



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Analisi e sperimentazione dei processi di gassificazione

*P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, A. Assettati, G. Guidarelli*

## ANALISI E SPERIMENTAZIONE DEI PROCESSI DI GASSIFICAZIONE

P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, A. Assettati, G. Guidarelli (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

Responsabile Progetto: Antonio Calabrò, ENEA

## INDICE

1.	Introduzione .....	3
2.	PROVE IN PICCOLA SCALA SU MINI IMPIANTO .....	3
2.1	il mini impianto .....	5
2.2	Sistema di acquisizione e controllo .....	6
2.3	Linea di campionamento ed analitica syngas.....	7
2.4	Sperimentazione e risultati.....	10
2.5	Modifiche al mini gassificatore.....	14
3.	PROVE SU IMPIANTO ENEA/SOTACARBO.....	16
3.1	La piattaforma pilota.....	17
3.1.1	Strumentazione e controllo .....	19
3.1.2	Sistema di analisi gas.....	21
3.2	Attività svolte .....	22
3.2.1	Sensore di livello .....	22
3.2.2	Griglia .....	23
3.2.3	Modifiche e migliorie di impianto.....	25
3.2.4	Sperimentazione laboratorio dei processi di cattura CO2.....	26
4.	Conclusioni e sviluppi futuri .....	29

## 1. INTRODUZIONE

Il presente rapporto descrive le attività svolte nell'ambito del Progetto 2.2, dal titolo "Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO2" relativamente all' Area PRODUZIONE E FONTI ENERGETICHE, gruppo tematico CARBONE PULITO, per la terza annualità del tema "Cattura e Sequestro della CO2". Gli obiettivi e l'articolazione del progetto sono descritti nel documento "Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009".

Nel particolare le attività svolte si sono sviluppate nell'ottica di perseguire l'obiettivo relativo alla sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione.

A tale scopo sia presso ENEA che presso SOTACARBO si sono svolte le attività sperimentali sugli impianti di gassificazione con aria, vapore, ossigeno e CO2, con prove e test relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature.

## 2. PROVE IN PICCOLA SCALA SU MINI IMPIANTO

Una parte delle attività di sperimentazione è stata svolta presso il Centro di Ricerche ENEA di Casaccia, dove è ubicato il mini impianto gassificatore updraft denominato GESSICA (GENERatore Sperimentale di SIngas da CARbone), dotato di sensoristica industriale e di un sistema di acquisizione e controllo capace di operare sia in maniera automatica che manuale sui principali parametri di processo.

L'obiettivo delle attività sperimentali condotte sul mini impianto è stato quello di testare le modalità di esercizio per il miglioramento del processo di produzione di syngas, nonché di testare strumentazione atta al controllo del processo. Si sono quindi, condotte prove e test relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature.

Attraverso l'attività di sperimentazione si è caratterizzato il processo e si sono definite le modalità e i principali parametri con cui operare per il raggiungimento delle condizioni di esercizio ottimali e stazionarie; si sono inoltre valutati i tempi e le modalità di risposta del sistema al variare dei parametri di ingresso quali la tipologia di agenti gassificanti e la tipologia di carbone utilizzato

L'attività sperimentale svolta sul mini gassificatore si è posta come finalità l'approfondimento degli aspetti tecnologici e sperimentali del processo di gassificazione del carbone per definirne problematiche e vantaggi intrinseci del processo.

In particolare le attività si sono sviluppate focalizzando l'attenzione sulla qualità del syngas prodotto e sul definire le modalità di conduzione dell'impianto, attraverso l'utilizzo di strumentazione e analitica di supporto al controllo di impianto. La finalità ultima è quella di fornire dati utili all'ottimizzazione di componenti e sistemi nell'ottica di un successivo upgrade dell'impianto.

E' stata sperimentata una nuova procedura di start up che utilizza un bruciatore ausiliario a gas a fiamma diretta, si è stata testata la co-gassificazione di carbone e biomasse. La tal cosa ha permesso di testare il funzionamento con un combustibile differente. In particolare come atteso si è notata una significativa produzione di tar.

Infine si è pervenuti ad un miglior settaggio del sensore di livello cosa che ha consentito poi sull'impianto un funzionamento oramai standard sull'impianto della Piattaforma Pilota ENEA/Sotacarbo.

Nell'ambito dell'attività di sperimentazione ed ottimizzazione dei sistemi di gassificazione si è svolta in parallelo all'attività di sperimentazione una attività di progettazione e modifica di parti dell'impianto sulla base delle informazioni provenienti dall'esercizio e dai test sperimentali.

Si è, a tale riguardo, proceduto in merito alle migliorie legate alla componentistica dell'impianto preesistente, alla progettazione di un reattore di gassificazione prevedendo l'utilizzo di un refrattario interno e migliorando il sistema di scarico ceneri e quello di alimentazione del carbone con l'obiettivo di definire dal punto di vista progettuale un sistema in grado di funzionare in continuo grazie al miglioramento dei sistemi di carico e scarico e a temperature più elevate grazie alla presenza di un refrattario interno che fa da schermo termico tra processo e struttura metallica.

## 2.1 IL MINI IMPIANTO

L'impianto pilota è costituito da un gassificatore controcorrente o updraft di potenzialità variabile tra 12 e 30 kW termici, equipaggiato con una successiva sezione di trattamento del gas prodotto costituita da un ciclone, un filtro e un bruciatore. L'impianto è riportato in Figura 1.

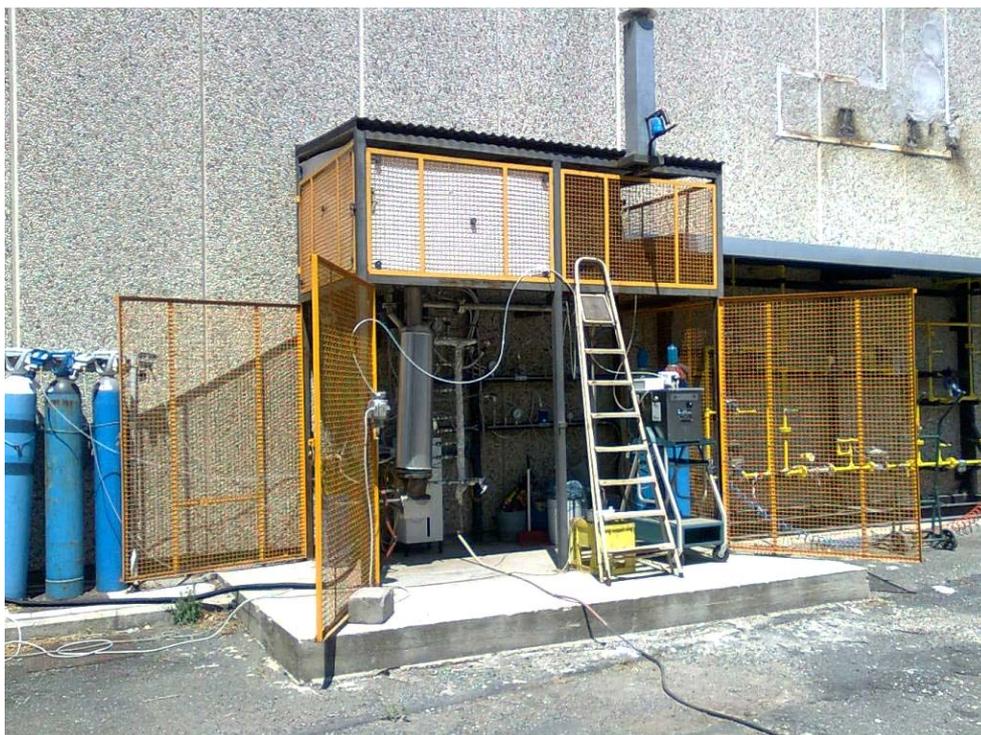


Fig. 1: Mini impianto di gassificazione GESSICA

Il combustibile, in pezzatura dell'ordine di qualche centimetro, è alimentato in continuo mediante un dosatore volumetrico costituito da un sistema a coclea motorizzata gestita da inverter. Il gassificatore è coibentato nella parte inferiore ed è altresì dotato di un sistema di alimentazione degli agenti gassificati mediante ugelli diffusori.

