



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sperimentazione e ottimizzazione dei processi di gassificazione del carbone

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

SPERIMENTAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DEI PROCESSI DI GASSIFICAZIONE DEL CARBONE

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

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Tema: Paolo Deiana, ENEA

INDICE

1. Introduzione	4
2. Prove in piccola scala su mini impianto.....	5
2.1 Il mini gassificatore.....	5
2.2 Sistema di acquisizione e controllo.....	6
2.3 Linea di campionamento ed analitica syngas.....	7
2.4 Attività svolte.....	10
2.4.1 Modifiche al minigasificatore	10
2.4.2 Sperimentazione e risultati.....	12
3. Prove su impianto ENEA/SOTACARBO.....	17
3.1 La piattaforma pilota	18
3.2 Strumentazione e controllo	20
3.3 Sistema di analisi gas	21
3.4 Attività svolte.....	23
3.4.1 Sensore di livello.....	25
3.4.2 Griglia	26
3.5 Attività sperimentali.....	28
4. Conclusioni e sviluppi futuri.....	35
5. Bibliografia	36

1. INTRODUZIONE

Il presente Rapporto descrive le attività svolte nell'ambito del progetto di Ricerca di Sistema, dal titolo "Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂", svolte nell'ambito dell'Area PRODUZIONE E FONTI ENERGETICHE, gruppo tematico CARBONE PULITO, relativamente alla seconda annualità del tema: "5252 - Tecnologie innovative che consentano una riduzione dei costi di investimento delle centrali a polverino di carbone". Gli obiettivi e l'articolazione del progetto sono descritti nel documento "Piano Annuale di realizzazione 2007".

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 presso ENEA e presso la piattaforma pilota SOTACARBO si sono svolte le attività sperimentali sugli impianti di gassificazione con aria, 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

Le attività di sperimentazione si sono svolte presso il Centro di Ricerche ENEA di Casaccia, dove è ubicato il mini impianto gassificatore updraft 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. Completa la dotazione un sistema di analisi gas che effettua il monitoraggio in continuo del gas di sintesi

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.

2.1 Il mini gassificatore

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 alloggiato 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.

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.

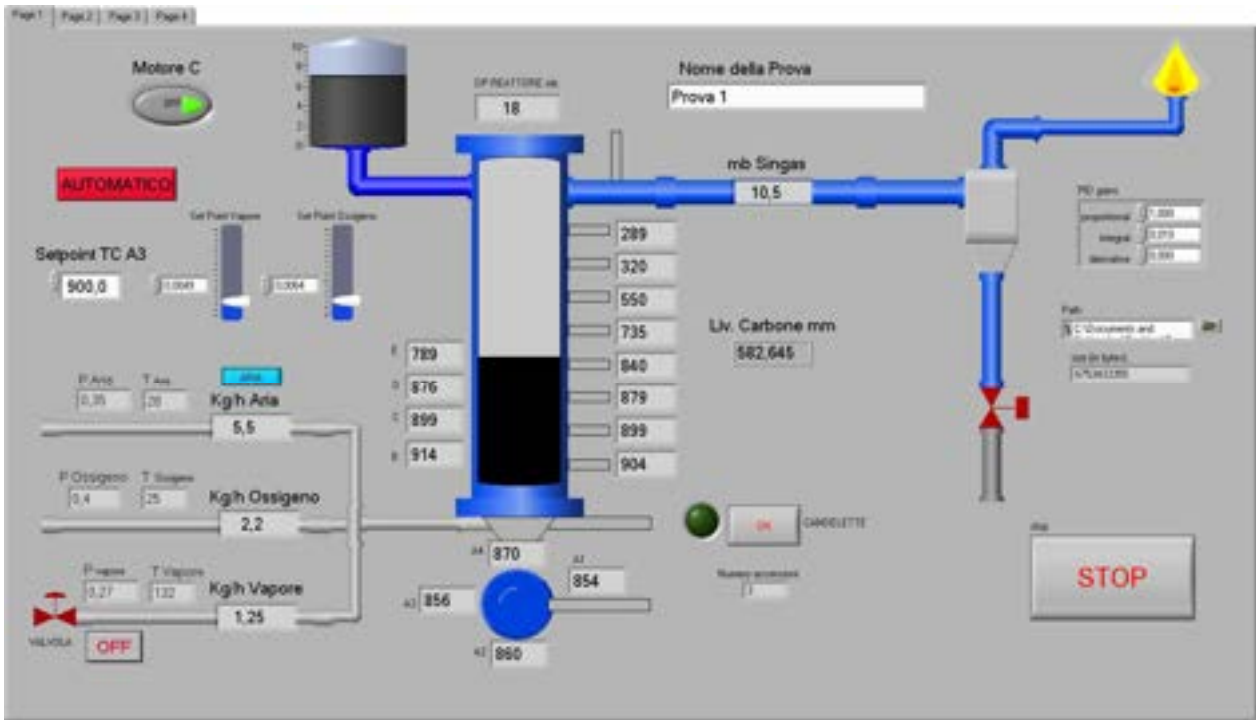


Fig. 2: Sinottico del sistema di acquisizione e controllo

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.

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 condensate 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 alloggiato 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. 3: Schema della linea di campionamento



Fig. 4: Gruppo frigo e sonda di prelievo riscaldata

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. 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.

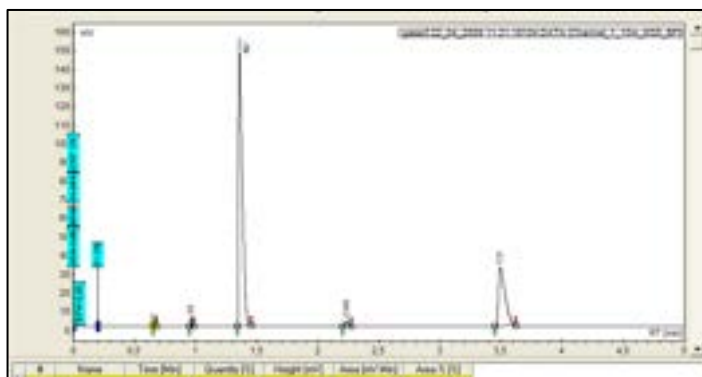


Fig. 5: Gas cromatografo ed esempio di un cromatogramma

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_2 , CO, CO_2 , CH_4 , H_2S , O_2) basandosi su differenti principi di misura a seconda del composto che si deve misurare (Figura 6)

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.



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

2.4 Attività svolte

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.

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.

In particolare si è andati a modificare il sistema di scarico ceneri e si è implementato l'impianto andando a progettare un sistema di abbattimento del tar e del particolato.

Tale attività di modifica si è realizzata con l'obiettivo di definire dal punto di vista progettuale un sistema in grado di purificare il syngas dai composti indesiderati, ma versatile e con la possibilità di testare più metodologie di abbattimento dall'assorbimento con mezzi liquidi all'adsorbimento su mezzi solidi.

2.4.1 Modifiche al mini gassificatore

L'attività in parola si è sviluppata, come sopra descritto, con la finalità di realizzare un apparecchiatura in grado di abbattere i composti indesiderati quali tar e particolato; a tale scopo la progettazione si è sviluppata in modo da potere effettuare più attività di ricerca, testando differenti metodologie di abbattimento, basate sia sull'utilizzo di medium liquidi sia sul'utilizzo di medium solidi quali ad esempio sorbenti di vario tipo.

L'apparecchiatura progettata, mostrata in Figura 7, è dotata di un sistema di diffusione del syngas, di ugelli orizzontali di distribuzione del liquido assorbente, di un piatto di sostegno di un eventuale sorbente, di un piatto di tenuta del letto solido. Sono stati inoltre inseriti dei manicotti destinati all'inserimento di strumentazione di supporto, quali termocoppie, destinata al controllo del suo funzionamento. L'inserimento all'interno del mini impianto è stato previsto a valle del gassificatore.

La progettazione, come detto, è stata realizzata in modo che il componente risulti versatile e si possa adattare allo sviluppo e all'implementazione di più attività di ricerca legate al clean-up del syngas.

