

**ENEA**

Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Predisposizione delle prove di appoggio**

**Alberto Pettinau**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

### Predisposizione delle prove di appoggio

*Alberto Pettinau*

## PREDISPOSIZIONE DELLE PROVE DI APPOGGIO

Alberto Pettinau (SOTACARBO)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Tecnologie innovative che consentano una riduzione dei costi di investimento delle centrali a polverino di carbone. Sviluppo di tecnologie di impiego del polverino di carbone a differenti granulometrie con cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

Responsabile Tema: Paolo Deiana, ENEA

**Accordo di collaborazione tra ENEA e SOTACARBO per l'attività di ricerca dal titolo "Tecnologie di impiego del polverino di carbone a differenti granulometrie con cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>"**

*nell'ambito del tema di ricerca 5.2.5.2.*

*"Tecnologie innovative che consentano una riduzione dei costi di investimento delle centrali a polverino di carbone" dell'accordo di programma MSE-ENEA*

## *Rapporto tecnico*

### *Attività 5.2.5.2.- B1(b)*

# **Predisposizione delle prove di appoggio**

<b>Eseguito da:</b>	<b>Alberto Pettinau</b>	
<b>Verifica</b>	<b>Alessandra Madeddu</b>	
<b>Supervisione</b>	<b>Carlo Amorino</b>	

## Sommario

<b>Premessa</b> .....	3
<b>1. Introduzione</b> .....	4
<b>2. Richiami teorici sul processo di gassificazione con CO<sub>2</sub></b> .....	5
<b>3. L'apparato sperimentale</b> .....	6
<b>4. Realizzazione della linea di alimentazione degli agenti gassificanti</b> .....	8
<b>5. Impostazione delle campagne sperimentali</b> .....	16

## Premessa

Il presente rapporto sulla “predisposizione delle prove di appoggio” è stato sviluppato a fronte dell’Accordo di collaborazione tra ENEA e SOTACARBO S.p.A. stipulato il 26 marzo 2008, Prot. N. ENEA/2008/19034/TER, e del relativo allegato tecnico per l’attività di ricerca dal titolo “*Tecnologie di impiego del polverino di carbone a differenti granulometrie con cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>*”. In particolare il lavoro riguarda l’attività B1 “sperimentazione del processo di gassificazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub>” relativo al Tema di Ricerca Area Carbone n.5.2.5.2 “Tecnologie innovative che consentano una riduzione dei costi di investimento delle centrali a polverino di carbone”.

Obiettivo dell’attività è quello di predisporre le prove di appoggio, da effettuarsi sulla Piattaforma Pilota Sotacarbo, per valutare la possibilità di utilizzare CO<sub>2</sub> come agente gassificante nei processi di gassificazione, al fine di contenere i costi operativi e rendere economicamente più competitiva la produzione di energia dal carbone.

Nel presente rapporto sono descritti gli adeguamenti della Piattaforma Pilota effettuati al fine di poter immettere la miscela di ossigeno e CO<sub>2</sub> al gassificatore, oltre ai criteri secondo i quali verranno effettuate le campagne sperimentali.

Il presente rapporto tecnico è stato articolato come segue:

- breve sintesi sulla tecnologia di utilizzo CO<sub>2</sub> come agente gassificante;
- descrizione del gassificatore che verrà utilizzato per la sperimentazione;
- progettazione del sistema di preparazione e immissione della miscela di ossigeno e CO<sub>2</sub>;
- sistema di campionamento e analisi del syngas
- criteri fondamentali per la predisposizione dei test sperimentali.

