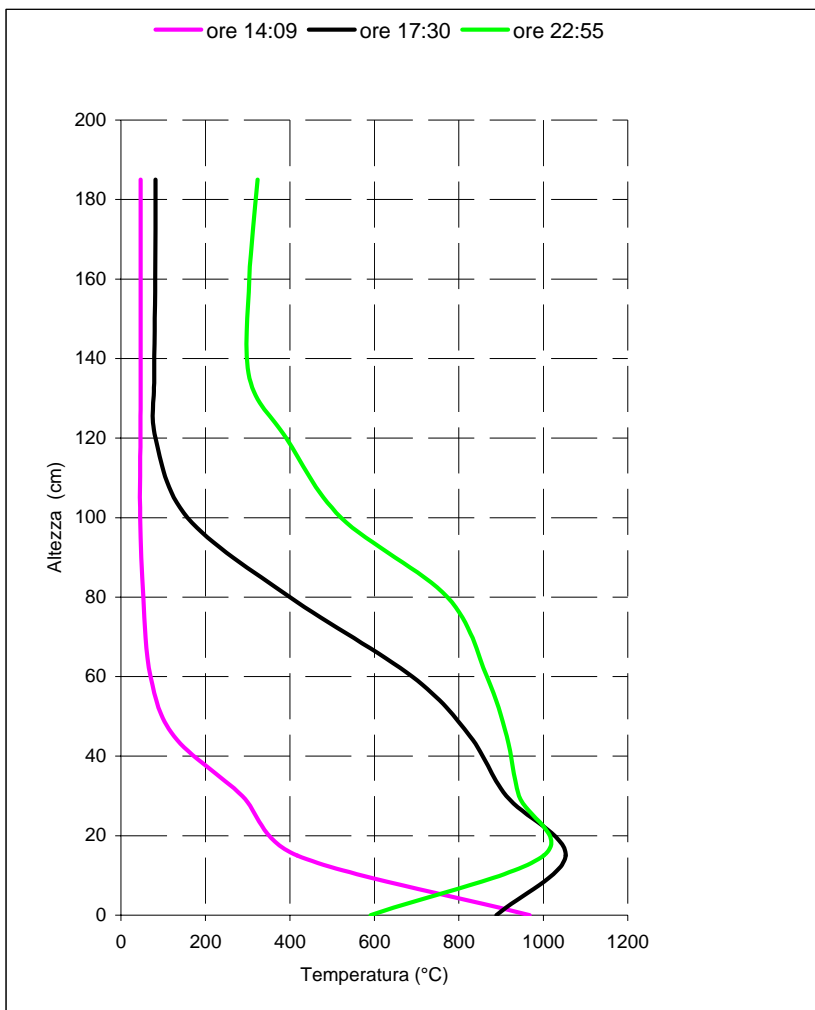


Figura 6.1. Profili di temperatura all'interno del gassificatore.

#### 6.4 Carbone sudafricano miscelato con con pellet al 20% in volume

Nel corso del test del 5/07/2012, principalmente finalizzato all'alimentazione della linea di trattamento a caldo del syngas, è stata gassificata una miscela di carbone sudafricano con pellet di legno (quest'ultimo al 20% in volume, corrispondente a circa il 14% in peso).

La seguente tabella 6.4 riassume le prestazioni globali del processo riscontrate nel corso di tale prova sperimentale.

Tabella 6.3. Prestazioni globali del processo di gassificazione (30% di pellet di legno).

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	8,5
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	25,1
Portata d'aria (kg/h)	31,6
Portata di vapore (kg/h)	7,2
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1408
CO <sub>2</sub>	0,1134
H <sub>2</sub>	0,1589
N <sub>2</sub>	0,5554
CH <sub>4</sub>	0,0167
H <sub>2</sub> S	0,0002
COS	0,0001
O <sub>2</sub>	0,0145
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	40,06
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	35,15
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	3,638
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,187
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	69
Temperatura massima di reazione (°C)	1002
Rendimento di gas freddo	68,28%
Rendimento di gas caldo	63,66%
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	4,13

Nel complesso, la gassificazione di 8,5 kg/h della miscela considerata ha consentito la produzione di circa 35 Nm<sup>3</sup>/h di syngas grezzo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore di 3,64 MJ/kg e da una concentrazione di idrogeno e monossido di carbonio pari rispettivamente al 15,9 e al 14,1% (in volume).

Anche in questo caso, le prestazioni del processo riscontrate nel corso di tale prova non sono da considerarsi ottimali; a causa della difficoltà nel controllo delle temperature sulla griglia, infatti, l'intera prova è stata condotta con una portata d'aria significativamente inferiore a quella tipicamente impiegata nel corso delle altre prove sperimentali.

La figura 6.2 riporta il profilo di temperatura all'interno del gassificatore registrato dalla sonda interna al gassificatore in tre differenti momenti della prova:

- inizio dell'invio di vapore nel gassificatore (ore 13:08);
- fase di funzionamento a pieno carico (ore 18:00);
- circa 30 minuti prima dell'inizio della procedura di *shut-down* (ore 20:00).

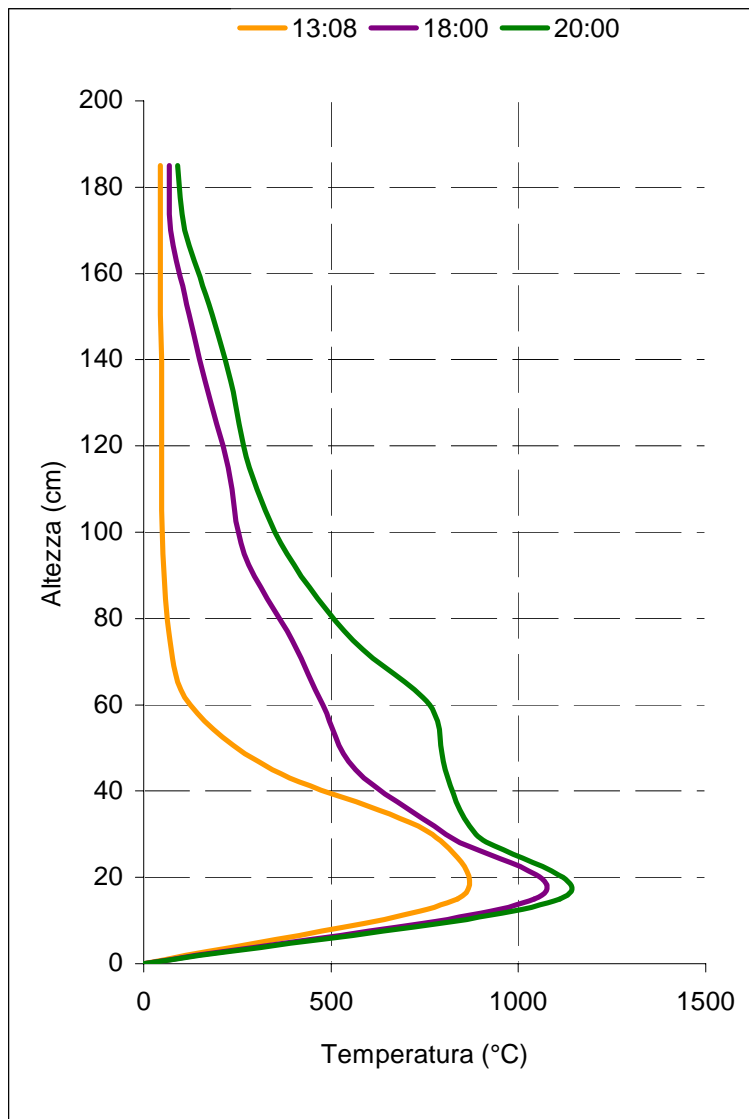


Figura 6.2. Profili di temperatura all'interno del gassificatore.

