



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Attività sulla gassificazione del carbone

P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi

ATTIVITÀ SULLA GASSIFICAZIONE DEL CARBONE

P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO₂

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA

Alle attività descritte nel rapporto hanno partecipato attivamente i colleghi:

A. Assettati, A. Grasso, A. Dedola, G. Guidarelli (ENEA)

Indice

Sommario.....	4
<i>Introduzione</i>	<i>5</i>
2. Prove in piccola scala su mini impianto	6
2.1 <i>Prove in piccola scala su mini impianto.....</i>	<i>7</i>
2.2 <i>Sistema di acquisizione e controllo.....</i>	<i>8</i>
2.3 <i>Linea di campionamento ed analitica syngas</i>	<i>9</i>
2.4 <i>Attività svolte</i>	<i>10</i>
2.4.1 <i>Sperimentazione e risultati</i>	<i>11</i>
2.4.2 <i>Progettazione.....</i>	<i>15</i>
2.4.3 <i>Nuovo GESSICA (GEnereatore Sperimentale di Singas da CARbone).....</i>	<i>15</i>
3. Prove su impianto ENEA/SOTACARBO	17
3.1 <i>La piattaforma pilota</i>	<i>18</i>
3.2 <i>Strumentazione e controllo</i>	<i>20</i>
3.3 <i>Sistema di analisi gas</i>	<i>21</i>
3.4 <i>Attività svolte</i>	<i>22</i>
3.4.1 <i>Sensore di livello</i>	<i>23</i>
3.4.2 <i>Monitoraggio delle temperature interne al gassificatore</i>	<i>25</i>
3.4.3 <i>Esempio di una procedura di prova</i>	<i>29</i>
4. Conclusioni.....	33
5. Riferimenti bibliografici	33

Sommario

Si è dato proseguo alle attività di sperimentazione, svolte presso il Centro di Ricerche ENEA di Casaccia, dove è ubicato il mini impianto gassificatore updraft 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 con l'ausilio di 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. 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.

Ha avuto corso un attività di progettazione e realizzazione di un nuovo impianto GEratore Sperimentale di SYngas da CARbone in grado di esercire e monitorare il processo di gassificazione, la depurazione del syngas e il suo smaltimento in torcia. 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.

Sono proseguite le attività di coordinamento e collaborazione alla sperimentazione presso gli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo. In particolare si è dato corso ad un'attività di monitoraggio del processo di gassificazione. Infatti al fine di avere una migliorata mappatura termica del processo in svolgimento all'interno del gassificatore si è proceduto con l'installazione di una serie di punti di misura basati su termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica.

Tra i primi risultati si è riscontrata una dinamica più rapida per il sistema con le termocoppie in parete, inoltre è degno di nota il fatto che i profili termici ricavati danno un'informazione anche in senso radiale, in caso di avarie si ha una maggior ridondanza dei dati sui diversi piani ed anche la sostituzione di un singolo sensore è possibile senza operazioni troppo dispendiose o che comportino la fermata dell'impianto.

L'obiettivo è quello di poter efficacemente monitorare il processo ed effettuare con cognizioni di causa le operazioni di carico del carbone, di scarico delle ceneri, di modulazione dei reagenti gassosi e di movimentazione dello stirrer omogeneizzatore in modo da pervenire ad un funzionamento stabile ed efficiente in linea con le richieste di gas necessarie all'utenza finale (produzione elettrica o di idrogeno/syngas).

Introduzione

Il presente Rapporto descrive le attività svolte nell'ambito del progetto di Ricerca di Sistema, Piano Annuale di realizzazione 2011 progetto 2.2 linea di attività A1 ovvero "Produzione e trattamento combustibili gassosi e liquidi da carbone" nel particolare "Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione"

Gli obiettivi e l'articolazione del progetto sono descritti nel documento

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.

Si è dato proseguo alle attività di sperimentazione, svolte presso il Centro di Ricerche ENEA di Casaccia, dove è ubicato il mini impianto gassificatore updraft 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 con l'ausilio di 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. 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.

Nel particolare si è analizzato con test sperimentali il processo di gassificazione su un carbone ad alto contenuto di volatili di tipo alaskiano in condizioni operative che hanno visto l'utilizzo di differenti miscele di agenti gassificanti quali aria/vapore e O₂/CO₂.