## 1. Introduzione

L'applicazione delle tecnologie di gassificazione utilizzando ossigeno e CO<sub>2</sub> come agenti gassificanti a impianti esistenti di gassificazione con aria può consentire, in linea di principio, un miglioramento delle prestazioni complessive dell'impianto; infatti la sostituzione dell'azoto con la CO<sub>2</sub> consente di ottenere, a valle dei trattamenti, un syngas composto principalmente da idrogeno, monossido di carbonio e la stessa CO<sub>2</sub>. Dotando l'impianto di un processo di CO-shift e di un sistema di separazione della CO<sub>2</sub> si possono quindi ottenere due correnti principali: una di ossigeno, che può essere utilizzato, ad esempio, per la microgenerazione distribuita, e una della stessa CO<sub>2</sub>, che viene parzialmente ricircolata al gassificatore mentre la restante può essere confinata geologicamente, rendendo l'impianto "CO<sub>2</sub>-free".

Allo scopo di poter operare la gassificazione con CO<sub>2</sub> in un impianto di gassificazione ad aria, è necessaria una analisi sperimentale volta a individuare le condizioni operative ottimali, le prestazioni del gassificatore e la composizione del syngas prodotto.

A tale scopo è in fase di predisposizione una sperimentazione di tal genere presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo. Tale sperimentazione prevede l'adattamento della Piattaforma, in particolare con la realizzazione di un sistema di preparazione della miscela ossidante di ossigeno e CO<sub>2</sub>.

## **2. Richiami teorici sul processo di gassificazione con CO<sub>2</sub>**

Come accennato nel rapporto 5.2.5.2.-A “Valutazione del processo di gassificazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub>”, i processi di gassificazione con CO<sub>2</sub> attualmente in fase di sviluppo sono principalmente di due tipologie:

- processi di gassificazione con ossigeno;
- processi di gassificazione senza ossigeno.

Nella Piattaforma Pilota Sotacarbo, dotata di due gassificatori utilizzando aria come agente gassificante, potranno essere effettuati test sperimentali relativi alla gassificazione con ossigeno e CO<sub>2</sub>.

Concettualmente, si tratta di sostituire, parzialmente o completamente, l’azoto della miscela ossidante con l’anidride carbonica, al fine di migliorare le condizioni operative del processo e controllarne la temperatura di gassificazione; parallelamente, a valle dei sistemi di depurazione del gas e del processo di CO-shift, il syngas è composto quasi esclusivamente da CO<sub>2</sub> e idrogeno; questo comporta una maggiore efficienza dei sistemi di separazione dei due gas.



### 3. L'apparato sperimentale

Come specificato più in dettaglio nel rapporto 5.2.5.2.-A “Valutazione del processo di gassificazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub>”, le sperimentazioni sulla gassificazione con CO<sub>2</sub> verranno effettuate nel gassificatore da laboratorio da 35 kg/h.

Il gassificatore da laboratorio ha una potenzialità di circa 200 kW ed è del tipo a letto fisso up-draft di tecnologia Wellman-Galusha, a ceneri secche, sviluppato e realizzato da Ansaldo Ricerche. La configurazione del reattore è abbastanza semplificata, date le ridotte dimensioni, rispetto a un impianto commerciale, ma le condizioni operative e le prestazioni sono molto simili, per cui la sperimentazione in programma promette di essere estremamente attendibile in vista di uno scale-up.

Le pareti del reattore sono rivestite in materiale refrattario, ragion per cui il sistema può considerarsi adiabatico. Inoltre, nonostante sia presente un unico punto di immissione del combustibile, le dimensioni del reattore non consentono grosse disomogeneità di distribuzione.

In ingresso al gassificatore, oltre al combustibile, si hanno le correnti di aria (o, in generale, di miscela ossidante) e vapore, mentre in uscita si ha il syngas (circa 130 Nm<sup>3</sup>/h, composto prevalentemente da monossido di carbonio, idrogeno e azoto) e le ceneri secche, estratte dal fondo del gassificatore.