Un sistema ausiliario alimentato elettricamente provvede alla produzione del vapore necessario al processo. L'estrazione delle ceneri è resa possibile da una valvola stellare posizionata sul fondo, mentre l'avviamento è realizzato tramite innesco automatico ad elementi riscaldati elettricamente, attivato da remoto. L'alimentazione degli agenti gassificanti è garantita da diverse linee di adduzione dei gas di processo, collegate tramite riduttori di pressione alle opportune bombole e alla rete dell'aria compressa. Completa le dotazioni di impianto una linea di allaccio dell'acqua che serve da alimentazione per la caldaia a vapore e per le previste necessità di raffreddatori e torri di lavaggio.

Tutte le linee (vapore, ossigeno, aria, CO2 e azoto di purge) sono opportunamente strumentate al fine di monitorare in continuo pressione, temperatura e portata.

Il syngas prodotto attraversa un tronchetto orizzontale prima di essere inviato ad un ciclone ove ha luogo una prima depolverazione. A valle, oltrepassato un filtro a cartuccia, viene smaltito utilizzando un bruciatore dotato di fiamma pilota.

Al fine di controllare il profilo di temperatura lungo il letto del reattore, il gassificatore è stato equipaggiato di termocoppie di tipo K alloggiate lateralmente sul mantello del reattore.

Il gassificatore è, altresì, dotato di un sensore di livello che, basandosi sul principio delle microonde guidate in barra metallica, misura ogni variazione dell'altezza del letto, monitorando in continuo l'andamento del processo di gassificazione. L'obiettivo dichiarato è quello di pervenire alla definizione del comportamento del processo in continuo e stazionario, agendo sullo scarico e carico dei solidi.

## 2.2 SISTEMA DI ACQUISIZIONE E CONTROLLO

L'intero impianto pilota è dotato di un sistema di acquisizione e controllo dei principali parametri operativi che permette il monitoraggio del processo.

Tale sistema è stato realizzato in Enea con l'ausilio di prodotti hardware e software della National Instruments. Il software, costruito su architettura Labview, consente la completa visione di tutti i valori dei parametri di interesse forniti dagli strumenti montati in campo, e permette l'effettuazione delle opportune regolazioni sia in manuale che in automatico durante il normale funzionamento.

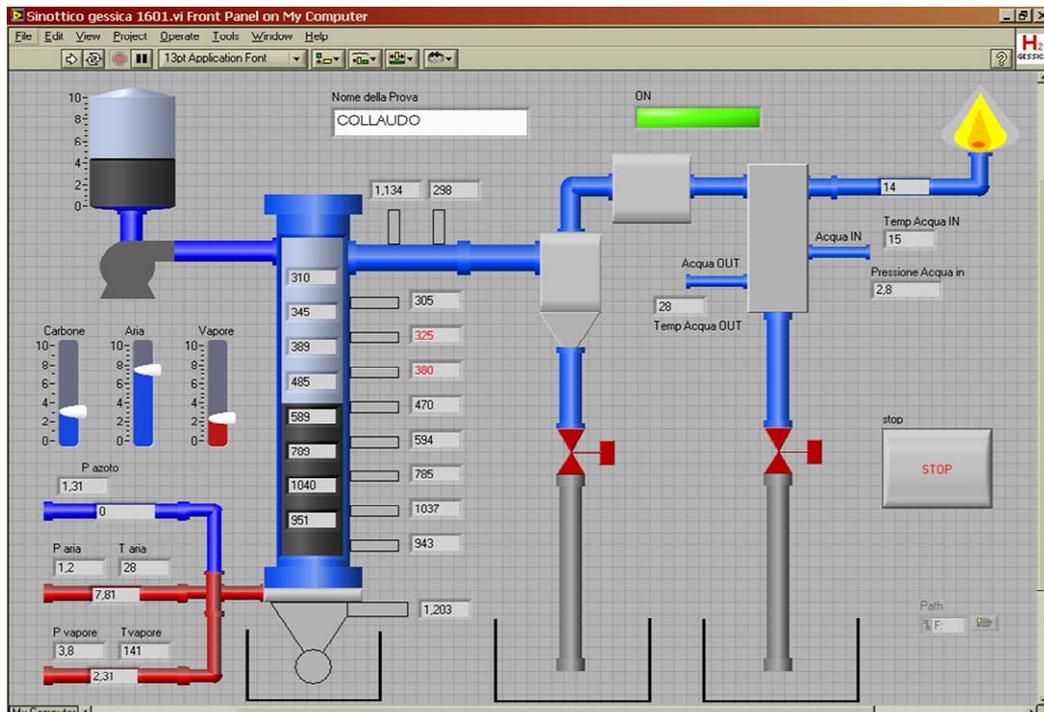


Fig. 2: Sinottico del sistema di acquisizione e controllo

Il codice così fatto, sviluppato su sistema operativo Windows XP, opera tramite protocollo TCP/IP facendo dialogare un computer portatile con una batteria di schede di acquisizione dati, connesse ai diversi sensori.

Come riportato nella figura successiva, la pagina principale del sinottico permette di avere sotto controllo tutti i dati strumentali in tempo reale e di controllare il processo nel suo complesso con semplicità e sicurezza sia in modalità automatica che manuale. Il sistema di regolazione e controllo è dotato anche di allarmi per il blocco del processo in caso di anomalie di funzionamento.

In particolare, la strumentazione così approntata, permette di acquisire e controllare un insieme di informazioni riguardanti il processo di gassificazione quali: il profilo di temperatura lungo l'asse del reattore, le portate gas di alimentazione del syngas prodotto ed il quantitativo di carbone presente nel reattore mediante un misuratore di livello. Sulla base di questi dati è possibile pervenire agli andamenti nel tempo e quindi ai consumi e alle quantità orarie di syngas prodotto.

## 2.3 LINEA DI CAMPIONAMENTO ED ANALITICA SYNGAS

Al fine di monitorare la qualità del syngas prodotto e l'andamento delle concentrazioni dei principali componenti durante l'esercizio l'impianto è dotato di un sistema di analisi online dei principali gas prodotti.

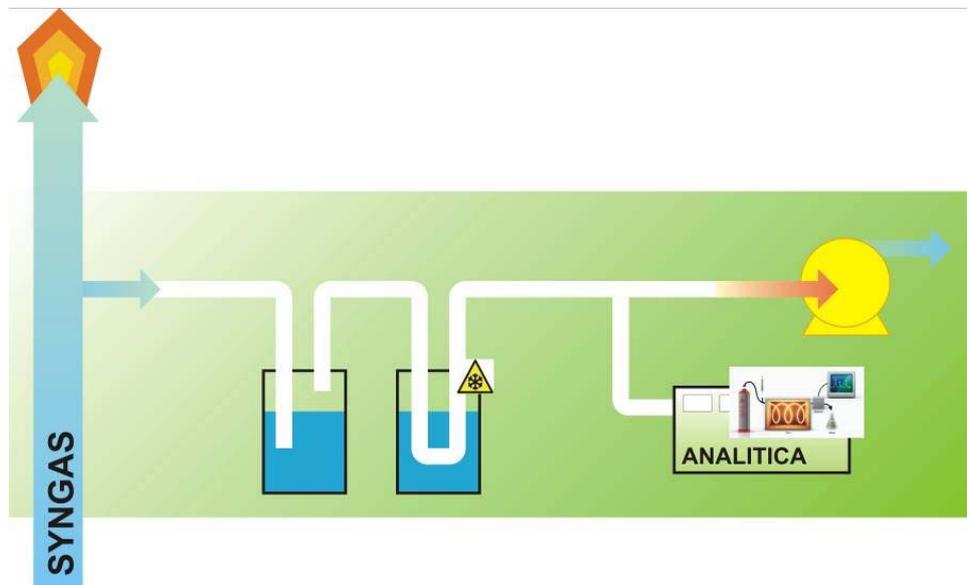


Fig. 3: Schema della linea di campionamento

L'impianto è equipaggiato con un sistema di misura in continuo della composizione dei gas prodotti attraverso l'utilizzo di una linea di campionamento online che si interfaccia con un più sistemi di analisi gas: un sistema modulare e un microgascromatografo portatile.