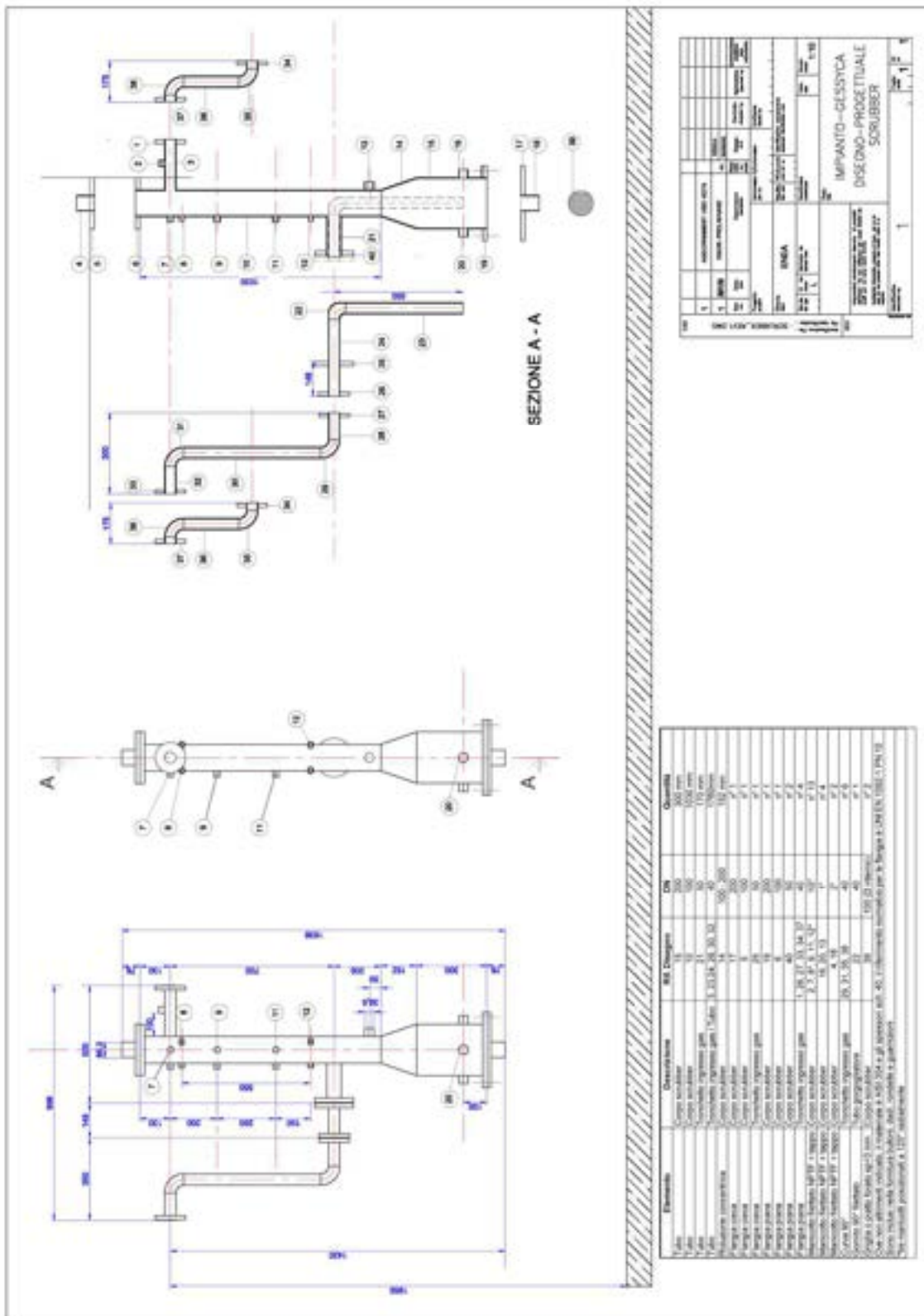


Fig. 7: Disegno progettuale dell'apparecchiatura di depurazione del syngas

2.4.2 Sperimentazione e risultati

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.

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

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

	% 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 e CO₂.

A titolo di esempio di seguito si riportano i risultati di due tra i test di gassificazione effettuati.

Per entrambi gli avviamenti del mini gassificatore, qui riportati, si è utilizzata l'analitica modulare come sistema di analisi dei gas.

La conduzione della prova condotta nel mese di Maggio del 2010 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; di gassificazione con agenti gassificanti aria/vapore, e successivamente con vapore/O₂ e infine con CO₂/O₂.

Per ciascuna di queste fasi si è mantenuto stabile il regime di gassificazione, mantenendo quasi costanti i parametri di gassificazione, con produzione di syngas di buona qualità energetica, che ha determinato un comportamento quasi stazionario con una fiamma stabile nel bruciatore.

In figura 8 è riportato l'andamento temporale della composizione del syngas nei suoi principali componenti, nelle differenti fasi della prova sperimentale.