L'impianto è dotato di particolari lampade a irraggiamento, in materiale ceramico, per l'accensione del reattore, che avviene nelle seguenti fasi principali:

- preparazione di uno strato di argilla espansa a protezione della griglia del gassificatore (l'argilla, che nel corso del processo viene via via sostituita dalle ceneri, ha lo scopo di proteggere dalle alte temperature i materiali della griglia);
- riempimento del reattore con il combustibile di accensione (cippato di legno, eventualmente miscelato con sostanze ad alta infiammabilità per favorire l'accensione);
- flussaggio in azoto per l'inertizzazione del reattore;

- accensione delle lampade a irraggiamento fino al raggiungimento della temperatura di start-up, pari a circa 800 °C (in questa fase il combustibile si riscalda ma non brucia, dal momento che il reattore è privo di ossigeno);
- accensione del letto combustibile mediante l'immissione di aria comburente in regime sovrastechiometrico;
- alimentazione con coke durante il riscaldamento del reattore;
- passaggio all'alimentazione con carbone e riduzione dell'apporto di comburente fino alle condizioni di funzionamento a regime.

Come accennato nel suddetto rapporto 5.2.5.2.-A, l'impianto è dotato di una torcia che opera la combustione del syngas prodotto, il quale viene precedentemente trattato e depurato da polveri e tar mediante una torre di lavaggio in controcorrente.

Pertanto, complessivamente, le sperimentazioni sulla gassificazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub> riguarderanno seguenti apparecchiature dell'impianto:

- sistemi di alimentazione elettrica;
- sistema di stoccaggio e alimentazione dell'azoto inertizzante;
- sistema di caricamento del combustibile (compreso il sistema di aspirazione delle polveri);
- generatori di vapore;
- sistema di adduzione degli agenti gassificanti;
- gassificatore;
- scrubber;
- torcia;
- sistema di campionamento e analisi del syngas;
- sistema di stoccaggio e smaltimento dei reflui.

## **4. Realizzazione della linea di alimentazione degli agenti gassificanti**

I principali adeguamenti necessari a rendere la Piattaforma Pilota utilizzabile per le sperimentazioni della gassificazione con miscele di O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> sono descritti nel rapporto 5.2.5.2-A “Valutazione del processo di gassificazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub>”, e riguardano principalmente:

1. Sistema campionamento e analisi syngas
2. Adeguamento sala controllo
3. Installazione comando di emergenza
4. Valutazione rischio esplosione
5. Completamento impianto antincendio
6. Completamento impianto di terra
7. Misure di tensione di passo e di contatto
8. Impianto stoccaggio temporaneo reflui
9. Modifica e completamento Sistema adduzione acque,
10. Opere civili basamenti vasca e tubazioni

Sono di seguito descritti il sistema di campionamento e analisi syngas e il sistema di preparazione e alimentazione al gassificatore della miscela gassificante ossigeno e anidride carbonica.

### ***Sistema campionamento e analisi syngas***

Per una più completa ed efficace determinazione dei parametri operativi del processo durante le attività sperimentali relative alla gassificazione con CO<sub>2</sub>, la Piattaforma Pilota è stata dotata di un sistema per il campionamento e l'analisi del syngas prodotto dai gassificatori.

Il sistema di campionamento è composto da:

- Prese di campionamento del syngas.
- Linee di trasporto e di condizionamento del syngas.
- Apparecchiature per l'analisi del syngas.



*Presa di campionamento del syngas con sistema di condizionamento*

In particolare il sistema, progettato e realizzato da Sotacarbo, è costituito da:

- 17 prese di campionamento, il cui posizionamento è stato opportunamente studiato per monitorare la composizione del syngas nelle varie sezioni che costituiscono i due impianti.
- 17 linee di trasporto e condizionamento del syngas, che hanno il compito di:
  1. prelevare il syngas dalla piattaforma pilota e inviarlo alle apparecchiature di analisi;
  2. ripulire il syngas per privarlo delle sostanze dannose alla strumentazione di analisi (Tar, polveri, HCl);
  3. condizionare il syngas per raggiungere la corretta temperatura di analisi.