Fatta eccezione per la fase di avviamento, è evidente come in prossimità della griglia (dove avvengono le reazioni esotermiche di combustione) si registrino le temperature più alte, che poi decrescono progressivamente dal basso verso l'alto nelle zone in cui avvengono i processi endotermici di pirolisi, devolatilizzazione ed essiccazione del combustibile.

## 7. Test di gassificazione con carbone russo

Come risulta dalla tabella 3.1, nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente documento sono stati effettuati complessivamente otto test sperimentali (di cui due di lunga durata, descritti nei dettagli al capitolo 8 del presente documento) con carbone russo, al 100% o miscelato con altri combustibili (principalmente carbone Sulcis).

In particolare, sono state impiegate miscele di carbone russo con il 5, il 20 e il 40% di carbone Sulcis, oltre a una prova (discussa successivamente al paragrafo 8.1) nel corso della quale è stato aggiunto anche pellet di legno per aumentare la reattività.

La tabella 7.1 riporta le caratteristiche dei carboni russo e Sulcis e quelle delle miscele sopra citate.

Tabella 7.1. Caratterizzazione dei combustibili e delle miscele impiegati.

Tipologia di combustibile Provenienza	carbone Sulcis Sardegna	carbone russo Russia	miscela 1 5% Sulcis	miscela 2 20% Sulcis	miscela 3 40% Sulcis
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>					
Carbonio fisso	40,65	80,19	78,21	72,28	64,37
Umidità	7,45	2,38	2,63	3,39	4,41
Volatili	40,45	4,81	6,59	11,94	19,07
Ceneri	11,45	12,62	12,56	12,39	12,15
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>					
Carbonio totale	66,49	81,55	80,80	78,54	75,53
Idrogeno	6,18	1,64	1,87	2,55	3,46
Azoto	1,41	0,79	0,82	0,91	1,04
Zolfo	7,02	1,01	1,31	2,21	3,41
Ossigeno	n.d.	n.d.	n.s.	n.s.	n.s.
Umidità	7,45	2,38	2,63	3,39	4,41
Ceneri	11,45	12,62	12,56	12,39	12,15
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>					
Potere calorifico superiore	22,59	29,39	29,05	28,03	26,67
Potere calorifico inferiore	21,07	28,96	28,57	27,38	25,80

L'analisi qui presentata considera fondamentalmente le tre prove maggiormente significative impieganti le seguenti miscele combustibili:

- 100% carbone russo (test del 3/05/2012);
- 80% carbone russo e 20% carbone Sulcis (test del 12/07/2012);
- 60% carbone russo e 40% carbone Sulcis (test del 26/07/2012).

Non sono stati invece considerati particolarmente significativi i test in cui è stato impiegato solo il 5% di carbone Sulcis, mentre i test di lunga durata (che tipicamente vengono effettuati con condizioni operative differenti da quelli convenzionali) sono trattati a parte (nel capitolo 8) e dunque non sono stati analizzati nel presente capitolo.

### 7.1 Test sperimentale con solo carbone russo (100%)

Come anticipato, il test sperimentale del 3/05/2012 ha impiegato, per la prima volta, un carbone bituminoso proveniente dalla Russia.

La presente analisi considera gran parte dei dati raccolti nel corso del test, ma non quelli relativi all'ultima fase della prova, durante la quale è stata riscontrata una forte instabilità delle temperature operative.

#### Prestazioni globali del processo di gassificazione

La tabella 7.2 riporta le prestazioni globali del processo di gassificazione operato con il solo carbone russo.

Tabella 7.2. Prestazioni globali del processo di gassificazione (100% carbone russo).

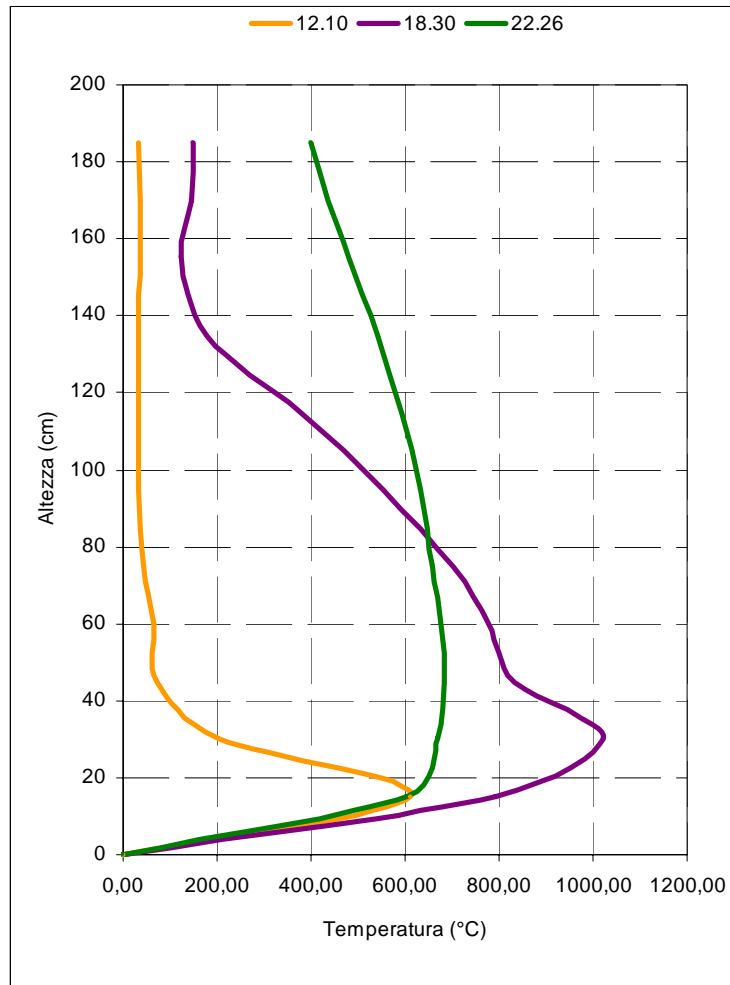
<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	10,2
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	29,0
Portata d'aria (kg/h)	44,1
Portata di vapore (kg/h)	8,2
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1826
CO <sub>2</sub>	0,0683
H <sub>2</sub>	0,1035
N <sub>2</sub>	0,6113
CH <sub>4</sub>	0,0048
H <sub>2</sub> S	0,0005
COS	0,0002
O <sub>2</sub>	0,0288
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	50,92
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	43,10
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	3,054
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,127
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	52
Temperatura massima di reazione (°C)	1027
Rendimento di gas freddo	52,64%
Rendimento di gas caldo	49,61%
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	4,23

Per via della bassa reattività del combustibile in oggetto (legata, fondamentale, al basso contenuto di volatili), è stato necessario operare la gassificazione con una portata d'aria relativamente elevata. Ciò si traduce in un notevole contenuto di azoto nel syngas, che è dunque caratterizzato da un basso potere calorifico. Quanto detto giustifica il rendimento di gas freddo del processo piuttosto basso rispetto ai valori tipicamente ottenuti con combustibili più reattivi.

#### Profili termici

La figura 7.1 riporta il profilo di temperatura interno al gassificatore (misurato dalla termocoppia multipla) in tre differenti fasi della prova:

- inizio dell'invio di vapore al gassificatore (ore 12:10);
- fase di funzionamento in condizioni pseudo stazionarie (ore 18:30);
- circa 30 minuti prima dell'avvio delle procedure di spegnimento (ore 22:26).



*Figura 7.1. Profili termici all'interno del reattore.*

Dalla figura emerge come, nell'ultima fase della prova (curva verde), il profilo di temperatura sia completamente differente dai profili tipici dei processi di gassificazione in letto fisso up-draft. È infatti assente il tipico "naso" in corrispondenza della zona in cui avvengono le principali reazioni di combustione e gassificazione.