In particolare la linea di campionamento è realizzata attraverso una serie di trappole fredde in modo da evitare che composti indesiderati quali tar, particolato e condense che possano nuocere alla sensibilità dello strumento. Il gas viene prelevato prima della sua adduzione alla torcia e avviato alla linea di campionamento, il cui schema è illustrato in figura 3. Le trappole fredde sono alloggiati all'interno di un gruppo frigo, mostrato in figura 4, così da assicurare la condensazione e cattura dei composti condensabili indesiderati di cui sopra. Una pompa di aspirazione assicura il flussaggio del gas nella linea.



Fig. 4: Gassificatore e gruppo frigo

Il micro-GC permette l'analisi qualitativa e quantitativa delle specie costituenti il syngas prodotto, monitorando l'andamento nel tempo dei principali prodotti del processo di gassificazione.

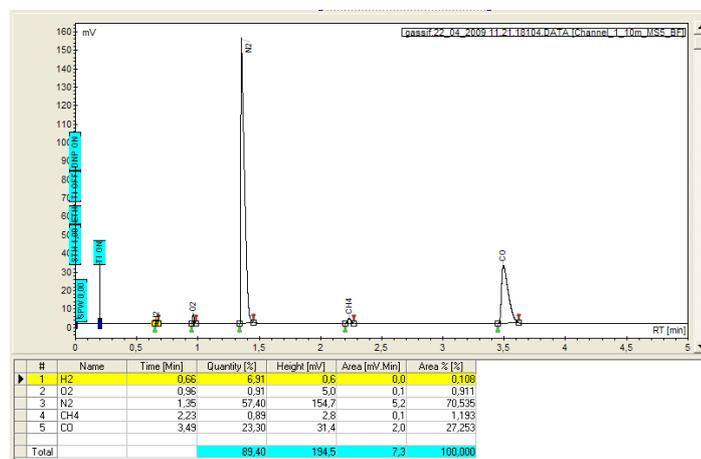


Fig. 5: Gas cromatografo ed esempio di un cromatogramma

Si tratta di uno strumento compatto e portatile dotato di filtri, di sistema di aspirazione, di due colonne di separazione gas e di un rilevatore TCD in modo da rilevare le specie gassose di interesse nei processi di gassificazione, come riporta il cromatogramma ottenuto in una prova sperimentale e mostrato in figura 5.

L'analitica modulare è un sistema costituito da più moduli a cella che permette la misura in continuo dei principali composti costituenti il syngas (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>) basandosi su differenti principi di misura a seconda del composto che si deve misurare (Figura 6).



Fig. 6: Analitica modulare e sinottico di interfaccia con l'operatore

Il gas prelevato ed avviato al sistema modulare di analisi dei gas prima di essere avviato agli strumenti viene riscaldato con un'apposita sonda riscaldante. L'acquisizione dei dati dell'analitica modulare avviene con rate di qualche secondo e la composizione è visibile all'operatore in un sinottico su PC, così da avere visione in tempo reale dell'andamento del processo e potere monitorare la conduzione dell'impianto.

## 2.4 SPERIMENTAZIONE E RISULTATI

L'attività sperimentale svolta sul mini gassificatore si è posta come finalità l'approfondimento degli aspetti tecnologici e sperimentali del processo di gassificazione del carbone per definirne problematiche e vantaggi intrinseci del processo.

Attraverso l'attività di sperimentazione si è caratterizzato il processo e si sono definite le modalità e i principali parametri con cui operare per il raggiungimento delle condizioni di esercizio ottimali e stazionarie; si sono inoltre valutati i tempi e le modalità di risposta del sistema al variare dei parametri di ingresso quali la tipologia di agenti gassificanti e la tipologia di carbone utilizzato.

L'attività condotta si è basata su una preventiva valutazione dei parametri sperimentali sui quali agire in modo da definire le procedure con cui eseguire le prove.

A valle delle verifiche funzionali si è avviata la fase sperimentale di test dell'impianto utilizzando nei due test qui riportati un carbone russo, la cui analisi immediata, effettuata secondo la norma ASTM D5142/02, è riportata in Tabella 2 e pellet di faggio

	% in peso	% in peso s.s. sostanza secca
Umidità	5.9	0.0
Volatili	22.7	24.1
Carbonio fisso	57.7	61.3
Ceneri	13.7	14.6

Tab. 1: Analisi immediata del carbone russo secondo ASTM D5142/02

Si sono effettuati più avviamenti durante i quali si sono utilizzate differenti tipologie di agenti gassificanti quali aria, vapore, ossigeno.

Nei test sperimentali effettuati è stata sperimentata una nuova procedura di start up che utilizza un bruciatore ausiliario a gas a fiamma diretta.

Tale sistema interviene direttamente sullo strato inferiore del letto di gassificazione attraverso quattro appositi bocchelli di accesso dall'esterno. Per poter operare in questa configurazione il reattore viene portato in leggera depressione grazie ad un sistema ad eiezione appositamente predisposto. I tempi di avviamento si riducono drasticamente. Grazie ai ridotti tempi di start up e all'accesso su più fronti in senso radiale risulta migliorata anche l'omogeneità di temperatura su tutta la sezione inferiore con diminuzione dell'innesco di cammini preferenziali

Tra le migliorie della sensoristica adibita al controllo dell'impianto si è pervenuti ad un miglior settaggio del sensore di livello cosa che ha consentito poi sull'impianto un funzionamento oramai standard sull'impianto della Piattaforma Pilota ENEA/Sotacarbo.

Tra gli avviamenti effettuati si è testato il processo di co-gassificazione carbone/biomassa con un alimentazione costituita da una carica al 50% di carbone russo e al 50 % di pellet di faggio.

La tal cosa ha permesso di testare il funzionamento con un combustibile differente. In particolare come atteso si è notata una significativa produzione di tar che ha richiesto una differente procedura per il campionamento del syngas dato l'aumento di condensa nella linea di campionamento.

Si è a tal fine proceduti ad un controllo più frequente del trappole fredde e proceduto alla raccolta di campioni di tar da consegnare al Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma Tor Vergata per lo studio di caratterizzazione sperimentale qualitativo e quantitativo della composizione.

La conduzione della prova di co-gassificazione ha visto succedersi le diverse fasi: di start up ed accensione mediante l'adduzione di aria che ha portato il gassificatore alla temperatura di esercizio e di gassificazione con agenti gassificanti aria/O2 e aria/vapore.

In figura 8 è riportato l'andamento temporale della composizione del syngas nei suoi principali componenti, nelle differenti fasi della prova sperimentale. Si notano più fasi durante il test con variazione della composizione legate alla variazione degli agenti gassificanti

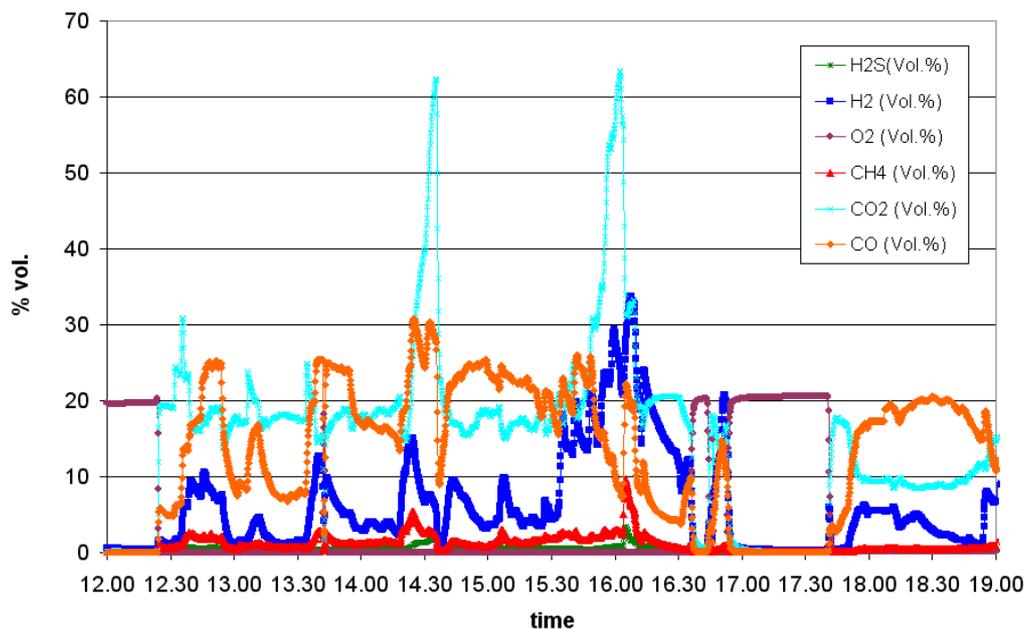


Fig. 7: Andamento della composizione del syngas durante il test con alimentazione mix carbone/biomassa

La conduzione del secondo test come il primo ha visto succedersi le seguenti fasi: accensione e avviamento con aria, gassificazione mediante l'adduzione di aria/vapore e spegnimento.