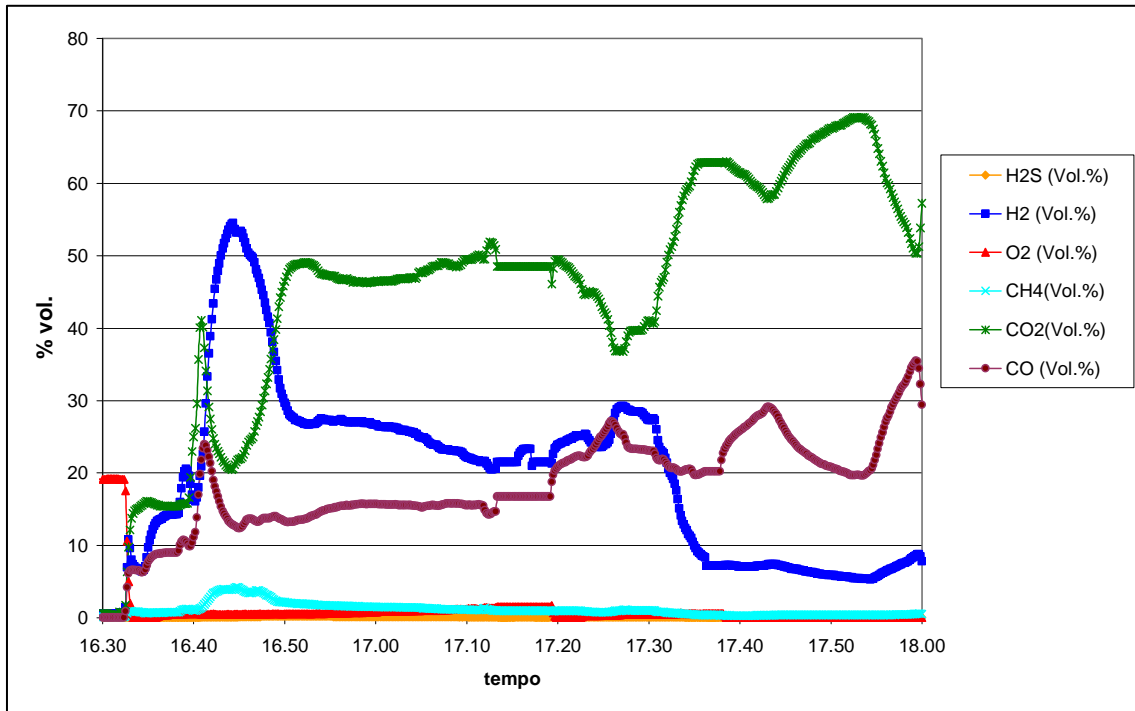


Fig. 8: Andamento della composizione del syngas durante un test

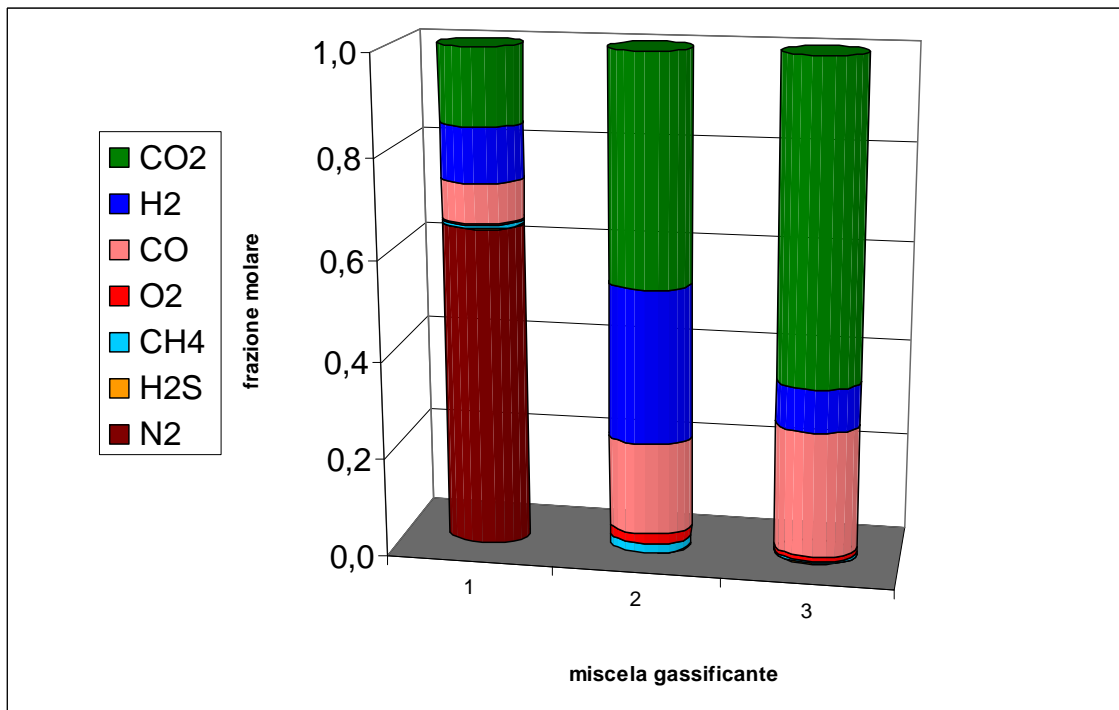


Fig. 9: Composizione media del syngas nelle tre differenti fasi di esercizio

Analizzando l'andamento nel tempo della composizione del syngas prodotto si evidenzia che: durante la fase di esercizio con alimentazione ossigeno/vapore si ha un incremento del tenore di

idrogeno e di CO₂, determinato in parte dall'assenza dell'azoto che diluisce la miscela nella sua composizione in volume. Nella fase di alimentazione con la miscela gassificante di CO₂/ossigeno aumenta il quantitativo di CO prodotto a causa dello sviluppo della reazione di Boudouard. Questa reazione, infatti a causa della sua endotermicità assorbe calore per sostenersi, di conseguenza in questa fase si osserva un'attenuazione dei picchi di temperatura con una diminuzione dei valori massimi ed una redistribuzione delle temperature lungo il letto del reattore.

Un confronto tra le composizioni medie in volume delle miscele di syngas ottenute nelle tre differenti condizioni di esercizio è riportata nel grafico in figura 9. Da tale grafico risulta evidente quanto sopra descritto.

Agenti gassificanti	aria/vapore	ossigeno/vapore	CO ₂ /O ₂
portata media aria kg/h	2,43	-	-
portata media vapore kg/h	1,65	1,31	3,03
portata media ossigeno kg/h	-	0,45	0,54
portata media CO ₂ kg/h	-	-	1,70
H ₂ S	0,05	0,14	0,05
H ₂	10,98	31,26	9,24
O ₂	0,18	2,04	1,04
CH ₄	0,74	1,81	0,50
CO ₂	15,44	46,09	68,40
CO	7,97	18,66	27,10
N ₂	64,65	0	0

Tab.2 : Valori medi dei principali parametri di esercizio della prova sperimentale del mese di Maggio

La figura 10 riporta il potere calorifero inferiore (PCI) del syngas nelle tre condizioni di esercizio. I valori ottenuti sono di media simili a quelli ottenuti negli altri test sperimentali effettuati nell'anno in corso, ed evidenziano una stabilità di esercizio con dei momenti di fluttuazione nei valori del PCI.

Infine in figura 11 è riportata la composizione in volume del syngas nel tempo ottenuta durante un avviamento del mini gassificatore effettuato nel mese di Luglio 2010.

La conduzione della prova ha visto succedersi le seguenti fasi: accensione e avviamento con aria, gassificazione mediante l'adduzione di aria/vapore, gassificazione con ossigeno/vapore, spegnimento.

Dopo un iniziale fase di transitorio si è pervenuti, nell'esercizio in gassificazione con ossigeno/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 11, dove la composizione del syngas prodotto nei suoi principali componenti rimane costante nel tempo.

Anche dal grafico del potere calorifico nel tempo risulta evidente la qualità del syngas e la stabilità dell'esercizio.

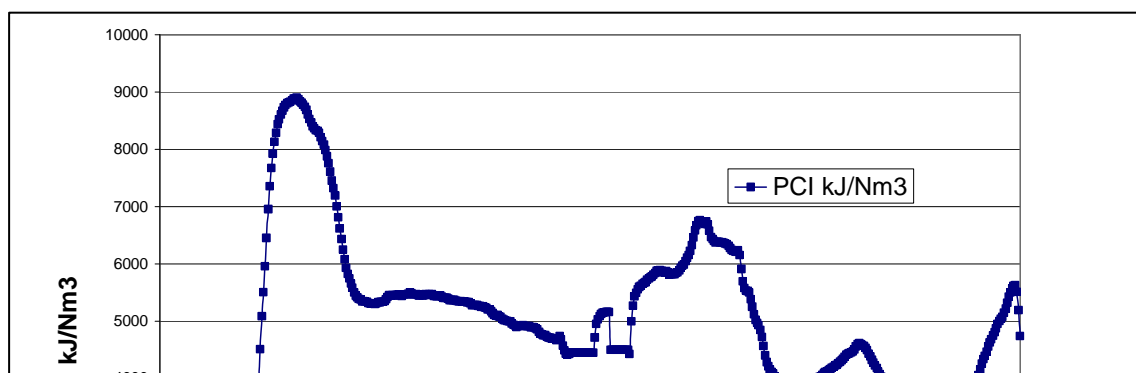


Fig. 10: Andamento della potere calorifico inferiore del syngas durante un test sperimentale