A conferma di quanto indicato si riporta di seguito la figura 7.2, che mostra l'andamento nel tempo delle temperature all'interno del gassificatore. Da tale figura appare evidente come, a partire dalle 17:50 circa, le temperature in prossimità della griglia (curva verde chiara) comincino a fluttuare con una forte instabilità.

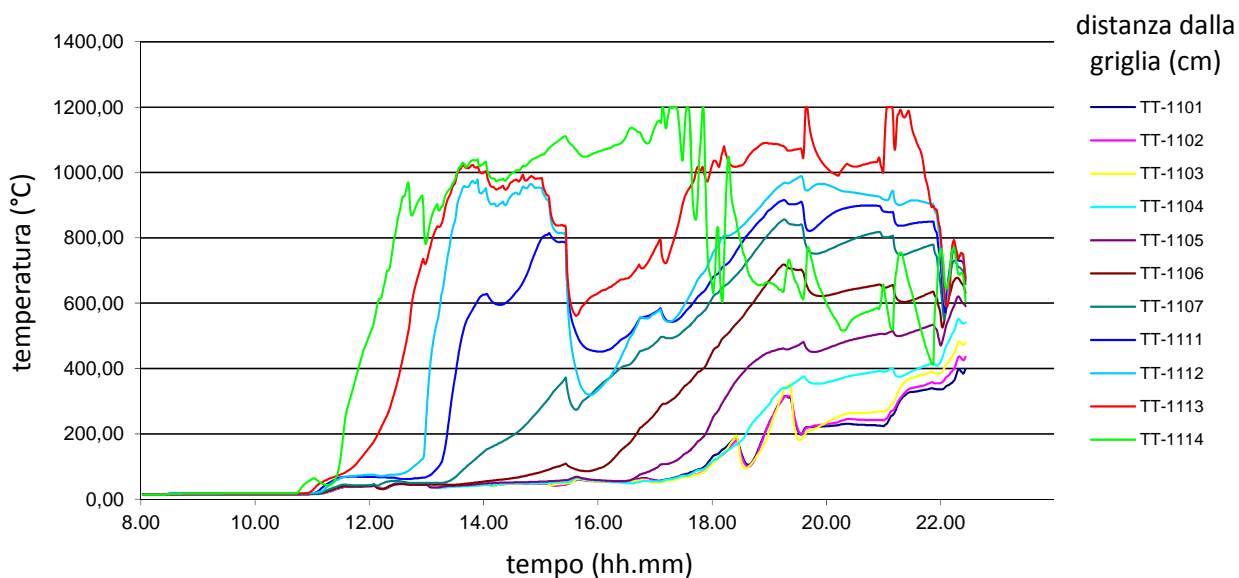


Figura 7.2. Profili termici all'interno del reattore.

### 7.2 Test sperimentale con l'80% di carbone russo e il 20% di carbone Sulcis

Il test sperimentale del 12/07/2012 è stato effettuato alimentando il gassificatore con una miscela composta dall'80% di carbone russo e dal 20% di carbone Sulcis. Scopo dell'introduzione del carbone locale, caratterizzato da un elevato contenuto di volatili, oltre che di zolfo, è quello di incrementare la reattività della miscela combustibile.

#### Prestazioni globali del processo di gassificazione

La tabella 7.3 riporta le prestazioni globali del processo di gassificazione operato con la miscela di carbone russo (80%) e Sulcis (20%).

Tabella 7.3. Prestazioni globali del processo di gassificazione (con il 20% di carbone Sulcis).

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	8,0
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	27,4
Portata d'aria (kg/h)	35,7
Portata di vapore (kg/h)	7,5
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1236
CO <sub>2</sub>	0,1228
H <sub>2</sub>	0,1225
N <sub>2</sub>	0,6072
CH <sub>4</sub>	0,0111
H <sub>2</sub> S	0,0016
COS	0,0005
O <sub>2</sub>	0,0107
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	41,97
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	35,20
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	2,782
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,136
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	66
Temperatura massima di reazione (°C)	972
Rendimento di gas freddo	53,32%
Rendimento di gas caldo	49,83%
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	4,40

Rispetto alla prova di gassificazione con solo carbone Russo, nella prova in oggetto è stato necessario, al fine di mantenere il controllo delle temperature e delle pressioni all'interno del reattore, operare con una portata d'aria inferiore. Pertanto, nonostante la maggiore reattività della miscela combustibile, il consumo della stessa e la produzione di syngas risultano essere inferiori rispetto al caso precedente. È altresì interessante notare come le concentrazioni medie di idrogeno, monossido di carbonio e anidride carbonica siano tra loro pressoché identiche, di poco superiori al 12% in volume.

Infine, per effetto dell'introduzione del carbone Sulcis ad alto tenore di zolfo, è evidente come, rispetto al test con il solo carbone russo, aumentino le concentrazioni sia di H<sub>2</sub>S (dallo 0,05 allo 0,16% in volume) che di COS (dallo 0,02 allo 0,05% in volume).

#### Profili termici

La figura 7.3 riporta il profilo di temperatura interno al gassificatore (misurato dalla termocoppia multipla) in tre differenti fasi della prova:

- inizio dell'invio di vapore al gassificatore (ore 11:09);
- fase di funzionamento in condizioni pseudo stazionarie (ore 17:00);
- circa 30 minuti prima dell'avvio delle procedure di spegnimento (ore 22:29).

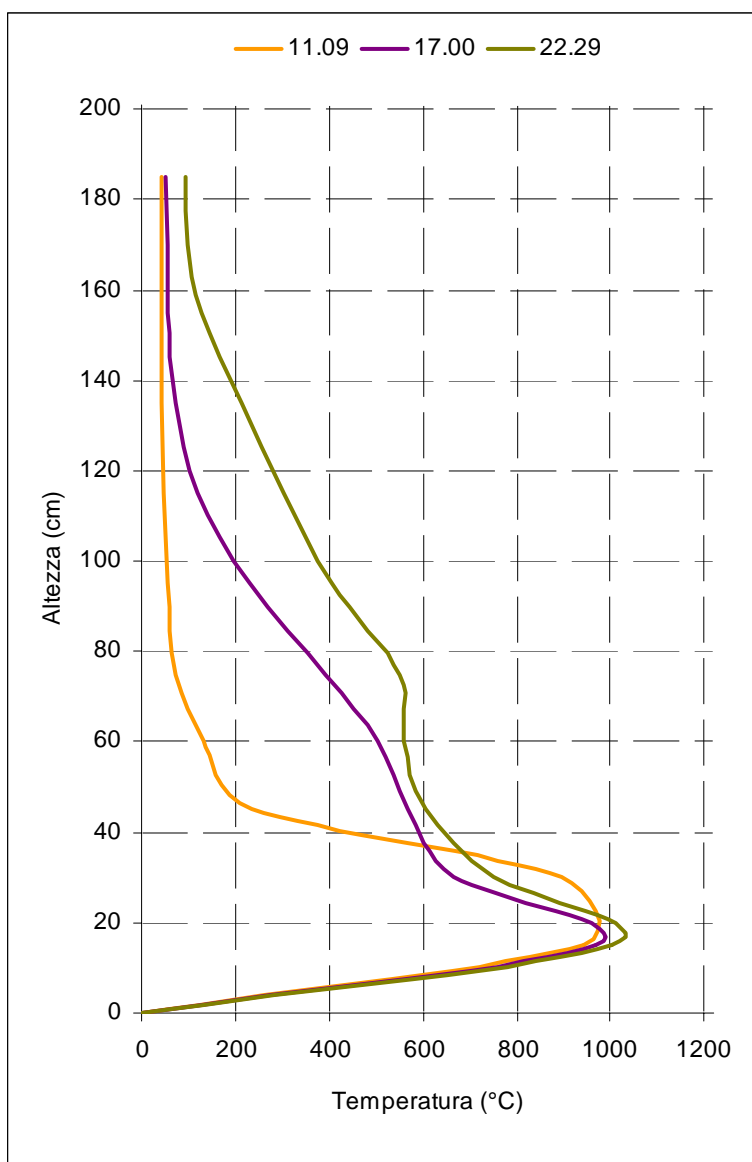


Figura 7.3. Profili termici all'interno del reattore.