Dopo un iniziale fase di transitorio si è pervenuti, nell'esercizio in gassificazione con aria/vapore, al funzionamento in continuo e stazionario; mantenendo ossia una stabilità di funzionamento nei principali parametri di esercizio per un periodo abbastanza lungo. Tale stabilità risulta evidente dal grafico, riportato in figura 8, dove la composizione del syngas prodotto nei suoi principali componenti rimane costante nel tempo

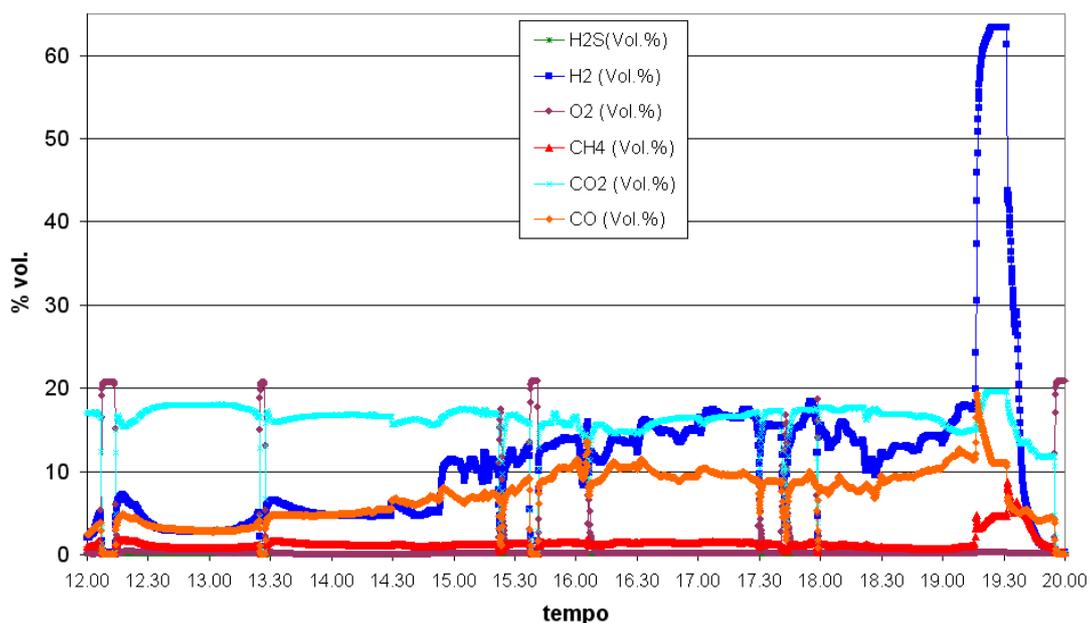


Fig. 8: Andamento della composizione del syngas durante il test con alimentazione a carbone russo

Durante i vari test sperimentali si è testato un nuovo sistema di campionamento quantitativo delle polveri al fine di applicare la medesima procedura presso la Piattaforma Pilota ENEA/Sotacarbo.

Il sistema allestito è costituito da una pompa aspirante, un porta filtro e filtri di vario tipo (ditali in fibra di vetro, in fibra di quarzo e in fibra ceramica), tubi e manicotti per il prelievo del syngas nei punti di interesse, e la restituzione all'impianto per l'invio in torcia o all'utilizzatore, ed il cui schema è riportato in figura 9.



a



b



c



d

Fig. 9: Sistema di campionamento: pompa di aspirazione (a), filtro e porta filtro (b,c, d)

## 2.5 MODIFICHE AL MINI GASSIFICATORE

L'attività in parola si è sviluppata, come sopra descritto, con la finalità di realizzare un apparecchiatura in grado di monitorare il processo di gassificazione che si sviluppa in un gassificatore del tipo updraft.

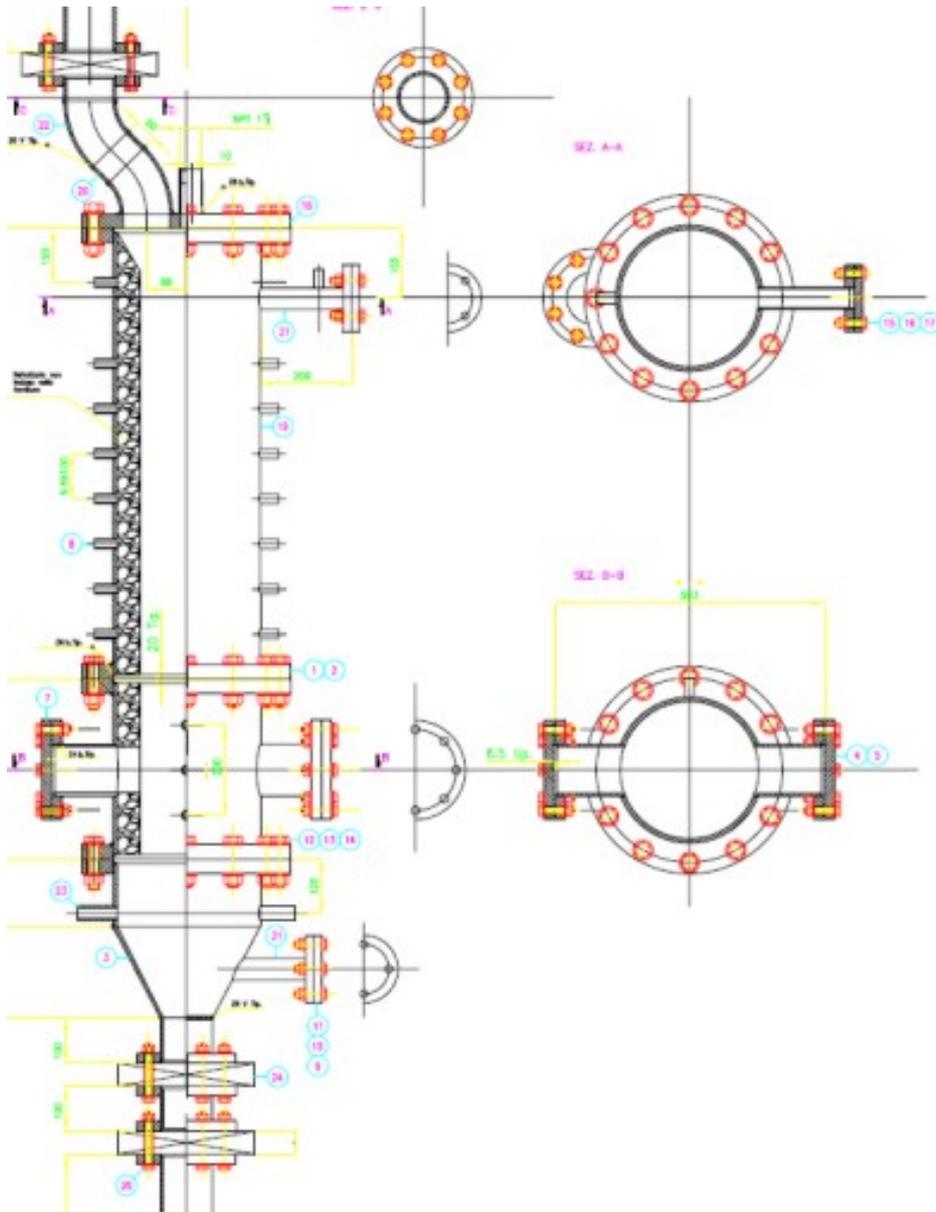


Fig. 10: Disegno progettuale del generatore di syngas

In particolare si è andati a riprogettare un nuovo reattore di gassificazione prevedendo l'utilizzo di un refrattario interno e migliorando il sistema di scarico ceneri e quello di alimentazione del carbone con l'obiettivo di definire dal punto di vista progettuale un sistema in grado di funzionare

in continuo grazie al miglioramento dei sistemi di carico e scarico e a temperature più elevate grazie alla presenza di un refrattario interno che fa da schermo termico tra processo e struttura metallica.