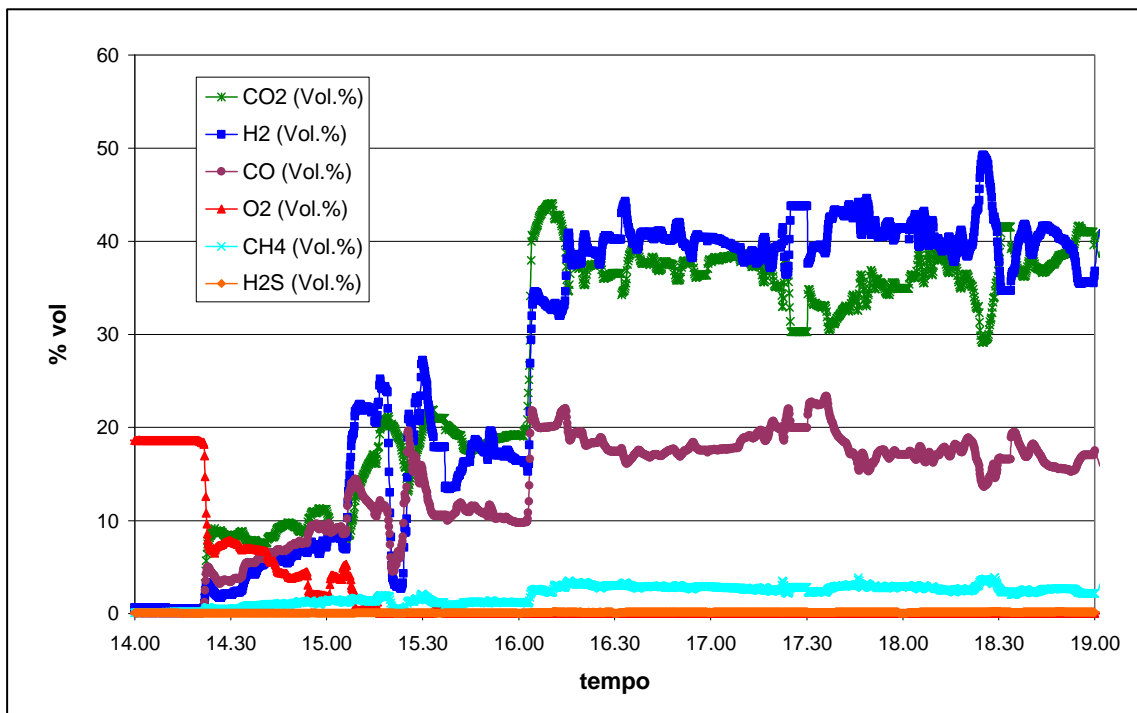


Fig. 11: Andamento della composizione del syngas durante un test sperimentale

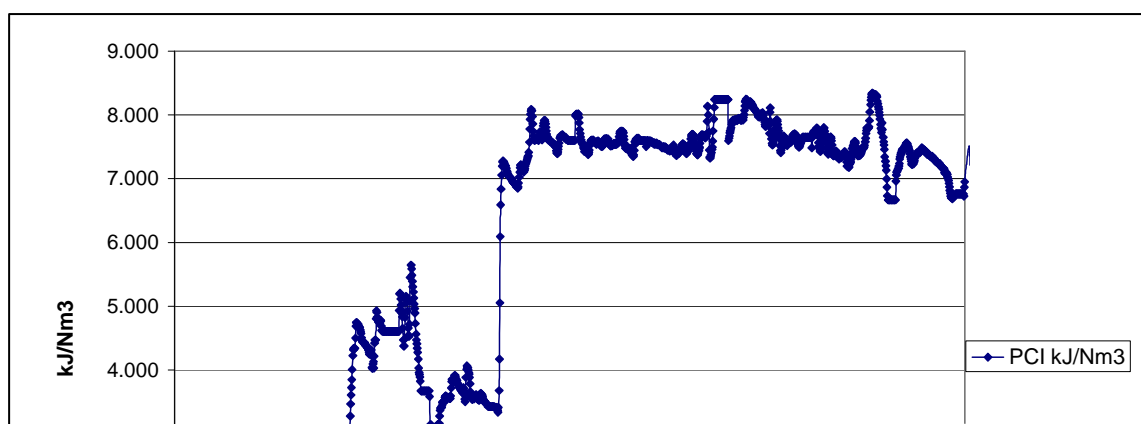


Fig. 12: Andamento del potere calorifico inferiore del syngas durante un test sperimentale



Fig. 13: Controllo del processo durante un test sperimentale e modifiche all'impianto

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 CO₂, 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 il funzionamento di un nuovo sensore di livello basato sul principio delle microonde guidate in barra metallica nelle condizioni di 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.

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 la 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 a letto fisso up-draft con 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.

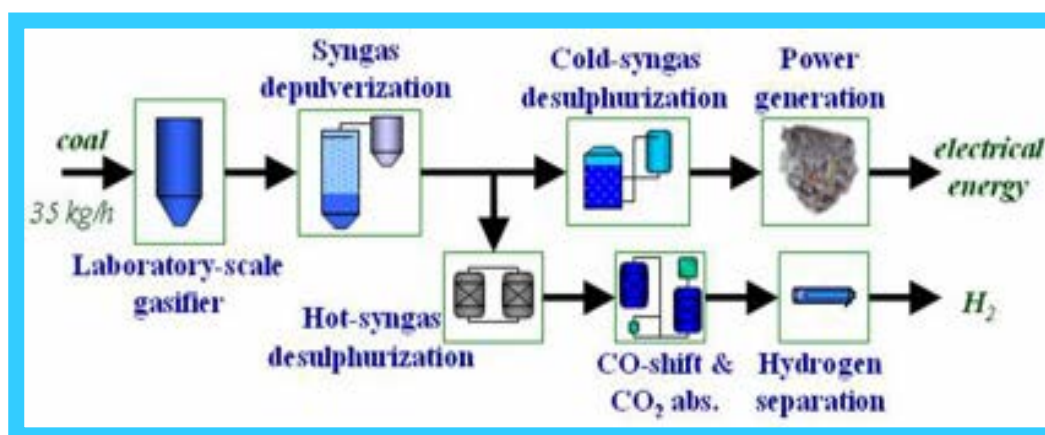


Figura 2 - Schema di flusso semplificato dell'impianto pilota.

In particolare, con riferimento alla figura soprastante, nel treno di gassificazione da 35 kg/h 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 e 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 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.

Alternativamente una porzione del syngas prodotto, pari a circa 20-25 Nm³/h, può essere inviata 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 CO₂, 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, 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 da precedenti campagne sperimentali effettuate sull'impianto.

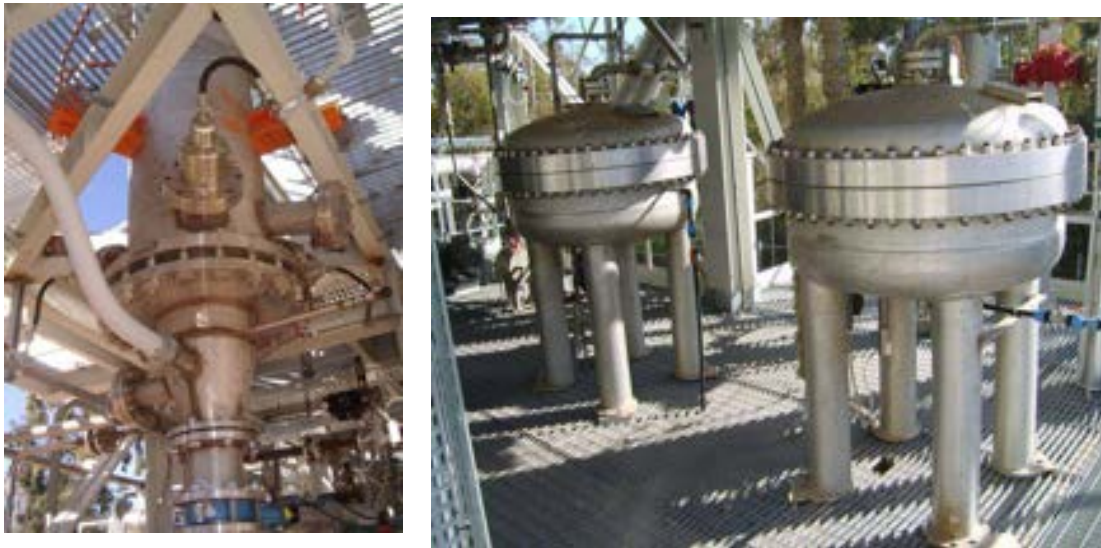


Fig. 14: Parte inferiore del gassificatore pilota e dettaglio dei reattori a bolle.

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 lo scale-up degli impianti.

Il gassificatore pilota della piattaforma Sotacarbo è un letto fisso up-draft di tecnologia Wellman-Galusha 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 circa 300 mm e un'altezza complessiva pari a circa 2 metri, con un'altezza massima del letto di combustibile pari a circa 1300 mm, per un totale di circa 90 litri. A differenza delle configurazioni convenzionali Wellman-Galusha, il gassificatore ha le pareti interne rivestite in materiale refrattario, non è quindi dotato né della camicia di raffreddamento né dell'agitatore interno, difficilmente realizzabili in un reattore di piccole dimensioni.

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 disposta, in prossimità dell'asse e dotata di 11 sensori distribuiti lungo tutta l'altezza del reattore.