Il profilo termico, nel corso del test in oggetto, si è mantenuto piuttosto regolare nel corso dell'intera prova (a differenza di quanto avvenuto nel corso del test sperimentale con solo carbone russo, in cui, nell'ultima fase della prova, come detto precedentemente, si sono riscontrati notevoli problemi di stabilità delle temperature).

### 7.3 Test sperimentale con il 60% di carbone russo e il 40% di carbone Sulcis

Come accennato in precedenza, la concentrazione di carbone Sulcis nella miscela con il carbone russo è stata gradualmente incrementata fino al 40%. In particolare, i test sperimentali del 19-20/07/2012, del 26/07/2012 e del 02/08/2012 sono stati effettuati con una miscela composta dal 60% di carbone russo e, appunto, dal 40% di carbone Sulcis.

Tralasciando temporaneamente i risultati del test del 19-20/07/2012 (discussi più nel dettaglio nel capitolo 8 e non significativi per la presente trattazione in quanto operati in condizioni operative differenti) e di quello del 02/08/2012 (caratterizzato, per una lunga fase, da problemi di stabilità delle temperature e pertanto non significativo per un'analisi globale del processo), in questa sede si focalizza l'attenzione sul test sperimentale del 26/07/2012, considerato come quello maggiormente rappresentativo per la miscela in esame.

### Prestazioni globali del processo di gassificazione

La tabella 7.4 riporta le prestazioni globali del processo di gassificazione operato con la miscela di carbone russo (60%) e Sulcis (40%).

Tabella 7.4. Prestazioni globali del processo di gassificazione (con il 40% di carbone Sulcis).

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	8,9
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	28,8
Portata d'aria (kg/h)	31,1
Portata di vapore (kg/h)	7,2
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1671
CO <sub>2</sub>	0,0923
H <sub>2</sub>	0,1524
N <sub>2</sub>	0,5552
CH <sub>4</sub>	0,0144
H <sub>2</sub> S	0,0040
COS	0,0005
O <sub>2</sub>	0,0141
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	38,08
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	33,54
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	3,805
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,185
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	91
Temperatura massima di reazione (°C)	1034
Rendimento di gas freddo	63,10%
Rendimento di gas caldo	59,57%
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	3,77

Anche in questo caso, rispetto alle prove precedentemente descritte, è stato necessario, al fine di mantenere il controllo delle temperature e delle pressioni all'interno del reattore, operare una ulteriore leggera riduzione della portata d'aria. Tuttavia, la sempre maggiore reattività della miscela combustibile (dovuta all'introduzione in concentrazioni sempre maggiori del carbone Sulcis) porta, nel caso in esame, a un incremento del consumo di combustibile e a un significativo miglioramento del valore energetico del syngas prodotto.

### Profili termici

La figura 7.4 riporta il profilo di temperatura interno al gassificatore (misurato dalla termocoppia multipla) in tre differenti fasi della prova:

- inizio dell'invio di vapore al gassificatore (ore 12:40);
- fase di funzionamento in condizioni pseudo stazionarie (ore 18:44);
- circa 30 minuti prima dell'avvio delle procedure di spegnimento (ore 22:40).

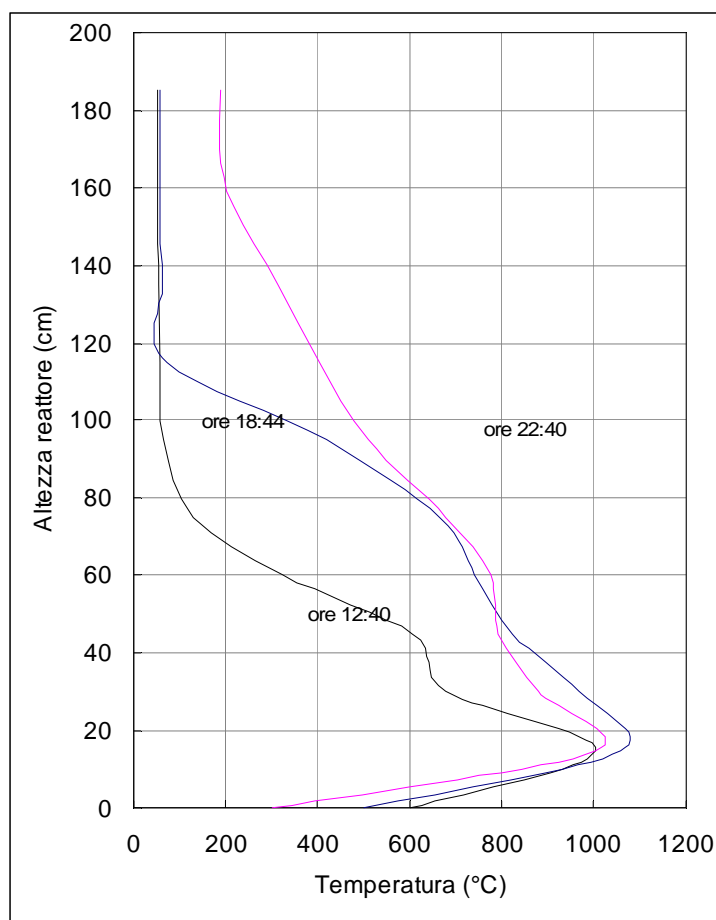


Figura 7.4. Profili termici all'interno del reattore.

Il profilo termico, nel corso del test in oggetto, si è mantenuto piuttosto regolare nel corso dell'intera prova (a differenza di quanto avvenuto nel corso del test sperimentale con solo carbone russo, in cui, nell'ultima fase della prova, si sono riscontrati notevoli problemi di stabilità delle temperature).

#### 7.4 Alcune considerazioni comparative tra i vari test con carbone russo

Confrontando i risultati dei test effettuati con carbone russo miscelato con differenti concentrazioni di carbone Sulcis, appare evidente come una sempre maggiore concentrazione di quest'ultimo comporti, in linea di massima, quanto segue:

- un aumento della reattività della miscela, principalmente per via del graduale incremento del tenore di volatili nella stessa;
- la necessità di ridurre la portata d'aria gassificante, al fine di mantenere quanto più possibile stabili le temperature all'interno del reattore;
- una variabilità nel consumo di combustibile per unità di tempo (l'aumento della reattività della miscela combustibile comporterebbe, in linea di principio, un aumento del consumo di combustibile e, conseguentemente, della produzione di syngas; tale aumento è tuttavia condizionato dalla riduzione della portata d'aria di cui al punto precedente);
- un significativo aumento della qualità del syngas e del suo potere calorifico, in quanto la concentrazione media dell'idrogeno passa dal 12% al 15% e la concentrazione media del CO passa dal 12% al 16% (in volume).
- un significativo incremento delle concentrazioni di H<sub>2</sub>S e COS nel syngas (con l'H<sub>2</sub>S che passa, in termini volumetrici, dallo 0,05% per il solo carbone russo allo 0,16% quando è impiegato il 20% di carbone Sulcis, fino allo 0,40% quando è impiegato il 40% di carbone Sulcis).

## 8. Test di gassificazione di lunga durata

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto sono stati effettuati due test di gassificazione della durata complessiva (nominale) di circa 36 ore ciascuno (contro le circa 16 ore dei test convenzionali), al fine di valutare il comportamento e le prestazioni del processo di gassificazione nel lungo periodo.

Il primo test è stato condotto in data 20-21/06/2012, inizialmente con una miscela di carbone russo (95%) e carbone Sulcis (5%). A causa della già citata scarsa reattività del carbone russo e della sua elevata percentuale nella miscela, nel corso del test si sono avuti dei problemi nel controllo delle temperature (generalmente piuttosto basse), per cui, a prova in corso, si è deciso di aggiungere alla miscela combustibile del pellet di legno (20% circa, in termini volumetrici). Nel secondo test, effettuato in data 19-20/07/2012, è stata invece impiegata una miscela di carbone russo (60%) e carbone Sulcis (40%).