La progettazione si è sviluppata in modo da potere effettuare più attività di ricerca, testando differenti metodologie di gassificazione basate sull'utilizzo di diverse geometrie interne.

L'apparecchiatura progettata, mostrata in Figura 10, è dotata di un tutta una serie di bocchelli di adduzione e scarico dei solidi, ingresso e uscita dei gas e di accesso al sistema per sensori di vario tipo per la misura di temperature, pressioni, portate e livello, strumentazione destinata al controllo del suo funzionamento.

### 3. PROVE SU IMPIANTO ENEA/SOTACARBO

Nell'ambito delle attività inerenti la sperimentazione sul campo e l'ottimizzazione degli impianti e sistemi di gassificazione del carbone sono proseguite presso la piattaforma pilota SOTACARBO le attività sperimentali sugli impianti di gassificazione con aria, vapore, ossigeno e CO<sub>2</sub>, con prove e test relativi a diverse condizioni di funzionamento, tesi alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature.

In questo ambito sono state effettuate diverse modifiche alla componentistica degli impianti preesistenti presso la Piattaforma Pilota SOTACARBO, migliorando il sistema di scarico ceneri, la strumentazione e l'analitica di corredo in modo da poter effettuare sperimentazioni più accurate e con funzionamento in continuo.

Si è inoltre testato, a proseguo di quanto sviluppato nell'annualità precedente, il funzionamento di un nuovo sensore di livello basato sul principio delle microonde guidate in arra metallica nelle condizioni di un normale esercizio del gassificatore.

Infine, poiché i principali obiettivi della campagna sperimentale relativi all'ottimizzazione del processo di gassificazione risiedono nell'acquisizione di conoscenze e competenze relative alla conduzione degli impianti in condizioni ottimali di funzionamento, sulla base dell'esperienza maturata in impianto sono scaturite alcune osservazioni sulle criticità del processo stesso dalla cui analisi si è pervenuti a modificare la conduzione dell'impianto nelle fasi di start-up e in esercizio.

Tali modifiche hanno permesso di ottenere le migliori condizioni di esercizio in termini di potenzialità del reattore, di stabilità e di continuità del processo stesso. Nonché si sono acquisite ulteriori conoscenze sulla modalità di conduzione andando a definire e a risolvere le differenti problematiche legate alla gassificazione.

L'attività in parola hanno riguardato anche il supporto all'attività sperimentazioni su un impianto da laboratorio di assorbimento di CO<sub>2</sub> da syngas e fumi e di supporto ed interfacciamento attivo alla stesura dello studio e alla definizione preliminare relativo ad un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO<sub>2</sub>.

### 3.1 LA PIATTAFORMA PILOTA

Nell'ambito delle attività di ricerca per lo sviluppo di un processo di gassificazione del carbone e trattamento del syngas per una produzione di idrogeno ed energia elettrica a emissioni estremamente ridotte di agenti inquinanti e di anidride carbonica, Enea e Sotacarbo hanno recentemente sviluppato una piattaforma pilota comprendente due impianti di gassificazione in letto fisso up-draft (tecnologia Wellman-Galusha) e una linea per la depurazione e lo sfruttamento energetico del syngas.

Tale impianto, oltre alla sezione di gassificazione, comprende due differenti linee di trattamento del syngas, dedicate una alla produzione di energia elettrica e una al trattamento a caldo del syngas per la produzione di idrogeno.

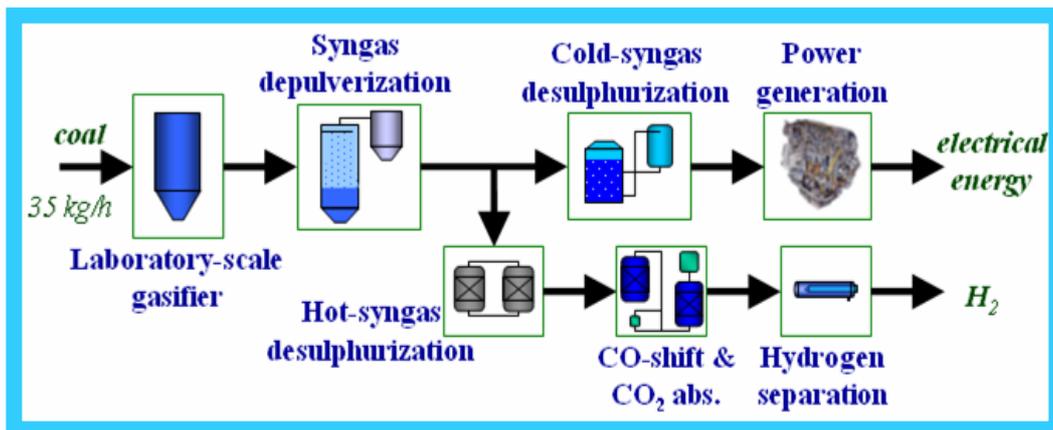


Fig. 11 : Schema di flusso semplificato dell'impianto pilota.

In particolare, con riferimento alla figura soprastante, il syngas proveniente dal gassificatore viene inviato a una unità compatta che è composta da tre differenti colonne: una torre di lavaggio (scrubber) per il raffreddamento del syngas e la prima rimozione di polveri e tar; un primo stadio di desolforazione a freddo (necessario per il funzionamento con carboni ad alto tenore di zolfo), utilizzando una soluzione acquosa di soda; un precipitatore elettrostatico a umido (WESP) per la rimozione delle polveri e del tar residui.

A valle del precipitatore elettrostatico, nelle condizioni nominali di funzionamento, il syngas può essere inviato completamente al secondo stadio di desolforazione a freddo, utilizzando una miscela di soda e ipoclorito di sodio in soluzione acquosa e, successivamente, a un motore a combustione interna da circa 24 kW (elettrici) per la produzione di energia elettrica.

Una porzione del syngas prodotto, pari a circa 20-25 Nm<sup>3</sup>/h, può essere inviata, in alternativa, alla linea di trattamento a caldo del syngas per la produzione di idrogeno. In tale linea il gas è riscaldato, fino a circa 350-400 °C, e inviato a un sistema di desolforazione a caldo, seguito da un sistema integrato di CO-shift e assorbimento della CO<sub>2</sub>, seguito dall'unità di purificazione dell'idrogeno.

In particolare, l'unità di desolforazione a caldo comprende due reattori, in configurazione lead-leg, riempiti con un sorbente a base di ossido di zinco, che consentono una rimozione accurata dei composti dello zolfo presenti nel syngas. L'unità di CO-shift e assorbimento della CO2 (quest'ultimo effettuato mediante una soluzione acquosa di monoetanolamina in un reattore a bolle) consente l'arricchimento in idrogeno del syngas, idrogeno che viene successivamente purificato in una unità PSA (pressure swing adsorption) fino a una purezza dell'ordine del 97%, come è risultato dalla prima campagna sperimentale sull'impianto.