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 m³, viene sollevato mediante un paranco fino al livello della tramoggia di caricamento e immesso nella stessa. Mediante una rotocella e una valvola a ghigliottina 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. Vengono 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.

3.2 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.

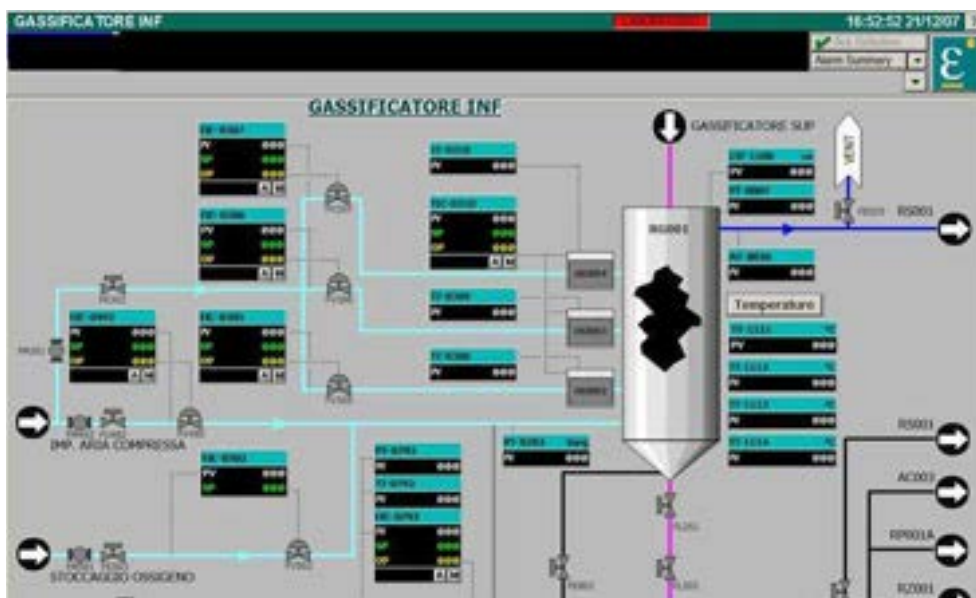


Fig. 15: Esempio di sinottico del sistema di acquisizione e controllo del gassificatore

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

La descrizione delle logiche è 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 è effettuato mediante sinottici su supervisore. È possibile muoversi da un sinottico all'altro sia tramite mouse sia tramite tasti dedicati, verificare lo stato delle utenze in base al colore relativo agli stati di 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

3.3 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: CO₂, H₂, CO, CH₄, N₂, COS, H₂S.

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. 16: Laboratorio mobile di analisi gas ENEC e carrello di prelievo e analisi gascromatografica

3.4 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 dettaglio delle prove eseguite presso gli impianti Enea/Sotacarbo è fornito nella seguente tabella.

17/12/2009	Prima verifica funzionamento impianti
24/02/2010	Procedure di start-up e shut-down
01/03/2010	Procedure di start-up e shut-down
04/03/2010	Ottimizzazione gassificazione
15/03/2010	Ottimizzazione gassificazione
18/03/2010	Ottimizzazione gassificazione e desolforazione
25/03/2010	Gassificazione e produzione idrogeno
29/03/2010	Ottimizzazione gassificazione e desolforazione
01/04/2010	Gassificazione e desolforazione con ammine
06/05/2010	Gassificazione con CO ₂ e O ₂
12/05/2010	Gassificazione con CO ₂ e O ₂
18/05/2010	Gassificazione e assorbimento CO ₂ su II desolforazione
27/05/2010	Gassificazione e assorbimento CO ₂ su II desolforazione
09/06/2010	Gassificazione e desolforazione con MDEA 3M
17/06/2010	Gassificazione e desolforazione con ammine
24/06/2010	Gassificazione, sep. CO ₂ (MEA 5M), e prod. H ₂
01/07/2010	Gassificazione, sep. CO ₂ (MEA 5M), e prod. H ₂
07/07/2010	Gassificazione, sep. CO ₂ (MEA 3M), e prod. H ₂
15/07/2010	Gassificazione, sep. CO ₂ (MEA 3M), e prod. H ₂
20/07/2010	Gassificazione, sep. CO ₂ (MEA 5M), e prod. H ₂
26/07/2010	Gassificazione, sep. CO ₂ (MEA 5M), e prod. H ₂
29/07/2010	Test preliminare co-gassificazione biomasse (10% wt)
08/09/2010	Test preliminare co-gassificazione biomasse (20% wt)
14/09/2010	Gassificazione e assorbimento CO ₂ su II desolforazione
16/09/2010	Gassificazione con aria arricchita in O ₂
23/09/2010	Verifica funzionamento elettrofiltro

Tab. 17: Dettaglio delle attività svolte nell'arco temporale del progetto

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.

A tale scopo per monitorare l'altezza del letto in continuo si è alloggiato all'interno del gassificatore un sensore di livello, 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.

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 alloggiato 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.

Una seconda attività ha riguardato il monitoraggio delle temperature della griglia durante il funzionamento del gassificatore. Sono state inserite delle termocoppie sulla parte fissa della griglia di scarico ceneri al fine di avere 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. 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.

3.4.1 Sensore di livello

Il sensore di livello a microonde guidate è un sensore che permette la misura in continuo del livello sia per i liquidi che per i solidi. Il principio attraverso cui viene effettuata la misura si basa su l'emanazione lungo una sonda, realizzata con un opportuno materiale di conduzione, di impulsi a microonde ad alta frequenza, guidati da una fune o una barra inserita nel materiale di cui si vuole rilevare il livello.

Gli impulsi nel loro percorso saranno riflessi dalla superficie del prodotto e rilevati dall'elettronica di elaborazione, che interpreta il segnale d'eco e lo converte in una informazione di livello, previa opportuna taratura, visualizzabile da un monitor posizionato sulla testa dello strumento.



Fig. 17: Vista di dettaglio del misuratore di livello carbone.

Il vantaggio di tale strumentazione è che i tipici problemi riscontrabili nel misurare il livello di letti solidi, quali per esempio intense formazioni di polvere, forti rumori o presenza di condensa non compromettono la sicurezza di funzionamento e la precisione di misura. Inoltre formazioni coniche di materiale o le caratteristiche del prodotto, per esempio alternanza di materiale asciutto o umido, non compromettono il risultato di misura.

Un ulteriore vantaggio è la possibilità di utilizzare tale strumentazione in letti di solidi ad alte temperature, che ne permette il suo utilizzo nei reattori di gassificazione

3.4.2 Griglia

La griglia di supporto del letto di cui era inizialmente dotato il gassificatore non consentiva lo scarico delle ceneri a causa di una insufficiente spaziatura tra gli elementi fissi e mobili. Per ovviare a tale problema, nel corso del progetto di ricerca oggetto del presente documento è stato progettato un nuovo sistema di scarico e sono state apportate con successo, come è risultato dai test sperimentali, delle modifiche alla griglia esistente le modifiche individuate.

In seguito alle valutazioni effettuate durante le precedenti prove di gassificazione sono state eseguite alcune modifiche alla griglia necessarie per migliorare il sistema di scarico delle ceneri. Tali modifiche sono state eseguite tenendo conto di una dimensione massima di passaggio pari a 30 mm, scelta in base alla granulometria del materiale scaricato nelle precedenti gassificazioni. Per poter avere la dimensione di passaggio sopra indicata è stato necessario diminuire il numero dei quadrotti sia della parte mobile che della parte fissa. Per poter garantire la chiusura e apertura della griglia è stato necessario saldare dei piattini in AISI 304 ai quadrotti della parte mobile della stessa. Scelta obbligata poiché è il medesimo materiale con cui sono state realizzate tutte le altre parti della griglia. Inoltre per l'automazione dell'apertura e della chiusura del sistema di scarico ceneri si è dato corso all'installazione di un pistone pneumatico con possibilità di remotizzare il comando da sala controllo.