Ha avuto corso un'attività di progettazione e realizzazione di un nuovo impianto GEratore Sperimentale di SYngas da CARbone in grado di esercire e monitorare il processo di gassificazione, la depurazione del syngas e il suo smaltimento in torcia.

Sono proseguite le attività di coordinamento e collaborazione alla sperimentazione presso gli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo. In particolare si è dato corso ad un'attività di monitoraggio del processo di gassificazione. Infatti al fine di avere una migliorata mappatura termica del processo in svolgimento all'interno del gassificatore si è proceduto con l'installazione di una serie di punti di misura basati su termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica.

Tra i primi risultati si è riscontrata una dinamica più rapida per il sistema con le termocoppie in parete, inoltre è degno di nota il fatto che i profili termici ricavati danno un'informazione anche in senso radiale, in caso di avarie si ha una maggior ridondanza dei dati sui diversi piani ed anche la sostituzione di un singolo sensore è possibile senza operazioni troppo dispendiose o che comportino la fermata dell'impianto.

L'obiettivo è quello di poter efficacemente monitorare il processo ed effettuare con cognizioni di causa le operazioni di carico del carbone, di scarico delle ceneri, di modulazione dei reagenti gassosi e di movimentazione dello stirrer omogeneizzatore in modo da pervenire ad un funzionamento stabile ed efficiente in linea con le richieste di gas necessarie all'utenza finale (produzione elettrica o di idrogeno/syngas).

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.

Le attività hanno visto lo sviluppo ed il proseguo di quanto svolto nelle annualità precedenti.

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. 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.

Si sono quindi, condotte prove e test relativi a diverse condizioni di funzionamento, modificando la miscela degli agenti gassificanti al fine di pervenire ad una serie di informazioni utili alla messa a punto ed all'ottimizzazione dei processi e delle apparecchiature. La finalità ultima è quella di fornire dati utili ad successivo upgrade dell'impianto.

In particolare le attività si sono sviluppate indagando il processo di gassificazione con CO₂ preriscaldata, su un carbone di tipo alaskiano ad alto contenuto di volatili.

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.

Di seguito viene descritta l'apparato sperimentale utilizzato e le modalità con cui si sono effettuate i test di esercizio.

2.1 Prove in piccola scala su 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.



Figura 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.

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.

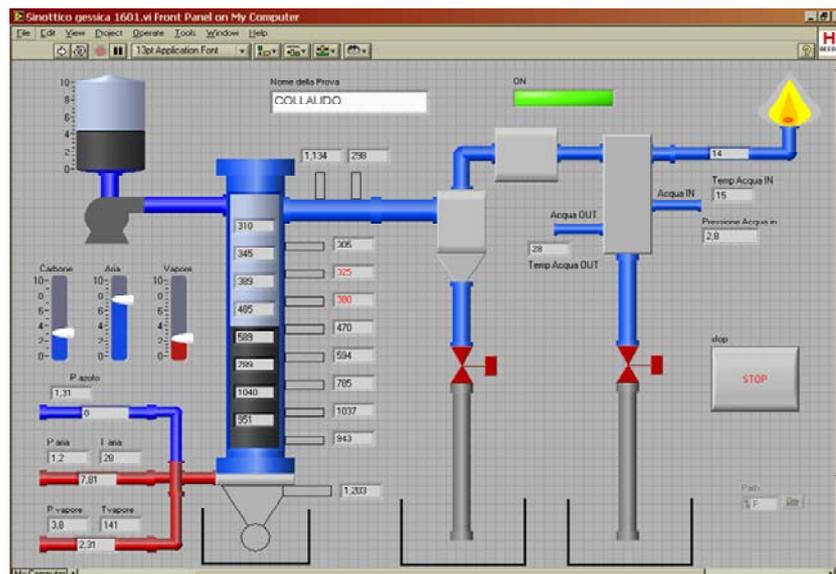


Figura 2: sinottico del minigassificatore

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 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.