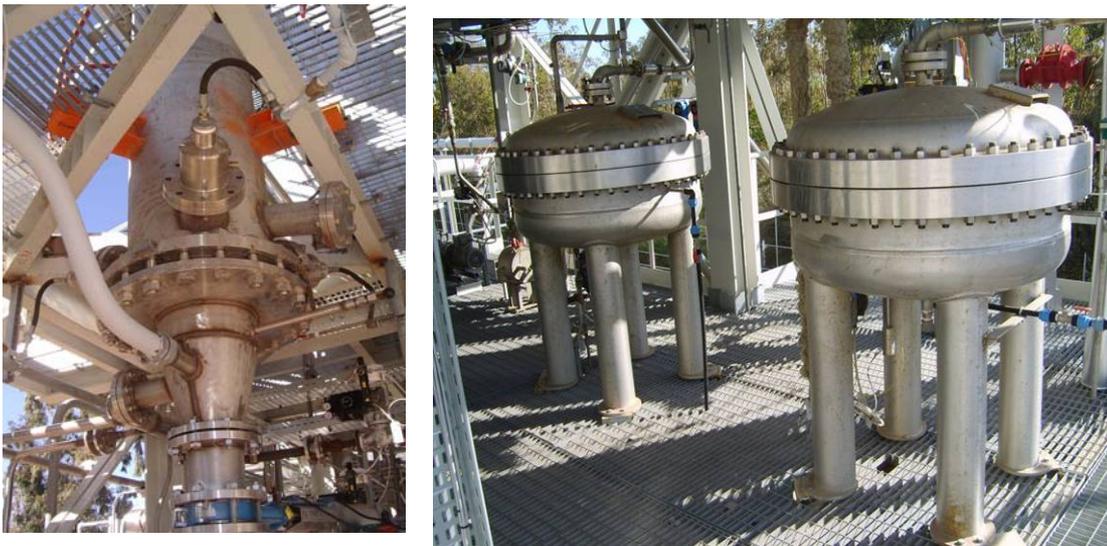


Fig. 12: Parte inferiore del gassificatore pilota e dettaglio dei reattori a bolle.

Tale purezza, pur essendo significativamente inferiore all'attuale stato dell'arte della tecnologia PSA, è pienamente in linea con il possibile utilizzo dell'idrogeno prodotto per l'arricchimento del syngas da inviare al motore a combustione interna. La taglia della linea di trattamento a caldo del syngas per la produzione di idrogeno, sebbene sia molto inferiore rispetto alle taglie degli impianti commerciali, è stata assunta in quanto garantisce un buon compromesso tra i ridotti costi di sperimentazione e l'accuratezza dei risultati, utilizzabili per un futuro scale-up dell'impianto.

Il gassificatore pilota della piattaforma Sotacarbo è un letto fisso up-draft di tecnologia Wellman-Galusha (opportunamente adattata alla taglia), progettato per operare con alimentazione ad aria e a pressione pressoché atmosferica. Il reattore è poi 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 lo scarico delle ceneri. La scelta di tale tecnologia deriva da un particolare interesse alla applicazione della tecnologia a impianti commerciali di piccola e media taglia.

Il reattore 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 1300 mm (per un totale di circa 90 dm<sup>3</sup>). A differenza delle configurazioni convenzionali Wellman-Galusha, il gassificatore non è dotato né

della camicia di raffreddamento (le pareti interne sono rivestite in materiale refrattario), né dell'agitatore interno, difficilmente realizzabili in un reattore di piccole dimensioni.

Pertanto il comportamento termodinamico dell'apparecchiatura risulta essere differente rispetto agli analoghi gassificatori di taglia commerciale. Il combustibile viene introdotto all'interno del gassificatore attraverso un unico condotto coassiale allo stesso reattore; il profilo termico è determinato mediante una termocoppia multipla dotata di 11 sensori distribuiti lungo tutta l'altezza del reattore, in prossimità dell'asse.

Il gassificatore pilota è dotato di una serie di apparecchiature ausiliarie per lo svolgimento delle varie funzioni necessarie all'esercizio dello stesso. Di seguito è presentata, in breve sintesi, una descrizione delle apparecchiature principali.

Il combustibile, fornito a bordo impianto in big bags da circa 1 m<sup>3</sup>, viene sollevato mediante un paranco fino al livello della tramoggia di caricamento e immesso nella stessa. Mediante una rotocella e una valvola a ghigliottina (tra le quali il combustibile viene inertizzato con una corrente di azoto) il combustibile viene dosato e immesso all'interno del reattore. La tramoggia di carico è collegata a un sistema di aspirazione, al fine di ridurre le emissioni di polveri di carbone nel corso delle operazioni di caricamento.

Gli agenti gassificanti (aria e vapore) vengono prodotti rispettivamente mediante un compressore d'aria e un generatore di vapore (della potenzialità nominale di 100 kg/h) e miscelati, per mezzo di due valvole di regolazione, poco prima dell'immissione nella parte bassa del reattore. Per i test di gassificazione con ossigeno e anidride carbonica è stato dotato il sistema di un apposito miscelatore, che consente di regolare la composizione della miscela fino a una concentrazione massima di ossigeno del 25%. Lo scrubber e una torcia consentono infine la depurazione e la combustione del syngas prodotto.

### **3.1.1 STRUMENTAZIONE E CONTROLLO**

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, e principalmente le pressioni, le portate e le temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto e i profili di termici all'interno del reattore.

L'intero impianto è dotato di un sistema di acquisizione e controllo dei principali parametri operativi del processo. Il sistema completo, comprendente tutti gli organi e dispositivi necessari all'invio di comandi. Sono inoltre previsti funzionamento manuale e/o automatico, controlla e gestisce tutte le apparecchiature e si interfaccia con eventuali altri sistemi di automazione tramite sistemi di input/output fisici e/o di rete. La funzione di controllo e' quella di coordinamento e segnalazione di tutto il sistema in oggetto, effettua pertanto tutto il controllo degli azionamenti, le sequenze di configurazione di impianto e le sequenze di messa in sicurezza di impianto, la gestione

degli interblocchi, la visualizzazione sinottica ed il coordinamento degli stati di tutti i sottosistemi interessati allo svolgimento della funzione dell'impianto nella sua globalità.

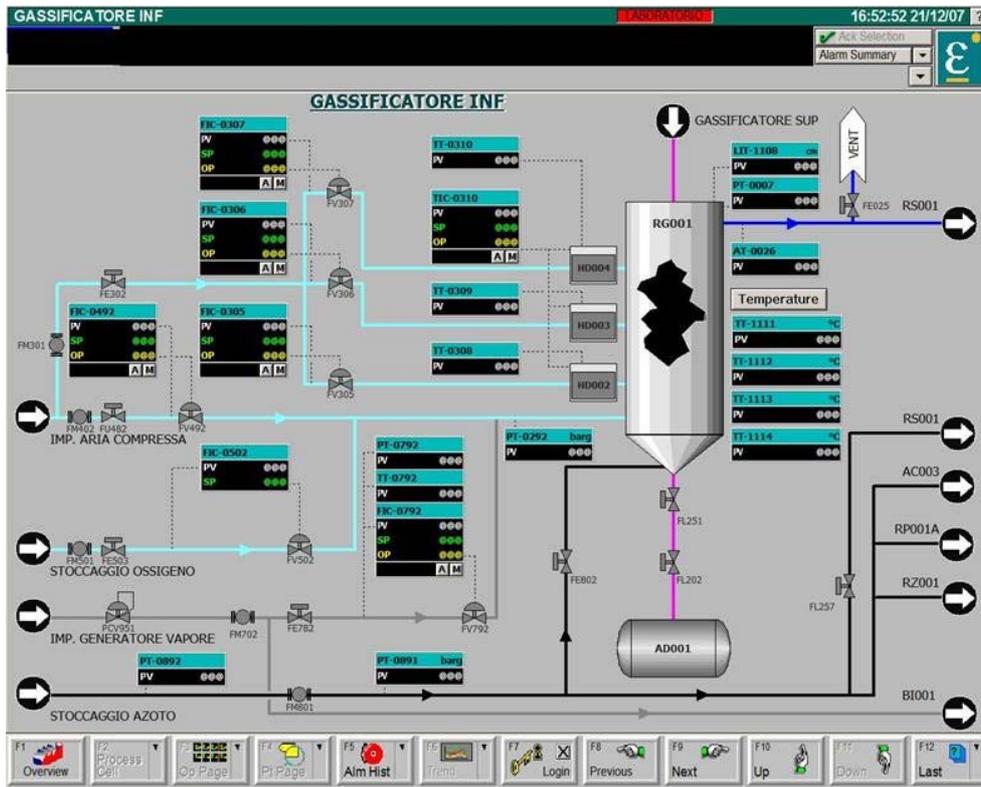


Fig. 13: Esempio di sinottico del sistema di acquisizione e controllo del gasificatore

Sono inoltre previsti sinottici di vista d'insieme e sinottici dedicati alla visualizzazione di dettaglio di ogni zona o circuito.