Per modificare la parte mobile della griglia si è ridotto da 11 a 5 il numero dei quadrotti mobili. Si è così ottenuto un opportuno spazio libero tra gli elementi rimanenti. Sono stati poi predisposti dei piattini sui quadrotti mobili rimanenti per poter effettuare la chiusura della griglia ed attuare una regolazione per l'apertura. Sono stati collocati sulla faccia superiore e inferiore in configurazione a S, tali da formare delle "alette" sfalsate rispetto all'asse del quadrotto. Questa modifica permette la completa apertura o chiusura della griglia. Effettuando una rotazione della parte mobile che posizioni parallelamente le alette adiacenti si ottiene una completa chiusura della griglia.



Fig. 18: Vista di dettaglio della griglia in posizione aperta e chiusa.

Viceversa con una rotazione che posiziona le alette adiacenti in modo speculare come riportato, si ha la completa apertura. La disposizione a S delle alette permette, durante la fase di apertura, all'aletta che si muove verso il basso di creare uno spazio vuoto, dove agisce l'aletta che si muove verso l'alto agevolando notevolmente lo scarico del materiale. È stato modificato anche il pantografo che trasmette il movimento ai quadrotti mobili che dimensionato fuori misura non permetteva la completa rotazione del cono sottostante del gassificatore.

La posizione della griglia fissa è stata ridefinita per evitare eventuali interferenze tra le parti fissa e mobile. Tutti i dieci quadrotti fissi sono stati posizionati su una corona dell'altezza di 25 mm, al di

sopra delle alette della parte mobile in condizioni di massima apertura. Questa soluzione facilita lo scarico ed evita che il peso del carico superiore gravi sullo spigolo dell'aletta.

Con l'obiettivo di monitorare le temperature della griglia durante il funzionamento del gassificatore, sono state inserite delle termocoppie di tipo K sulla parte fissa della griglia di scarico ceneri, al fine di ottenere 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. 19: Operazioni di modifica della griglia e Datalogger 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.

3.5 Attività sperimentali

L'obiettivo finale delle attività sperimentali, condotte presso la piattaforma pilota, è stato 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

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. Per installare lo strumento in impianto si sono rese necessarie alcune modifiche effettuate sullo strumento e sull'interfaccia lato impianto. Una prima attività di test ha visto la taratura a freddo dello strumento in aria seguita poi dalla verifica in impianto con il sensore posizionato nel suo alloggiamento definitivo. La taratura di risconto è stata effettuata caricando e scaricando quantità note di argilla espansa. A valle di ciò sono stati effettuati due test preliminari a caldo durante le prove di avviamento dell'impianto. Una prima analisi dei dati, effettuata dai tecnici ENEA, risulta essere incoraggiante per il proseguo dell'attività, infatti il comportamento del sensore si è rivelato essere in linea con quanto atteso, abbisogna però di ulteriori verifiche incrociate con i dati di temperatura e pressione rilevati lungo il letto di gassificazione prima di poter essere utilizzato per il controllo di processo.

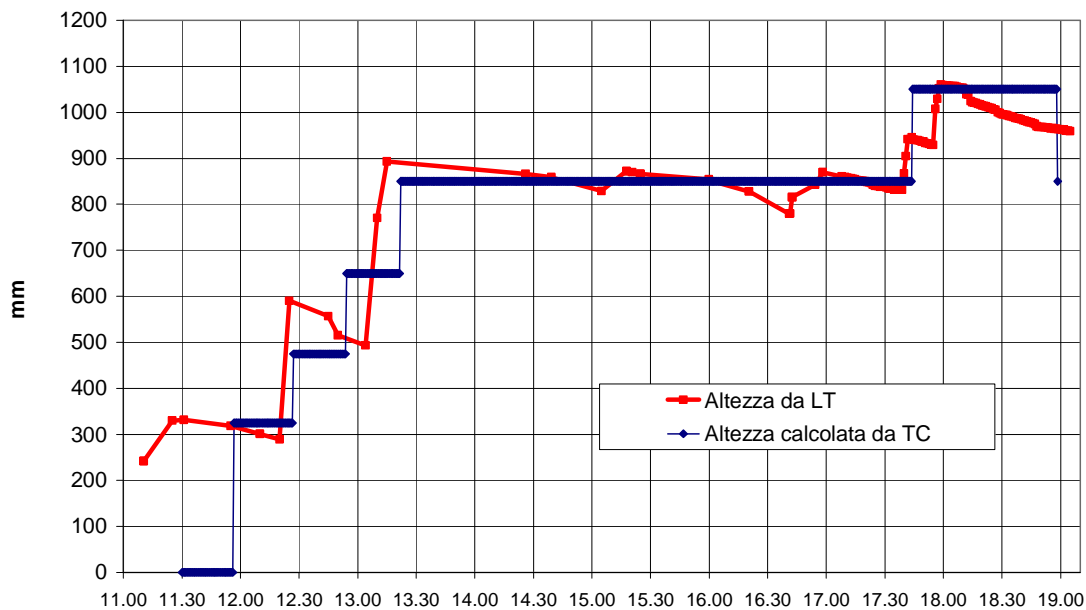


Fig. 20.: Altezza del letto durante la prova sperimentale del 01/03/2010

Le figure sottostanti riportano l'altezza del letto durante l'esercizio in alcuni dei vari avviamenti effettuati. Il segnale del sensore di livello è riportato insieme all'informazione proveniente dalle termocoppie della multipla alloggiata lungo l'altezza del letto del reattore. Per elaborare l'informazione della temperatura ed associarla all'informazione dell'altezza si è proceduto a definire un parametro di vincolo relativo al salto termico tra il letto solido ed il gas. Fissando quindi un criterio legato al delta di temperatura, si è andato ad individuare nel tempo come variava

l'altezza del letto, associando tale valore al valore medio in altezza tra le due termocoppie per cui veniva soddisfatto tale criterio.

Dai grafici si può evidenziare come l'informazione sull'altezza proveniente dalla correlazione con le temperature subisce un ritardo nel tempo rispetto all'informazione proveniente dal sensore di livello a causa dell'inerzia termica del letto e della lentezza del processo stesso di gassificazione.