### 8.1 Test sperimentale con carboni russo, Sulcis e pellet

Come anticipato, il primo test di gassificazione di lunga durata effettuato nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente documento è stato effettuato, inizialmente, con una miscela di carbone russo (95%) a basso tenore di volatili e di carbone Sulcis (5%). Nel corso della prova, per i problemi sopra citati (dovuti alla scarsa reattività del carbone russo), tale miscela è stata più volte variata, con l'introduzione di pellet di legno.

La tabella 8.1 mostra la composizione e le caratteristiche principali della miscela considerata, determinate come media pesata delle analisi dei singoli combustibili.

Tabella 8.1. Caratterizzazione dei combustibili e della miscela impiegati.

Tipologia di combustibile	carbone Sulcis	carbone russo	pellet di legno	miscela
Provenienza	Sardegna	Russia	n.d.	-
Percentuale in volume	4,0%	76,0%	20,0%	-
Percentuale in peso	4,3%	81,7%	14,0%	-
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>				
Carbonio fisso	40,65	80,19	17,70	69,74
Umidità	7,45	2,38	8,57	3,46
Volatili	40,45	4,81	73,32	15,93
Ceneri	11,45	12,62	0,42	10,86
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>				
Carbonio totale	66,49	81,55	79,51	80,62
Idrogeno	6,18	1,64	11,18	3,17
Azoto	1,41	0,79	0,32	0,75
Zolfo	7,02	1,01	0,00	1,13
Ossigeno	n.d.	n.d.	n.d.	n.s.
Umidità	7,45	2,38	8,57	3,46
Ceneri	11,45	12,62	0,42	10,86
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>				
Potere calorifico superiore	22,59	29,39	18,45	27,57
Potere calorifico inferiore	21,07	28,96	16,85	26,92

### Prestazioni globali del processo di gassificazione

Una valutazione delle prestazioni globali del processo di gassificazione sull'intera prova non sarebbe assolutamente significativa per via della variabilità della composizione del combustibile introdotto nel gassificatore. Tuttavia è possibile restringere il campo dell'analisi a una lunga fase della sperimentazione (circa sei ore) condotta con il 76% di carbone russo, il 4% di carbone Sulcis e il 20% di pellet di legno (in volume).

La seguente tabella 8.2 riassume le prestazioni globali del processo riscontrate nel corso di tale prova sperimentale.

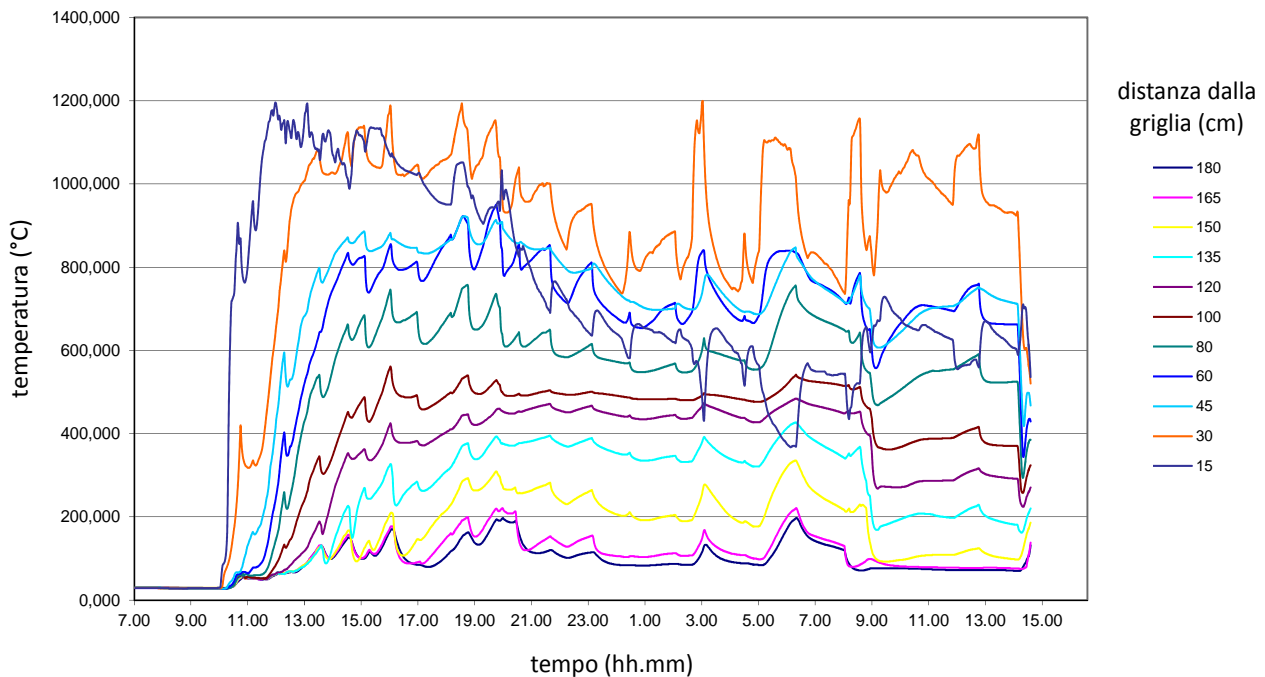
Tabella 8.2. Prestazioni globali del processo di gassificazione.

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	6,6
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	26,9
Portata d'aria (kg/h)	25,1
Portata di vapore (kg/h)	3,2
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,0510
CO <sub>2</sub>	0,1458
H <sub>2</sub>	0,0552
N <sub>2</sub>	0,7091
CH <sub>4</sub>	0,0109
H <sub>2</sub> S	0,0001
COS	0,0000
O <sub>2</sub>	0,0271
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	27,32
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	21,18
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	1,298
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,056
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	97
Temperatura massima di reazione (°C)	868
Rendimento di gas freddo	n.s.
Rendimento di gas caldo	n.s.
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	n.s.

Nel complesso, la gassificazione di 6,6 kg/h della miscela considerata ha consentito la produzione di circa 21 Nm<sup>3</sup>/h di syngas grezzo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore di 1,3 MJ/kg e da una concentrazione di idrogeno e monossido di carbonio pari rispettivamente al 5,5 e al 5,1% (in volume). Si può notare come la qualità del syngas (potere calorifico e concentrazioni di idrogeno e monossido di carbonio) risulti essere di molto peggiore rispetto a quanto riscontrato nelle altre prove di gassificazione. La tabella 8.2 non riporta i principali parametri di valutazione delle prestazioni del processo (rendimenti di gas freddo e caldo e resa del gassificatore) in quanto considerati poco significativi (a titolo di esempio, il rendimento di gas freddo è stato calcolato pari al 19,95%). Ciò è dovuto principalmente al fatto che, nelle particolari condizioni di prova, è poco significativo il rapporto tra i valori medi, nell'intervallo di tempo considerato, di alcuni parametri quali il consumo di carbone e la produzione di syngas.

#### Andamento delle temperature

La figura 8.1 mostra l'andamento, nel corso dell'intera prova, delle temperature interne al gassificatore, misurate dalla termocoppia multipla (descritta nel paragrafo 2.3 del presente documento) a differenti distanze dalla griglia di supporto del letto.