La descrizione delle logiche e' fatta mediante stati e transizioni. Il controllore acquisisce gli input da campo e dà i comandi mediante schede di I/O dedicate. Il monitoraggio dell'impianto e' effettuato mediante sinottici su supervisore. E' possibile muoversi da un sinottico all'altro sia tramite mouse sia tramite tasti dedicati, verificare lo stato delle utenze in base al colore (marcia/arresto/anomalia) e visualizzare tutte le grandezze analogiche di interesse.

Un sinottico è dedicato alla gestione degli allarmi, secondo le sequenze ISO standard con possibilità di visualizzare i file di log su disco e stampante. Sono inoltre previste alcune pagine di trend per la visualizzazione sotto forma di grafico on-line dell'andamento di grandezze analogiche e la loro archiviazione su disco per la realizzazione degli storici

### 3..1.2 SISTEMA DI ANALISI GAS

L'impianto è dotato di un sistema di misura in continuo della composizione dei gas prodotti attraverso l'utilizzo di un campionamento on line, convogliato ad un micro GC della Agilent dotato di due moduli di analisi.

Nel dettaglio il sistema di campionamento è composto da 15 prese di campionamento del syngas, circa 200 metri di linee di trasporto e condizionamento del campione oltre che dalle sopra citate apparecchiature per l'analisi del syngas.

Le linee sono costituite principalmente da valvole, filtri, condensatori, tubazioni e flussometri. Il posizionamento delle prese è stato opportunamente studiato per monitorare la composizione del syngas nelle varie sezioni che costituiscono l'impianto. Il syngas prelevato dai diversi punti di interesse viene dapprima ripulito da tar condensabili, polveri e HCl, tutte sostanze che possono danneggiare la strumentazione di analisi. Viene poi condizionato alla corretta temperatura ed infine inviato all'analisi. Per l'analisi del syngas viene utilizzato un carrello attrezzato completo di pompa di campionamento per l'analisi delle miscele non pressurizzate in fase gassosa e di micro-gascromatografo a due colonne per la misura della concentrazione di 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.

Il micro gascromatografo effettua l'analisi del campione di syngas in un tempo medio pari a circa tre minuti. Tale analisi viene effettuata previa taratura effettuata tramite bombole di miscele di gas a concentrazione nota.



Fig. 14: Laboratorio mobile di analisi gas ENEA e carrello di prelievo e analisi gascromatografica

## 3.2 ATTIVITÀ SVOLTE

Le attività sperimentali in taglia più significativa sono state svolte, in coordinamento tra personale ENEA e Sotacarbo, presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo, dove sono state approntate tutta una serie di modifiche e migliorie degli impianti.

Il campo di sperimentazione si è concentrato sul processo di gassificazione e sull'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature per il funzionamento in continuo del gassificatore.

### 3.2.1 SENSORE DI LIVELLO

Si è proseguito con quanto sviluppato nell'annualità precedente alla misura dell'altezza del letto attraverso un sensore di livello alloggiato all'interno del gassificatore, funzionante del tipo a ultrasuoni guidati in barra metallica, dotato di un sistema di acquisizione del segnale.

L'obiettivo finale è quello di ottenere un insieme di informazioni provenienti dalla misura delle diverse grandezze caratterizzanti l'esercizio del gassificatore (livello, temperature, pressioni, portate in ingresso ed in uscita, composizione syngas) in modo da pervenire, agendo sull'alimentazione degli agenti gassificanti e sulle operazioni di carico/scarico dei solidi, ad una strategia di controllo ottimale del processo che possa garantire innanzi tutto il funzionamento stazionario in continuo e dall'altro la massimizzazione di parametri quali p.es. rendimento di gassificazione, portata totale, potere calorifico, contenuto in idrogeno del syngas e la minimizzazione del contenuto di inquinanti nel syngas e di incombusti nei solidi scaricati.



Fig. 15: Vista di dettaglio del misuratore di livello carbone.

I dati relativi alla misura dell'altezza del letto durante l'esercizio dei vari avviamenti effettuati, sono stati elaborati insieme ai dati forniti dalle termocoppie alloggiate lungo l'altezza del reattore, al fine di ottenere una funzione di correlazione tra tutte le informazioni disponibili; funzione utile alla conduzione del gassificatore stesso e quindi al controllo del processo di gassificazione durante l'esercizio.

A tale scopo si è testato durante una serie di avviamenti la funzionalità del sensore di livello, descritto in precedenza, nelle condizioni di un normale esercizio del gassificatore.

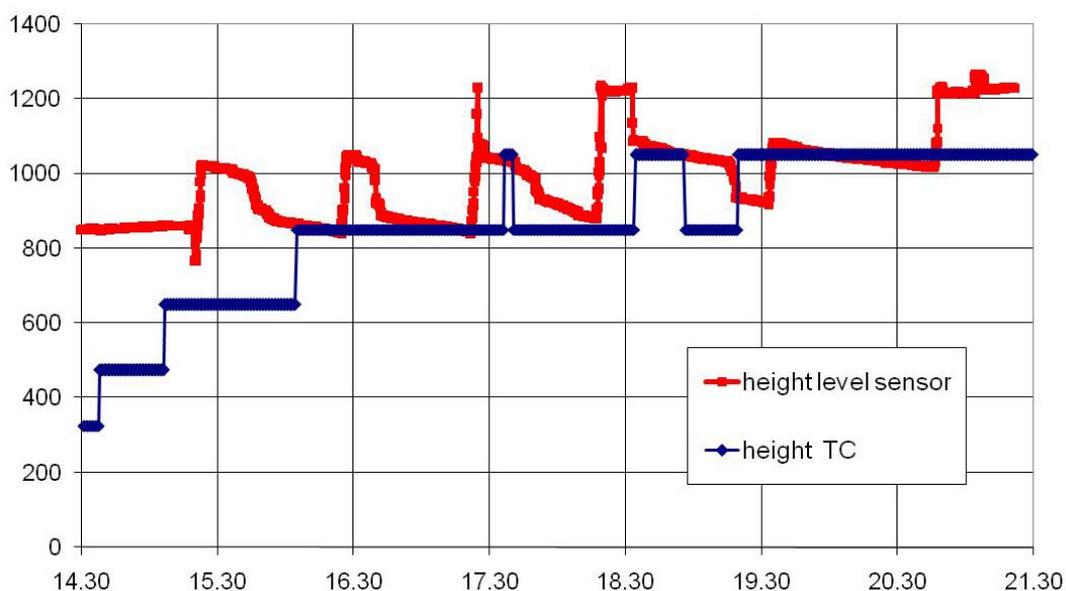


Fig. 16: Vista di dettaglio del misuratore di livello carbone.

La figura soprastante riportano l'altezza del letto durante l'esercizio durante un avviamenti effettuati. Il segnale del sensore di livello è riportato insieme all'informazione proveniente dalle termocoppie della multipla alloggiate lungo l'altezza del letto del reattore.

### 3.2.2 GRIGLIA

Con l'obiettivo di monitorare le temperature della griglia durante il funzionamento del gassificatore, si è incrementato a 7 il numero delle termocoppie di tipo K presenti sulla parte fissa della griglia di scarico ceneri.

In questo modo si è ottenuto nelle differenti fasi di conduzione del gassificatore (start-up, esercizio, spegnimento) una mappatura delle temperature.