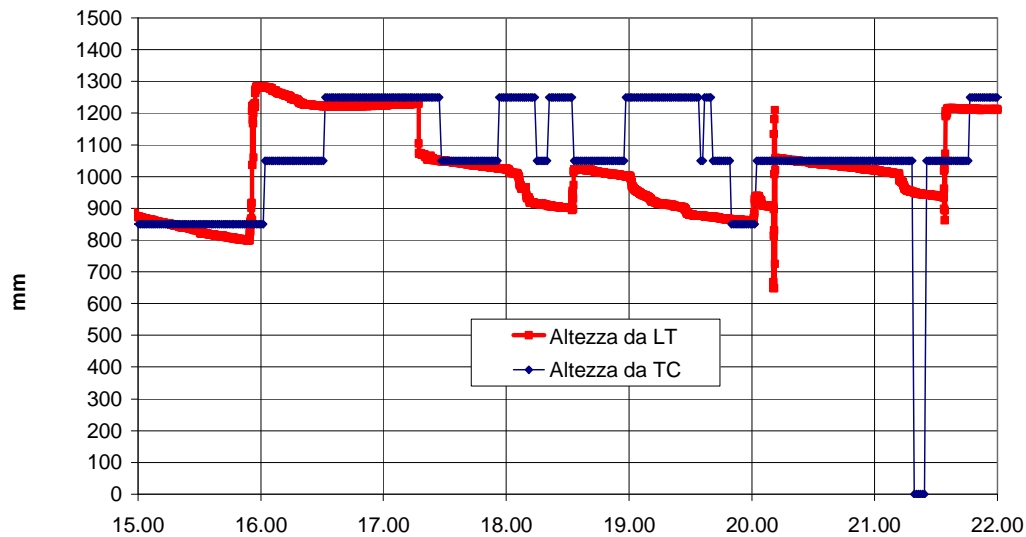


Fig. 21: Altezza del letto durante la prova sperimentale del 25/03/2010

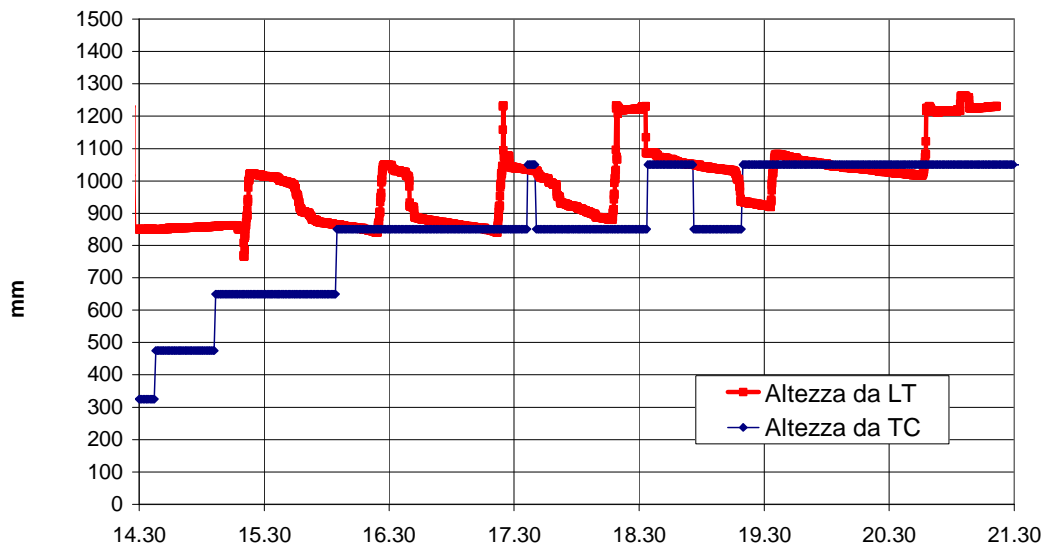


Fig. 22: Altezza del letto durante la prova sperimentale del 29/03/2010

Si nota come durante gli avviamenti, riportati nelle figure precedenti, si sono effettuate più fasi di carico e scarico del reattore, queste fasi sono state monitorate in tempo reale dal segnale del sensore di livello fornendo informazioni utili al loro corretto sviluppo in modo da mantenere una stabilità nell'altezza del letto al fine di assicurare il funzionamento in continuo e stazionario

Per quanto riguarda l'attività inerente il monitoraggio delle temperature della griglia durante il funzionamento del gassificatore si riporta a titolo di esempio l'andamento delle temperature durante l'esercizio del gassificatore in due avviamenti: il primo relativo al mese di Marzo con cinque termocoppie alloggiare sulla griglia, il secondo relativo al mese di Maggio con un numero maggiore di termocoppie posizionate sulla griglia.

Inizialmente erano state alloggiare sulla griglia cinque termocoppie posizionate secondo lo schema riportato in figura 22, in seguito la fine di aver un maggiore controllo sul rischio di sovratemperature si è aumentato il numero di termocoppie portandolo a sette.



Fig. 23: Posizionamento delle cinque termocoppie alloggiare sulla griglia

Nel grafico in figura seguente si riporta l'andamento delle temperature delle cinque termocoppie nel tempo, insieme al valore della temperatura del letto di combustione registrata dalla termocoppia TT-1114, la più bassa posizionate sulla multipla nella zona inferiore del gassificatore.

Come risulta dal grafico i picchi di temperatura si sono avuti durante le fasi di scarico del reattore. Dall'analisi dei dati di temperatura emerge chiaramente che si è riusciti a condurre la prova senza superare valori di temperatura di 700°C, lavorando quindi in condizioni di assoluta sicurezza, anche durante le fasi di scarico del letto. Ne segue che nonostante il letto di combustione abbia raggiunto valori di temperature intorno ai 1000°C durante quasi tutto l'esercizio del gassificatore, la griglia si è mantenuta costantemente al di sotto dei 700 °C. Relativamente alla mappatura spaziale delle temperature e dei materiali solidi in fase di scarico e di esercizio, nel caso particolare del test sperimentale analizzato, si nota che le parte più calde si sono localizzate nella zona della griglia diametralmente opposta all'ingresso degli agenti gassificanti.

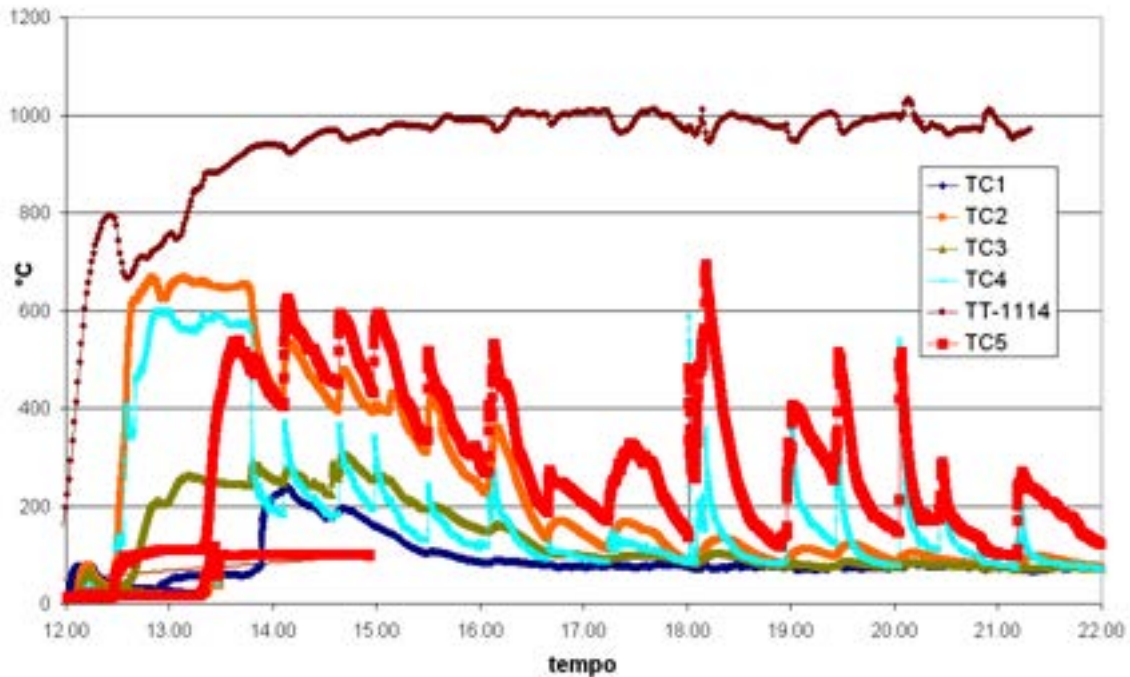


Fig. 24: Andamento nel tempo delle termocoppie alloggiate sulla griglia, avviamento del 25/03/2010

Al fine di avere un maggiore controllo della distribuzione spaziale delle temperature sulla griglia si è aumentato il numero di termocoppie da cinque a sette (figura 23). Come si può notare dalla figura si evidenziano le modifiche apportate alla griglia descritte in precedenza.



Fig. 25: Posizionamento delle sette termocoppie alloggiate sulla griglia

Anche in questo caso si riporta nella figura sottostante l'andamento nel tempo delle temperature delle sette termocoppie, associato all'informazione della TT-1114, la termocoppia posizionata sulla multipla all'altezza del letto di combustione. Il test sperimentale ha visto succedersi più fasi di carico e scarico del letto, indicate nel grafico dai picchi di temperatura; tali operazioni si sono svolte

in condizioni di sicurezza con valori massimi non più alti di 900°C ma sempre al disotto della temperatura del letto di combustione.

Si può inoltre constatare sulla base della distribuzione spaziale delle temperature, che per l'avviamento analizzato, il letto di reazione presentava dei punti più caldi nelle zone diametralmente opposte all'ingresso dei reagenti.