*Figura 8.1. Andamento delle temperature nel corso della prova.*

Dal diagramma si nota come nella prima parte della prova si registri, nel tempo, un lieve e progressivo decremento delle varie temperature (le cui oscillazioni son dovute principalmente alle perturbazioni causate dalla successione di caricamenti di combustibile nel letto e scarichi delle scorie). Da una certa fase della prova in poi (orientativamente a partire dalle 2:30 del mattino del 21/06/2012) si nota invece un incremento delle temperature medie misurate da ciascun sensore e oscillazioni sempre più marcate, dovute principalmente alla variazione delle modalità di gestione dell'impianto (carichi più diradati nel tempo e scarichi meno frequenti) e, nell'ultima fase della prova, a un problema tecnico che ha comportato il malfunzionamento del generatore di vapore.

### **8.2 Test sperimentale con carbone russo e carbone Sulcis**

Nel corso del secondo test di gassificazione lunga durata, al fine di compensare parzialmente la scarsa reattività del carbone russo e incrementare la produzione di syngas per testare il motore a combustione interna, è stata impiegata una miscela contenente una elevata percentuale (40%) di carbone Sulcis, molto più reattivo.

La tabella 8.3 mostra le composizioni dei due carboni e la caratterizzazione della miscela considerata.

Tabella 8.3. Caratterizzazione della miscela al 40% di carbone Sulcis.

Tipologia di combustibile Provenienza	carbone		miscela
	carbone Sulcis Sardegna	russo Russia	
<i>Analisi immediata (% in massa)</i>			
Carbonio fisso	40,65	80,19	64,37
Umidità	7,45	2,38	4,41
Volatili	40,45	4,81	19,07
Ceneri	11,45	12,62	12,15
<i>Analisi elementare (% in massa)</i>			
Carbonio totale	66,49	81,55	75,53
Idrogeno	6,18	1,64	3,46
Azoto	1,41	0,79	1,04
Zolfo	7,02	1,01	3,41
Ossigeno	n.d.	n.d.	n.s.
Umidità	7,45	2,38	4,41
Ceneri	11,45	12,62	12,15
<i>Analisi calorimetrica (MJ/kg)</i>			
Potere calorifico superiore	22,59	29,39	26,67
Potere calorifico inferiore	21,07	28,96	25,80

#### Prestazioni globali del processo di gassificazione

A differenza della prima prova di lunga durata, nel corso del test del 19-20/07/2012 è stato possibile mantenere relativamente stabili le condizioni del processo, per cui è possibile effettuare una valutazione delle prestazioni globali di gassificazione per l'intera durata della prova (escludendo, ovviamente, le fasi di avviamento e spegnimento dell'impianto).

La seguente tabella 8.4 riassume le prestazioni globali del processo riscontrate nel corso di tale prova sperimentale.

Tabella 8.4. Prestazioni globali del processo di gassificazione.

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	6,5
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	25,8
Portata d'aria (kg/h)	49,7
Portata di vapore (kg/h)	9,7
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,1248
CO <sub>2</sub>	0,1096
H <sub>2</sub>	0,1198
N <sub>2</sub>	0,6193
CH <sub>4</sub>	0,0120
H <sub>2</sub> S	0,0034
COS	0,0006
O <sub>2</sub>	0,0104
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	56,88
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	47,95
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	2,813
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,136
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	221
Temperatura massima di reazione (°C)	853
Rendimento di gas freddo	95,41%
Rendimento di gas caldo	89,62%
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	7,37

Nel complesso, la gassificazione di 6,5 kg/h della miscela considerata di carbone russo e carbone Sulcis ha consentito la produzione di circa 48 Nm<sup>3</sup>/h di syngas grezzo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore

di 2,8 MJ/kg e da una concentrazione di idrogeno e monossido di carbonio pari rispettivamente al 12,0 e al 12,5% (in volume). Nel complesso è stato calcolato un rendimento di gas freddo dell'impianto pari al 95,4%. L'elevato contenuto di carbone Sulcis impiegato nella miscela si traduce in una elevata concentrazione di H<sub>2</sub>S e, secondariamente, di COS nel syngas, pari rispettivamente allo 0,34% e allo 0,06% (in volume). Rispetto al test di durata convenzionale effettuato in data 26/07/2012 (paragrafo 7.3), nel corso della prova di lunga durata si è esercito il gassificatore con una portata d'aria maggiore e, conseguentemente, si è ottenuta una maggiore produzione di syngas. Quest'ultimo è caratterizzato da un potere calorifico inferiore leggermente più basso (2,8 contro 3,8 MJ/kg) di quello del syngas prodotto nel corso della prova di durata convenzionale, per via della maggiore diluizione con aria.

#### Andamento delle temperature

La **figura 8.2** riporta il profilo di temperatura misurato all'interno del gassificatore (mediante la termocoppia multipla) in tre differenti fasi della prova sperimentale e, in particolare:

- nel momento in cui è iniziato l'invio di vapore al gassificatore (ore 11:25 del 19/07/2012);
- in un momento di funzionamento pseudo stazionario dell'impianto (ore 00:12 del 20/07/2012);
- circa 30 minuti prima dell'inizio della fase di spegnimento dell'impianto (ore 18:00 del giorno 20/07/2012).

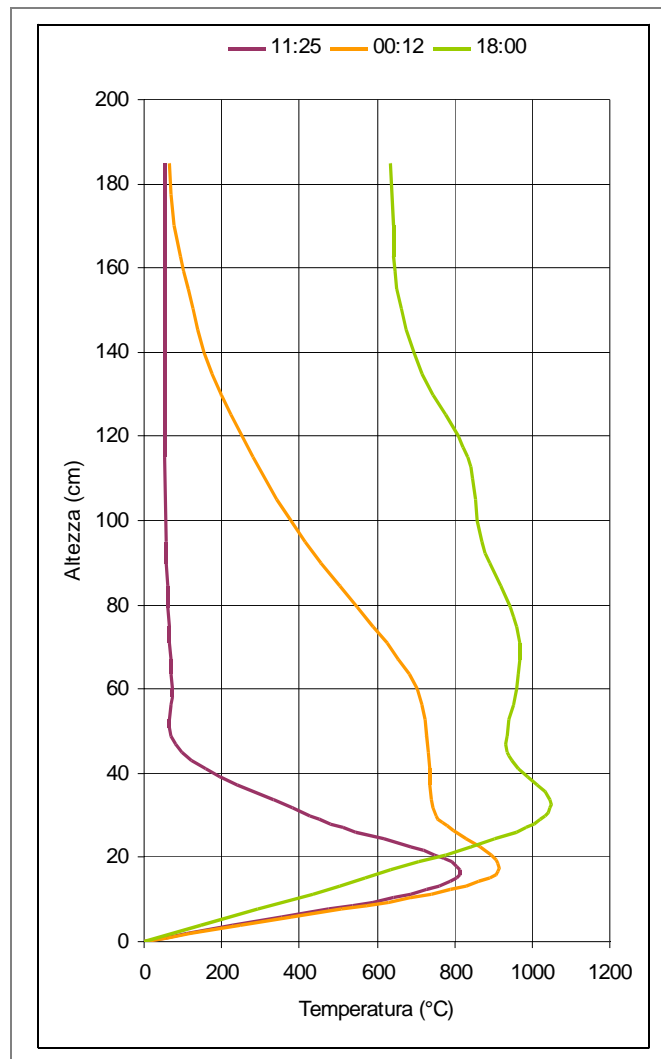


Figura 8.2. Profili termici all'interno del gassificatore.

La figura 8.3 mostra invece l'andamento delle temperature nel corso dell'intera prova sperimentale, a differenti distanze dalla griglia di supporto del letto combustibile.