L'obiettivo è quello di accertarsi che durante il funzionamento non si realizzino sovratemperature che potrebbero portare a danneggiamenti della griglia stessa.



Fig. 17: Vista di dettaglio della testa porta multipla per termocoppie.

Un secondo obiettivo è stato quello di avere una mappatura spaziale delle temperature dei materiali solidi in fase di scarico. Una caratterizzazione in questo senso può essere infatti utile per un'ulteriore ottimizzazione delle geometrie della griglia. Un terzo obiettivo è stato quello di avere una mappatura spaziale delle temperature dei materiali solidi sopra griglia utile per determinare lo stato di avanzamento delle zone di combustione.



Fig. 18: Vista di dettaglio griglia fissa con aste flottanti in dilatazione.

### 3.2.3 MODIFICHE E MIGLIORIE DI IMPIANTO

Poiché i principali obiettivi della campagna sperimentale relativi all'ottimizzazione del processo di gassificazione risiedono nell'acquisizione di conoscenze e competenze relative alla conduzione degli impianti in condizioni ottimali di funzionamento si sono effettuate una serie di modifiche e migliorie di impianto che hanno condotto a esercire l'impianto in continuo ed in condizioni stazionarie.

A tale scopo si è provveduto alle seguenti modifiche:

- la modifica della griglia con inserzione di barre fisse a estremo flottante;
- l'inserimento di sette termocoppie sulla griglia;
- l'inserimento del sensore di livello;
- il taglio del tronchetto utile ad aumentare l'effettiva altezza del letto di gassificazione;
- modifica nella tempistica dello scarico e carico del gassificatore;
- preriscaldamento di tutti gli agenti gassificanti.

Nel particolare il taglio del tronchetto di adduzione carbone a portato ad incrementare l'altezza del letto di carbone con un conseguente beneficio sulle rese del processo di gassificazione.

Si è inoltre modificato la tempistica dello scarico e carico del gassificatore migliorando in questo modo la qualità del syngas prodotto per l'immissione di carbone fresco nel letto. In quanto un'eccessiva permanenza nel letto del carbone portava ad una veloce perdita della componente volatile più reattiva e ad una conseguente diminuzione della reattività del processo restando la sola componente del carbonio fisso meno reattiva.

Anche il preriscaldamento degli agenti gassificanti quali aria/ossigeno/CO2 e vapore ha recato benefici al processo.

Altresì è stata condotta durante i test sperimentali un'attività di campionamento polveri lungo la linea del clean-up mediante l'utilizzo di opacimetri ed impattori.

A supporto dello sviluppo dell'attività sperimentale si è realizzato di concerto ENEA/Sotacarbo una programmazione cronologica delle attività sperimentali attraverso la stesura di un cronoprogramma generale dove è stato inserito il dettaglio delle prove. Che di volta in volta è stato aggiornato così da definire uno storico utile al proseguo dell'attività.

Si è inoltre segnalata la necessità di effettuare una Standardizzazione dell'esecuzione delle prove, con specifiche iniziali e reporting finale.

Infine l'impianto è in fase di continua messa a punto a sviluppo di quanto attualmente effettuato si prevede di migliorare il sistema di acquisizione delle temperature all'interno del reattore di gassificazione, strumentando attraverso l'inserimento di termocoppie il mantello del reattore e sostituendo la multipla con uno stirrer tale da mantenere il letto di carbone rimescolato.

### 3.2.4 SPERIMENTAZIONE LABORATORIO DEI PROCESSI DI CATTURA CO2

Si è sviluppata anche un'attività di supporto alle sperimentazioni su un impianto da laboratorio di assorbimento di CO2 da syngas e fumi svolte presso i laboratori di Sotacarbo.

Presso i laboratori Sotacarbo è presente un impianto prova per l'assorbimento/desorbimento della CO2 che può utilizzare solventi liquidi come quelli oggetto dello studio.

L'impianto in parola è costituito da una colonna in vetro suddivisa in due sezioni fondamentali:

- una sezione superiore, provvista di riempimento (anelli Rashig in vetro) in cui è possibile effettuare l'assorbimento tramite solventi liquidi;
- una sezione inferiore, provvista di tre serpentine per il riscaldamento con vapore, dimensionata per il processo di rigenerazione del solvente esausto.

L'impianto, comprende inoltre un sistema di miscelazione e distribuzione dei gas (azoto e anidride carbonica, forniti in bombole) che consente di simulare il gas di sintesi o i fumi di combustione da trattare, oltre a tutte le apparecchiature ausiliarie per lo stoccaggio e la distribuzione dei solventi, l'analisi e acquisizione dei dati e la sicurezza del personale operante.



Fig. 18: Impianto da laboratorio di assorbimento di CO2

Al fine di effettuare l'attività si sono fornite una serie di indicazioni su come svolgere la sperimentazione con particolare riferimento a:

- necessità di fornire il banco prova di un sistema di acquisizione in continuo dei principali parametri operativi quali temperature, pressioni e portate;
- definizione di un sistema di misura della portata in ingresso del gas in colonna;
- definizione di un sistema di misura della portata in ingresso del solvente in colonna;
- definire la geometria e la fluidodinamica della colonna al fine di individuare i campi di operatività delle portate di liquido e di gas da inviare in colonna evitando le condizioni di allagamento e di non completo bagnamento del riempimento;
- definire una griglia di prove sperimentali testando la colonna su più concentrazioni volumetriche della CO2 (p.es. 5, 10, 15, 20, 25%) e su tre tipologie differenti della soluzione amminica (MEA 5M, MDEA, 5M, MEA+PZ 5M), in più modalità operative ossia: ciclo aperto e ciclo chiuso a saturazione individuando per ciascuna prova obiettivi e durata;
- effettuare analisi della soluzione arricchita da effettuare off line;
- necessità di dotarsi di un sistema di analisi della composizione gas (mGC) dedicato;
- redazione per ciascuna prova di un diario cronologico della sperimentazione e di una scheda di valutazione critica che riporta l'esito raggiunto e lo confronta con gli obiettivi definiti in sede di programmazione.

Parametro	Valore
Materiale colonna	vetro
Diametro interno della colonna	80 mm
Altezza riempimento	1000 mm
Tipo riempimento e materiale	Anelli Rashing in vetro
Diametro esterno e interno elemento	Informazione da inserire
Altezza elemento	Informazione da inserire
Portata nominale soluzione solvente	250 l/h
Portata nominale gas	0-40 Nm3/h
Range di miscelazione	0 – 100%
Disposizione TC	In basso e in alto solo lettura a vista
Misura della portata liquida in ingresso	Informazione da inserire
Composizione gas in uscita	mGC (CO2 e N2 in %vol)
Portata del gas in uscita	Informazione da inserire
Controllo della portata gas in ingresso	Informazione da inserire
Hold up liquido della colonna	litri
Parametro	Valore
Tempo medio per tipologia di prova	min
Tipo di prova	A saturazione/aperto/chiuso

Concentrazioni di CO2 da testare	Esempio: 5-15-25-35 %
Tipologia e concentrazione del solvente amminico	MEA, MDEA, MEA+PZ
Misure temperature fondo e testa colonna	Con TC

Tabella 2: Specifiche e parametri della sperimentazione

Si è altresì realizzato a supporto dello sviluppo dell'attività sperimentale una scheda di caratterizzazione del sistema riportata in tabella 2 e suggerita una matrice sperimentale delle attività

## 4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'obiettivo anche in quest'anno di attività è stato quello della messa a punto ed ottimizzazione degli impianti, dei processi e delle apparecchiature per la gassificazione del carbone nei persistenti impianti ENEA-Sotacarbo. Le attività condotte, sia di tipo teorico che sperimentale, sono state condotte negli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo e presso il C.R. Casaccia.

I risultati raggiunti riguardano le diverse sezioni di impianto e vanno nella direzione dell'ottimizzazione dei processi e del miglioramento dei componenti non solo dal punto di vista costruttivo ma anche operativo nella sua gestione in impianto. Attività future riguardano uno sviluppo ulteriore sulle diverse linee perseguendo l'acquisizione di conoscenze e competenze nel campo.