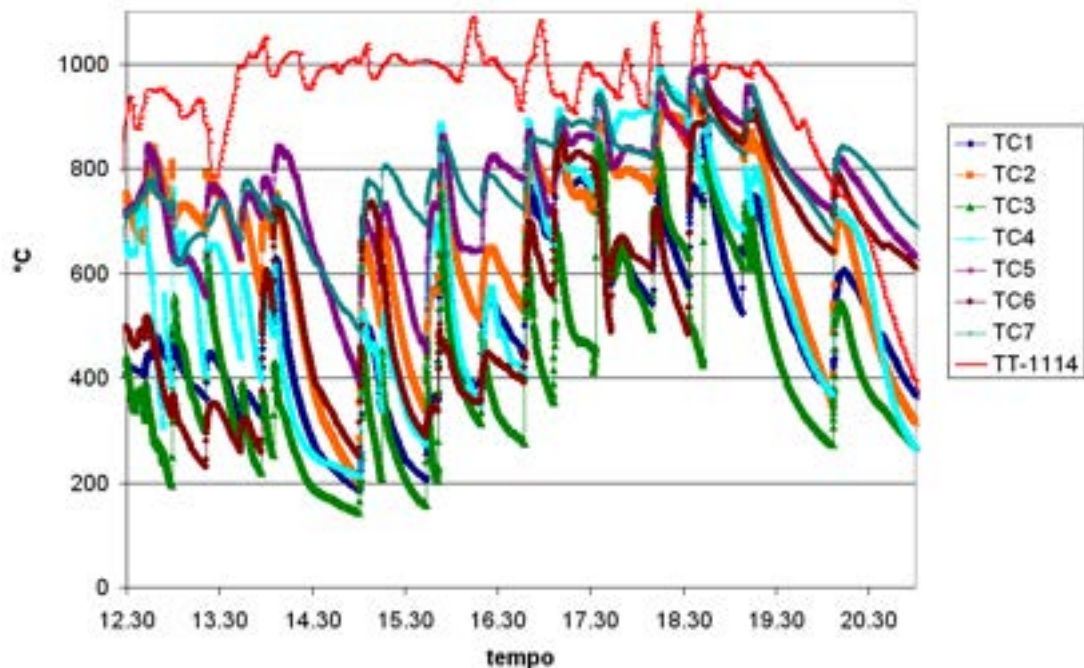


Fig. 26: Andamento nel tempo delle termocoppie alloggiate sulla griglia, avviamento del 18/05/2010

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, nel corso delle prove sperimentali si è cercato di ottimizzare le procedure di avviamento e spegnimento dell'impianto.

In particolare, relativamente alla procedura di avviamento, si è cercato di determinare il riempimento iniziale ottimale del reattore al fine di ridurre le perturbazioni relative al primo caricamento senza aumentare eccessivamente le perdite di carico. A tale scopo è stato testato l'avviamento con differenti riempimenti del reattore fino a individuare il giusto compromesso tra stabilità dei profili termici e perdite di carico con un riempimento.

A seguito delle modifiche e migliorie operate e grazie alle indicazioni scaturite sulla modifica della conduzione del processo si è passati da una politica di esercizio dall'impianto senza scarico delle ceneri, praticamente operando in batch, all'esercizio in continuo, con i caricamenti di combustibile e lo scarico delle ceneri distribuiti nel tempo a seconda delle esigenze di sperimentazione.

In particolare su indicazione di ENEA è stata modificata la modalità di conduzione dell'impianto durante l'esercizio annullando totalmente l'adduzione di aria in sede lampade a valle dell'accensione.

La procedura seguita prima delle modifiche prevedeva durante la gassificazione l'alimentazione di aria anche nella sede lampade compromette in maniera sostanziale il buon funzionamento del reattore di gassificazione. Questo conduceva a forti disomogeneità nell'alimentazione degli agenti gasificanti causate sia in senso radiale, dal flusso attraverso le lampade che era concentrato in tre punti a 120° sulla superficie laterale del gassificatore, che in senso verticale in quanto il piano lampade si trovava a 30 cm al di sopra della griglia piano di ingresso del flusso vapore-aria sottogriglia. Tali disomogeneità determinavano diversi fenomeni quali per esempio:

- l'eccessiva saturazione/condensazione di vapore nello strato inferiore del letto (zona sotto lampade) che riduce fortemente la reattività del carbone risultando in un maggior contenuto di incombusti nelle ceneri;
- l'instaurarsi di tre camini preferenziali, situati in prossimità dell'iniezione aria lampade, che causano un'impropria distribuzione delle temperature del letto che inficia il corretto procedere del processo.



Fig. 27: Visione dal basso dell'interno del gassificatore con dettaglio delle sonde di misura di livello e temperatura

A tal riguardo come mostrato nella figura precedente si fa notare la formazione di tre zone di scia caratterizzate dalla presenza di ceneri proprio in sommità ai tre ingressi aria lampade, indice della formazione dei tre camini preferenziali che impediscono il corretto funzionamento del letto di gassificazione.

Una prima serie di indicazioni proposte da ENEA nella direzione della soluzione delle criticità evidenziate ha portato ad annullare totalmente l'adduzione di aria in sede lampade a valle dell'accensione. Tale azione non ha determinato il danneggiamento delle lampade di accensione che comunque andrebbero considerate come materiale di consumo data anche l'esiguità del costo.

Altre modifiche proposte da ENEA e poi attuate sono quelle relative alla modifica della griglia con la rotazione a 90° della parte statorica e l'aggiunta di elementi a rostro solidali con la griglia mobile in modo da avere un'azione di rimestaggio e rottura dei conglomerati che ostacolano le operazioni di scarico.



Fig. 28: Dettaglio della griglia modificata con l'inserzione dei rostri mobili

Ulteriori indicazioni sono andate nella direzione di effettuare gli avviamenti con il reattore a carica parziale, completando solo successivamente la carica del reattore pervenendo alla fase di gassificazione, e in quella di migliorare le coibentazioni delle linee e della parte inferiore del gassificatore pensando anche all'opzione di "tracciare elettricamente" le superfici in modo da mantenere le temperature ben sopra quelle di condensazione del vapore utile anche per preriscaldare altri tipi di agenti gassificanti.

Relativamente allo spegnimento, la procedura utilizzata nelle campagne sperimentali precedenti prevedeva l'invio di solo vapore fino al raggiungimento di una temperatura massima del letto pari a 250-300 °C. Tale procedura comportava numerosi problemi legati sia all'impaccamento del letto dovuto alla condensazione del vapore nella parte inferiore dello stesso, sia al rischio di un non completo spegnimento, e di una conseguente risalita delle temperature nelle ore successive. A tale scopo è stata modificata la procedura di spegnimento operando lo svuotamento del reattore mediante successivi scarichi attraverso la griglia tenendo la temperatura della parte più bassa del letto fino all'interruzione dell'invio dell'aria.

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Nell'ambito delle attività inerenti la sperimentazione sul campo e l'ottimizzazione degli impianti e sistemi di gassificazione del carbone si sono svolte presso il C.R. Enea della Casaccia, su piccola scala, e presso la piattaforma pilota SOTACARBO, su scala maggiore, delle 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.

Oltre ad attività di natura sperimentale sono state effettuate diverse modifiche alla componentistica degli impianti preesistenti 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.

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. Attraverso l'attività di sperimentazione si è, quindi, 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.

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 ENEA/SOTACARBO 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.

A tale scopo per monitorare l'altezza del letto in continuo si è alloggiato all'interno del gassificatore un sensore di livello, 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.

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 alloggiato 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.

Una seconda attività ha riguardato il monitoraggio delle temperature della griglia durante il funzionamento del gassificatore. Sono state inserite delle termocoppie sulla parte fissa della griglia di scarico ceneri al fine di avere 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. 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.

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.

5. BIBLIOGRAFIA

Deiana, Assettati, Bassano, Ricci, Subrizi, Analisi sperimentali sulla gassificazione del carbone, Report RSE/2009/202, Report Ricerca Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, 2009.

C. Bassano, P. Deiana, A. Assettati, M. Subrizi, Primi risultati dell'analisi sperimentale del processo di gassificazione del carbone in un impianto di piccola scala, 65° Congresso Nazionale ATI