Le linee sono costituite principalmente da: valvole, filtri ad aria, condensatori, cavi e flussometri.

Per l'analisi del syngas è stata prevista una coppia di micro-gascromatografi a due colonne per la misura della concentrazione dei composti quali: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, COS, H<sub>2</sub>S.

Per la realizzazione del sistema sono stati emessi i seguenti ordini:

- Ordine n. 16/07 a favore della Ditta SRA Instrument per la fornitura di apparecchiature per l'analisi del syngas e quant'altro necessario per il campionamento del syngas. La fornitura consiste in:
  - micro-gascromatografo a due canali analitici, completo di pompa di campionamento per l'analisi delle miscele non pressurizzate in fase gassosa;
  - linee di introduzione del campione;
  - sistema di prelievo, filtrazione e condensazione costituito da sonde di prelievo, filtri ceramici e filtri a cartuccia.
  - selettore automatico di linea a 6 posizioni, comprendente elettrovalvole, pompa di aspirazione ausiliaria per campionare dalla linea selezionata sino ad una distanza di 50 m, filtro a membrana per liquidi e particolato, rotometri per l'indicazione della portata fast-loop e slow-loop del by pass campione.
  - carrello in acciaio allestito per l'alloggiamento del micro-gascromatografo, completo di collegamenti elettrici, centralina per connessione LAN e RS 485 al personal computer e collegamenti gas.
  - software di controllo e acquisizione dati per il micro-gascromatografo.
- Ordine n. 35/07 a favore della Ditta SIAD per la fornitura di n.2 bombole (una di elio, una di argon) contenenti i gas necessari per il funzionamento del micro-gascromatografo e di n. 3 bombole contenenti miscele di gas a concentrazione nota per la taratura dello strumento stesso.
- Ordine n. 41/07 a favore di AIR Liquide per la fornitura, il montaggio ed il collaudo delle linee di trasporto del syngas dalle prese di campionamento a bordo impianto, dove è stata installata una rastrelliera di collegamento, al sistema di campionamento.

Nell'impianto da laboratorio sono presenti 15 differenti punti di campionamento per poter monitorare la composizione del syngas nelle varie sezioni dell'impianto stesso.

Ciascun sistema di prelievo e filtrazione in corrispondenza di ciascun punto di prelievo è costituito da una sonda di prelievo gas comprendente i raccordi di collegamento e portacestelle e da un filtro per particolato a ditale in ceramica completo di portaditale, canotto di scorrimento sonda e flangia universale. Inoltre il sistema è provvisto di un pannello per l'attacco dei vari punti di campionamento al gas cromatografo.

Il micro gascromatografo è posto su un carrello in acciaio con copertura, con ruote per poter essere posizionato opportunamente a bordo impianto in corrispondenza del pannello ove sono convogliati i vari punti di campionamento.

Lo strumento è poi costituito dai seguenti moduli:

- micro iniettore riscaldato dotato di controllo del volume di campione;
- colonna analitica e colonna di riferimento capillari ad elevata efficienza;
- micro rivelatore universale con volume interno da 240 µl;
- micro-EPC (Electronic Pressure Control) per il controllo e la programmazione elettronica della pressione in testa alla colonna;
- scheda elettronica di controllo e acquisizione contenente le informazioni di configurazione del modulo specifico;
- selettore automatico di linea a sei posizioni comprendente n.6 elettrovalvole azionabili dal software Soprane e due rotametri per l'indicazione della portata di fast-loop e slow-loop del by-pass del campione.

Il sistema costituente il micro gascromatografo comprende inoltre una centralina di abbattimento condensabili e tar, costituita da un condensatore multiplo a quattro linee, un kit per il riscaldamento del filtro per particolato a

ditale e di una pompa peristaltica per lo scarico automatico temporizzato del liquido condensato.