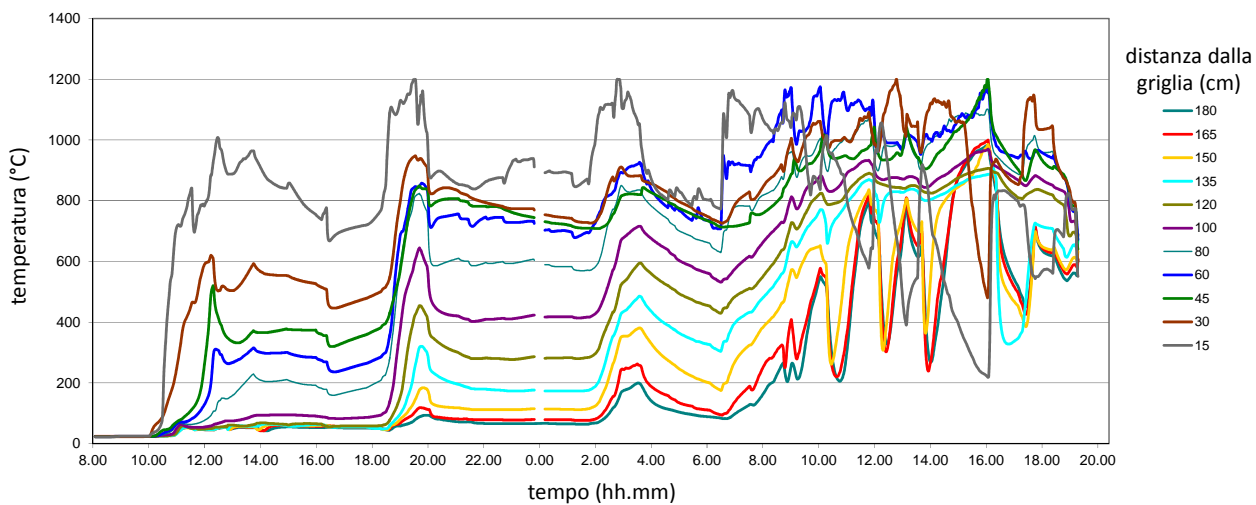


Figura 8.3. Andamento delle temperature nel corso della prova.

Dalla figura emerge una certa regolarità nell'andamento delle temperature, fatta eccezione per alcune brevi fasi della prova e per l'ultima fase della prova stessa (orientativamente dalle 6:45 del 20/07/2012). Tali irregolarità son principalmente dovute a una variazione temporanea dei parametri operativi al fine di poter sperimentare, in varie condizioni, il motore a combustione interna alimentato a syngas.

## 9. Test preliminari di gassificazione di cippato di legno

Le potenziali applicazioni commerciali della tecnologia di gassificazione impiegata nella piattaforma pilota Sotacarbo sono la generazione di energia elettrica ed eventualmente termica in impianti di piccola o media taglia alimentati con combustibili a basso costo, quali il carbone (per esempio in impianti a bocca di miniera, realizzati per sopperire ai fabbisogni energetici della miniera stessa) e le biomasse. Per queste ultime, il problema principale sta nella granulometria del materiale che costituisce il letto, dal momento che è necessario impiegare, come combustibile, particelle compatte di dimensioni possibilmente non inferiori ai 5 mm e non superiori ai 15 mm.

Per valutare, in via preliminare, le prestazioni del processo di gassificazione con biomasse non preventivamente trattate, in data 9/05/2012 è stato effettuato un primo test sperimentale con cippato di legno (pinus pinea, pino domestico). La biomassa è stata fornita dall'Ente Foreste della Sardegna nell'ambito di un apposito accordo di collaborazione e proviene dal complesso forestale di Gutturu Mannu (comune di Pula, nel Sud della Sardegna).

Nel suo complesso, il test preliminare di gassificazione del cippato di legno non ha dato risultati attendibili dal punto di vista scientifico, dal momento che il sistema di caricamento del reattore, progettato per trattare carbone e non biomassa, non ha consentito di caricare in maniera continua il gassificatore. Nonostante tali problemi, i risultati sperimentali di alcune fasi della prova consentono di estrapolare una composizione tipica del syngas e le principali prestazioni dell'impianto.

### 9.1 Potenzialità del processo

Date le peculiari caratteristiche del cippato di legno, nel corso del sopra citato test sperimentale è stata confermata l'elevata reattività del materiale costituente il letto di gassificazione. Analizzando l'andamento delle composizioni dei gas uscenti dal gassificatore, infatti, si nota che la carica appena introdotta si esaurisce in un tempo piuttosto breve rispetto al carbone (l'esaurimento della carica si evince dal fatto che, trascorso tale tempo, i gas in uscita dal reattore sono costituiti quasi esclusivamente dall'aria gassificante).

Sulla base di tali considerazioni, dalla prova preliminare qui discussa si evince che il consumo di biomassa, in termini volumetrici, ammonta a circa 60 dm<sup>3</sup>/ora contro i 10-12 dm<sup>3</sup>/ora tipici, ad esempio, del carbone sudafricano. Essendo però la densità del materiale caricato notevolmente inferiore a quella del carbone (0,2 kg/dm<sup>3</sup> contro 0,8 kg/dm<sup>3</sup> tipici dei carboni impiegati), ne risulta un consumo di carbone in termini massici pari a circa 12 kg/h. Tale valore è comunque superiore a quello ottenuto nei test col carbone sudafricano (8-10 kg/h), ma notevolmente inferiore a quanto riscontrato nei test con carbone Usibelli miscelato con carbone Sulcis (circa 24 kg/h).

### 9.2 Prestazioni globali del processo di gassificazione

La tabella 9.1 riporta una sintesi delle prestazioni globali attese del processo di gassificazione del cippato di legno (pinus pinea), estrapolate dai risultati della prova sperimentale preliminare del 9/05/2012.

Tabella 5.2. Prestazioni globali del processo di gassificazione di cippato di legno.

<i>Parametri operativi</i>	
Consumo combustibile (kg/h)	12,0
Potere calorifico inferiore del combust. (MJ/kg)	17,25
Portata d'aria (kg/h)	11,3
Portata di vapore (kg/h)	0,0
<i>Composizione del syngas secco (frazioni molari)</i>	
CO	0,2207
CO <sub>2</sub>	0,0797
H <sub>2</sub>	0,3342
N <sub>2</sub>	0,3418
CH <sub>4</sub>	0,0119
H <sub>2</sub> S	0,0000
COS	0,0000
O <sub>2</sub>	0,0117
<i>Prestazioni del gassificatore</i>	
Portata massica di syngas (kg/h)	23,31
Portata volumetrica di syngas (Nm <sup>3</sup> /h)	25,48
Potere calorifico inferiore del syngas (MJ/kg)	7,489
Calore specifico a pressione costante (kJ/kg·K)	1,470
Pressione del syngas (MPa)	0,14
Temperatura di uscita del syngas (°C)	452
Temperatura massima di reazione (°C)	730
Rendimento di gas freddo	84,33
Rendimento di gas caldo	91,40
Resa del gassificatore (Nm <sup>3</sup> /kg)	2,12

La portata di syngas prodotto indicata in tabella 5.2 è quella effettivamente misurata dal sistema di analisi e acquisizione dati, mentre la portata d'aria è stata calcolata da un bilancio materiale al gassificatore (il valore misurato non è ritenuto significativo in quanto, a causa della forte instabilità del processo, del livello del letto estremamente basso e della brevità dell'intervallo di tempo considerato, si può ipotizzare che gran parte dell'aria inviata al reattore non abbia preso parte alle reazioni). Si può inoltre osservare come nel corso della prova, date le basse temperature riscontrate nella parte inferiore del reattore, non sia stato immesso vapore.

### 9.3 Ipotesi di approccio sperimentale per future prove di biogassificazione

Come inizialmente accennato, la prova sperimentale di gassificazione del cippato di legno effettuata in data 9/05/2012 è da ritenersi preliminare (e i risultati son da ritenersi non pienamente attendibili) a causa di alcuni problemi tecnici al sistema di caricamento, confermatosi non idoneo al combustibile impiegato. D'altra parte la prova suddetta ha consentito di individuare alcune delle principali problematiche relative all'impiego del cippato di legno come combustibile e alcune possibili soluzioni alle stesse.

In vista di una sperimentazione più dettagliata e attendibile del processo di gassificazione del cippato di legno, occorre dunque effettuare una serie di interventi per risolvere, anche in maniera parziale, i problemi riscontrati nel test preliminare di cui sopra.

Il primo intervento è di carattere processistico: dal momento che il consumo di biomassa, in termini volumetrici, è estremamente elevato (circa 60 dm<sup>3</sup>/h, come precedentemente riportato), è necessario modificare la gestione della prova effettuando piccoli caricamenti a intervalli di tempo molto limitati (a titolo di esempio, si può pensare di caricare da 10 a 30 dm<sup>3</sup> di biomassa ogni 10 minuti circa), al fine di rendere quanto più possibile continua la fase di caricamento. Dato inoltre il contenuto quasi nullo di ceneri della biomassa (vedasi al proposito la tabella 3.2) non ha particolare significato (per test sperimentali della durata convenzionale di 16 ore) effettuare scarichi del letto combustibile.

Al fine di ridurre le problematiche tecniche del sistema di caricamento, il materiale potrebbe inoltre essere preventivamente vagliato, al fine di eliminare le particelle di dimensioni superiori agli 8-10 mm (quelle che, presumibilmente, sono la principale causa dell'inceppamento del sistema di dosaggio del materiale).

Infine, sarebbe utile analizzare nel dettaglio la possibilità di modificare il sistema di caricamento del combustibile per adattarlo, in maniera più specifica, al cippato di legno, al fine di poter condurre, in futuro, test sistematici per l'ottimizzazione del processo.

## Conclusioni

La campagna sperimentale sul processo di gassificazione della piattaforma pilota Sotacarbo è stata programmata ed effettuata al fine di approfondire le conoscenze del processo e migliorare le prestazioni dell'impianto in condizioni operative differenti da quelle testate nelle precedenti campagne sperimentali.

In particolare, nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto è stato possibile testare l'impianto con nuovi combustibili (come ad esempio la lignite Usibelli, proveniente dall'Alaska, il carbone russo e il cippato di legno, sebbene quest'ultimo sia stato testato solo in via preliminare) e con concentrazioni di carbone Sulcis superiori a quelle prima d'ora analizzate.

Oltre a tali risultati sperimentali, è stato possibile integrare la strumentazione della piattaforma pilota, in particolar modo con l'inserimento del nuovo sistema di analisi dei gas affiancato al gas cromatografo e con le nuove termocoppie installate sulla superficie del gassificatore.

Nel complesso le prestazioni migliori del processo di gassificazione, in termini di produzione di syngas e di potenza termica ad esso associata sono state riscontrate alimentando il reattore con carbone Usibelli (Alaska). In particolare, nel corso della prova sperimentale del 7/06/2012, effettuata con una miscela composta per il 95% da carbone Usibelli e per il restante 5% da carbone Sulcis, sono stati gassificati mediamente 24 kg/h di miscela combustibile, con una produzione di syngas pari a circa 80 kg/h (ovvero circa 73 Nm<sup>3</sup>/h) tale da consentire l'avviamento del motore a combustione interna al suo massimo carico (24 kW). Il syngas, oltretutto, è stato caratterizzato da un potere calorifico molto elevato (5,1 MJ/kg) rispetto ai valori tipicamente ottenuti con gli altri carboni (tipicamente compresi tra 3 e 4 MJ/kg).

Risultati piuttosto interessanti sono stati ottenuti anche nel corso dei test sperimentali nel quale è stata gassificata una miscela di carbone russo e carbone Sulcis (quest'ultimo al 40%); in alcune fasi di tali test è stato possibile alimentare il motore a combustione interna con una portata di syngas tale da consentire la generazione di circa 15 kW di potenza elettrica.

Un aspetto estremamente interessante della campagna sperimentale alla quale il presente rapporto fa riferimento consiste nell'aver effettuato un primissimo test, seppur preliminare, di gassificazione del cippato di legno. Tale combustibile infatti può rappresentare una delle più interessanti soluzioni per un'applicazione commerciale della tecnologia di gassificazione sviluppata dalla Sotacarbo. Dal momento che l'impianto (e, in particolare, il sistema di caricamento dello stesso) non è stato progettato per l'impiego di biomasse, il test ha fornito risultati molto generali e non ha consentito una vera e propria ottimizzazione del processo; tuttavia sono emerse numerose indicazioni che potranno consentire, nel corso delle prossime campagne sperimentali, una messa a punto dell'impianto e delle procedure operative di gestione dello stesso per l'ottimizzazione del processo di gassificazione di biomasse.

D'altra parte, uno dei principali problemi riscontrati nel corso delle prove sperimentali e attualmente non risolti è legato alla formazione di agglomerati nella parte bassa del reattore (agglomerati che si sono formati anche quando è stata impiegata la ghiaia come materiale inerte a protezione della griglia). Ciò indica che tale fenomeno è dovuto quasi certamente alla fusione delle ceneri nella parte bassa del gassificatore, dovuta alla presenza di zone molto localizzate del letto (non rilevate dalla strumentazione del sistema) in cui le temperature raggiungono valori significativamente superiori a quelli riscontrati dalla sonda di misurazione delle temperature.

Sulla base delle indicazioni e delle principali problematiche emerse nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente rapporto è dunque possibile definire quelle che possono essere le principali linee di sviluppo della tecnologia. Esse riguardano principalmente i seguenti aspetti:

- ulteriore miglioramento della stabilità del processo di gassificazione, in particolare se alimentato con combustibili a bassa reattività;
- ulteriore messa a punto di alcuni strumenti di misura (principalmente i misuratori di portata degli agenti gassificanti e del syngas grezzo, caratterizzati da una bassa affidabilità);
- modifica del sistema di alimentazione del gassificatore e definizione delle procedure operative per la gassificazione di biomasse legnose;
- ottimizzazione del processo di co-gassificazione di carbone e biomasse (al riguardo, particolarmente interessante, per le potenziali applicazioni commerciali a livello locale, appare la co-gassificazione di cippato di legno e carbone Sulcis);

- miglioramento del controllo delle temperature di gassificazione per evitare la fusione delle ceneri;
- analisi approfondite sulla fusibilità delle ceneri dei combustibili utilizzati (attualmente i laboratori Sotacarbo non sono attrezzati per tale tipologia di analisi);
- inserimento nel gassificatore di un sistema meccanico di agitazione (concettualmente analogo allo stirrer di cui è equipaggiato il gassificatore dimostrativo da 1,3 m di diametro della piattaforma Sotacarbo) per eliminare eventuali agglomerati generati nel corso del processo.

Sulla base di tali linee di sviluppo, è già in corso un'analisi preliminare delle soluzioni tecnico-scientifiche in vista delle prossime campagne sperimentali.

## Riferimenti bibliografici

1. A. Pettinau, F. Ferrara, C. Amorino, "An overview about current and future activities in a flexible gasification pilot plant". In: "Gasification: chemistry, processes and applications", Nova Science Publishers, New York, USA, 2011.
2. F. Ferrara, G. Calì, C. Frau, A. Pettinau, "Experimental and numerical assessment of the CO<sub>2</sub> absorption process in the Sotacarbo pilot platform", Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Fossil Fuels for Future Energy, Roma, Italy, July 6-10, 2009.
3. A. Pettinau, A. Orsini, G. Calì, F. Ferrara, "The Sotacarbo coal gasification experimental plant for a CO<sub>2</sub>-free hydrogen production", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35 (2010), pp. 9836-9844.
4. A. Pettinau, C. Frau, F. Ferrara, "Performance assessment of a fixed-bed gasification pilot plant for combined power generation and hydrogen production", Fuel Processing Technology, vol. 92 (2011), pp. 1946-1953.
5. A. Pettinau, C. Frau, F. Ferrara, "Coal gasification experimental tests in a pilot up-draft fixed-bed gasifier". Atti del 65° Congresso Nazionale ATI, Domus de Maria, Italy, September 13-17, 2010.

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