Il micro gascromatografo effettua l'analisi del campione di syngas in un tempo medio pari a circa tre minuti; lo strumento consente di monitorare le concentrazioni dei seguenti composti presenti nel syngas: idrogeno, ossigeno, azoto, metano, ossido di carbonio, anidride carbonica, etilene, etano, acetilene, idrogeno solforato, solfuro di carbonile e propano. Tale analisi viene effettuata previa taratura effettuata tramite bombole di miscele di gas a concentrazione nota. Il microgas cromatografo utilizza, per effettuare l'analisi, due gas di trasporto (argon e elio), uno per ciascuno dei due canali analitici.

### ***Sistema di preparazione e alimentazione al gassificatore della miscela gassificante di ossigeno e anidride carbonica***

E' di seguito descritto nel dettaglio il sistema di preparazione e alimentazione al gassificatore della miscela gassificante di ossigeno e anidride carbonica.

L'alimentazione della miscela gassificante di ossigeno e anidride carbonica è effettuata mediante la già presente linea di alimentazione dell'ossigeno (già prevista dall'impianto per l'arricchimento in O<sub>2</sub> dell'aria gassificante).

Il sistema, fornito dalla Air Liquide Italia Service, è mostrato schematicamente nel seguente schema.

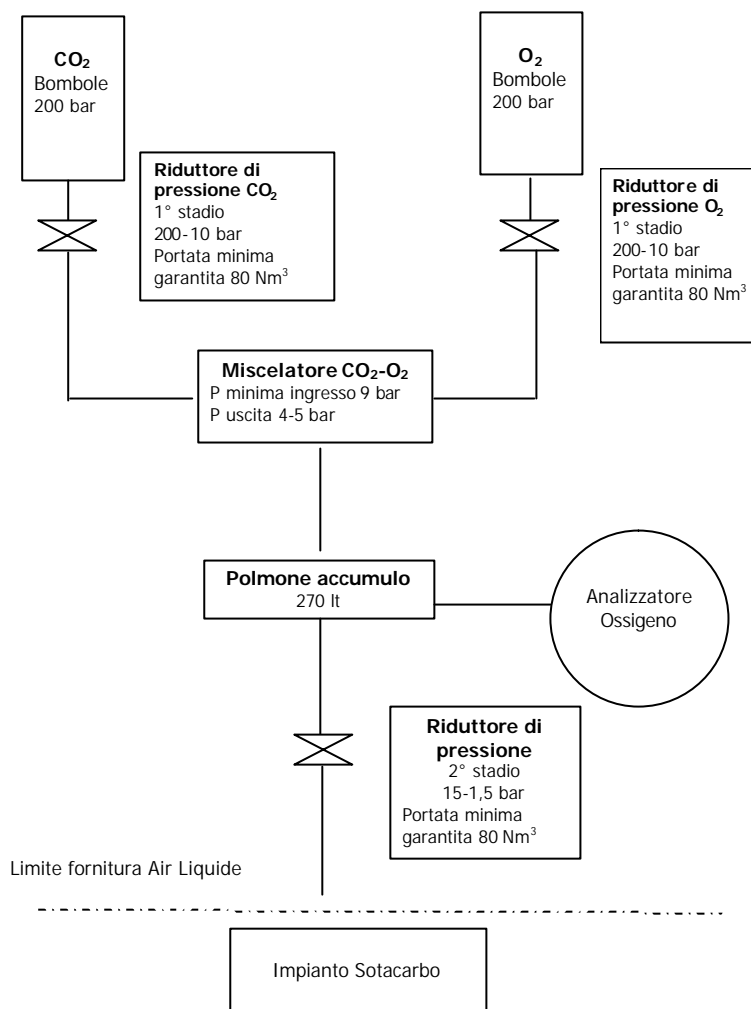


Figura 1: schema del sistema di alimentazione della miscela ossidante.

Il sistema di alimentazione della miscela ossidante, oltre alle bombole di O<sub>2</sub> (172 Nm<sup>3</sup> a 200 bar) e CO<sub>2</sub> (480 kg a 200 bar), comprende le seguenti apparecchiature:

- Miscelatore-regolatore CO<sub>2</sub>- O<sub>2</sub>;
- Polmone di accumulo;
- Analizzatore di ossigeno;
- Riduttore di pressione di 1° stadio per l'O<sub>2</sub>;
- Riduttore di pressione di 1° stadio per la CO<sub>2</sub>;
- Riduttore di pressione tipo 472/T;
- Tubazioni, carpenteria di raccordo e valvole pertinenti all'impianto.



Il miscelatore-regolatore CO<sub>2</sub>- O<sub>2</sub> consente di ottenere una miscela dei due gas, con una concentrazione massima di ossigeno del 23%, con una portata massima pari a 110 Nm<sup>3</sup>/h; la pressione minima in ingresso è di 9 bar mentre, in uscita, si ha una pressione compresa tra 4 e 5 bar.

Il polmone di accumulo (di volume pari a 0,27 m<sup>3</sup>) ha lo scopo di consentire una buona miscelazione tra ossigeno e anidride carbonica, garantendo una composizione costante della miscela inviata al gassificatore. Un analizzatore di ossigeno collegato al polmone consente il controllo della composizione della miscela e la regolazione, in automatico, dei parametri a monte.

A valle dei pacchi bombole di ossigeno e CO<sub>2</sub> sono presenti dei riduttori di pressione di primo stadio, che portano la pressione del gas dai 200 bar iniziali fino a circa 10 bar, per l'alimentazione al miscelatore; tali riduttori di pressione garantiscono una portata massima di ossigeno pari a 150 Nm<sup>3</sup>/h e una portata massima di anidride carbonica pari a 130 Nm<sup>3</sup>/h.

A valle del miscelatore e del polmone di accumulo, è presente un riduttore di pressione di secondo stadio, che porta la pressione della miscela a circa 1,5 bar, pressione alla quale viene alimentata al gassificatore; per la miscela, la portata garantita dal riduttore è compresa tra 80 e 160 Nm<sup>3</sup>/h.

Come accennato, tale sistema si ricollega alla linea di adduzione dell'ossigeno già presente nell'impianto. In particolare, la miscela di O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> viene immessa a valle della valvola manuale e a monte della valvola automatica di regolazione, integrata con il sistema di regolazione e controllo dell'impianto; in tal modo, fissata la composizione della miscela, è possibile regolare da remoto la portata della miscela, insieme a quella del vapore di processo in ingresso al gassificatore.

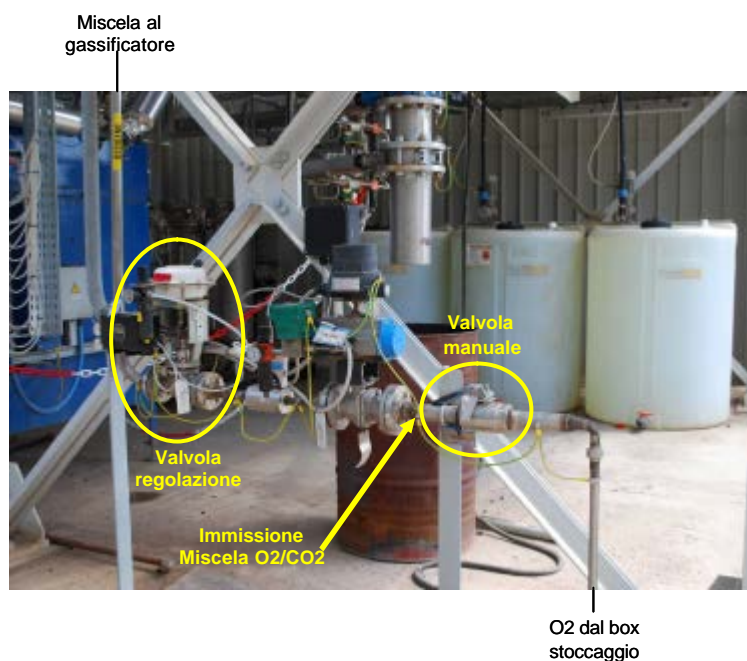


Figura 2: collegamento del sistema di miscelazione all'impianto esistente..



Figura 3: area individuata per il posizionamento di bombole e miscelatore.

## 5. Impostazione delle campagne sperimentali

Per quanto riguarda le sperimentazioni vere e proprie, il criterio di base è quello di sostituire, gradualmente, l'azoto presente nell'aria gassificante con la CO<sub>2</sub> stoccata nelle bombole, aggiustando man mano i parametri di gassificazione al fine di mantenere le condizioni di funzionamento ottimali. Come obiettivo finale si punta alla completa sostituzione dell'azoto con la CO<sub>2</sub> e all'individuazione dei valori ottimali dei principali rapporti caratteristici di gassificazione.

A tal fine, si rendono necessari, per ogni giorno di sperimentazione, circa 500 kg di CO<sub>2</sub> (corrispondenti a circa 250 Nm<sup>3</sup> di anidride carbonica gassosa) e 150 kg di ossigeno (corrispondenti a circa 100 Nm<sup>3</sup>) che, come accennato, verranno acquistati in pacchi bombole.

Tale sperimentazione è stata preceduta da apposite simulazioni su modelli matematici, al fine di semplificare l'individuazione dei parametri operativi ottimali e di valutare in anticipo la composizione del syngas prodotto (a tale proposito si rimanda al rapporto 5.2.5.2.-B "Implementazione dei modelli di simulazione").

La tabella 1 riporta una stima preliminare della composizione del syngas prodotto dalla gassificazione (convenzionale e con CO<sub>2</sub> e ossigeno come agenti gassificanti) di un carbone sudafricano a basso tenore di zolfo, operata in un reattore a letto fisso up-draft come quello della Piattaforma Pilota Sotacarbo.

	<i>Gassificazione convenzionale</i>	<i>Gassificazione con CO<sub>2</sub></i>
CO	24,78%	28,83%
CO <sub>2</sub>	4,22%	41,22%
H <sub>2</sub>	11,15%	8,66%
CH <sub>4</sub>	0,10%	0,14%
H <sub>2</sub> S	0,11%	0,14%
COS	0,01%	0,01%
N <sub>2</sub>	47,00%	1,00%
H <sub>2</sub> O	12,06%	19,99%
HCl	0,01%	0,01%
Ar	0,55%	0,01%
<b>TOTALE</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

*Tabella 1: stima della composizione del syngas (% in moli)*

Da un'analisi preliminare del processo, si può stimare una riduzione della concentrazione di idrogeno nel syngas, con un conseguente aumento della concentrazione di CO, mentre l'azoto viene quasi completamente sostituito dalla CO<sub>2</sub>.

Ciascun "ciclo sperimentale" è caratterizzato da tre giorni di attività, così organizzati:

- il primo giorno per la preparazione dell'impianto, il caricamento del gassificatore e le relative verifiche funzionali precedenti ad ogni start-up;
- il secondo giorno per la sperimentazione vera e propria e l'acquisizione dei dati sperimentali;
- il terzo giorno per lo svuotamento del reattore, il ripristino delle condizioni di "riposo" dell'impianto e l'elaborazione dei dati sperimentali.

In particolare, la sperimentazione vera e propria consiste in una serie di fasi, che possono essere sinteticamente schematizzate nel modo seguente:

- accensione del gassificatore e raggiungimento delle condizioni di funzionamento a regime (con alimentazione ad aria);

- passaggio graduale alle condizioni di alimentazione con miscele di ossigeno e CO<sub>2</sub>;
- verifica continua delle condizioni operative (in particolare temperature e composizione del syngas) e delle loro variazioni in funzione del particolare tipo di alimentazione;
- shut-down e raffreddamento del gassificatore.