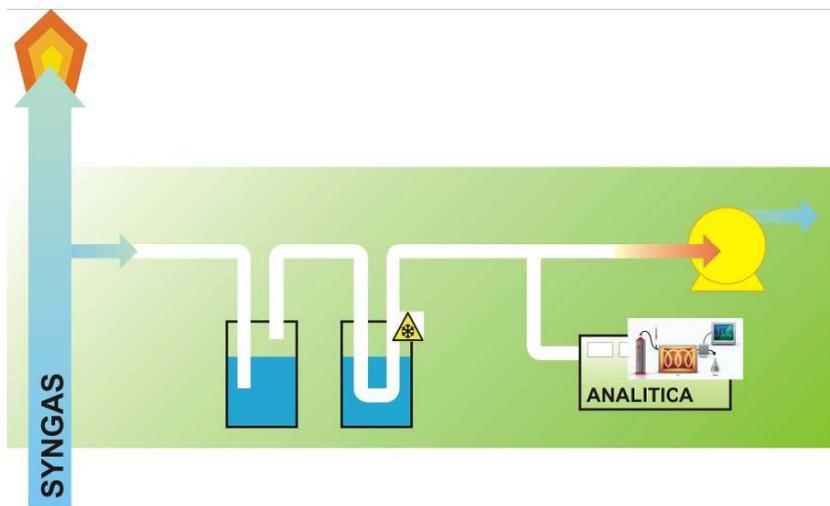


Figura 3: Schema della linea di campionamento

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 4.

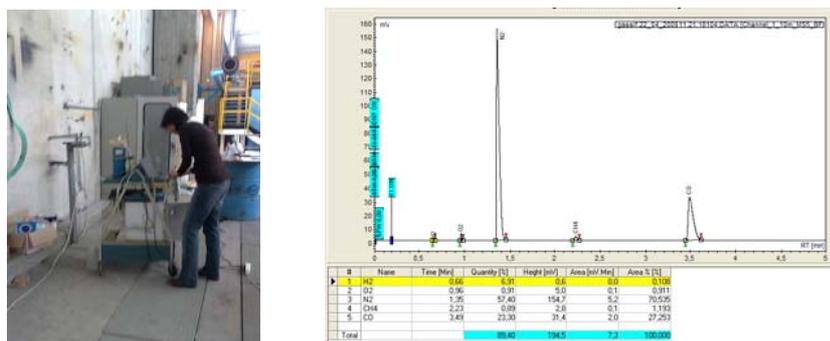


Figura4: Gas cromatografo ed esempio di un cromatogramma

L'analitica modulare è un sistema costituito da più moduli a cella che permette la misura in continuo dei principali composti costituenti il syngas (H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂S, O₂) basandosi su differenti principi di misura a seconda del composto che si deve misurare (Figura 5)



Figura 5: 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 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 indagando il processo di gassificazione con CO₂ preriscaldata. Su un carbone di tipo alaskiano ad alto contenuto di volatili.

Nell'ambito delle tecnologie innovative per la produzione di energia con separazione e confinamento della CO₂, sono state recentemente proposte numerose configurazioni impiantistiche alternative alle tecnologie convenzionali. Tra queste appare molto interessante la possibilità di operare la gassificazione del carbone (o la co-gassificazione di carbone e biomasse) utilizzando la CO₂ come agente gassificante. Tale tecnologia, oltre a consentire, in generale, una maggiore efficienza di conversione del carbonio presente nel combustibile, consente infatti di avere, a valle del gassificatore, un syngas composto principalmente da CO, idrogeno, CO₂ e vapor d'acqua e, a valle del sistema di combustione, un gas combusto composto quasi esclusivamente da anidride carbonica e vapore, facilmente separabili mediante una semplice condensazione dell'acqua. La tecnologia di gassificazione con CO₂ non presenta, allo stato attuale, applicazioni commerciali, ma sono diversi, a livello mondiale, gli studi e le sperimentazioni a riguardo.

La reazione coinvolta nel processo di gassificazione che utilizza CO₂ come agente gassificante è la seguente:



$$\Delta H = + 159,7 \text{ kJ/mol}$$

Dato che la reazione risulta essere endotermica ($\Delta H > 0$), affinché risulti possibile il suo sviluppo è necessario fornirgli calore, tale calore può essere fornito o come calore sensibile trasportato e trasmesso dal gas o come calore sviluppato dalla combustione di parte del char.

Nell'ambito dell'attività svolta si è preriscaldata a 250°C la corrente di CO₂ in ingresso al gassificatore e miscelata all'O₂ in modo da sostenere il processo con la combustione del char.

2.4.1 Sperimentazione e risultati

L'attività sperimentale 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

Nel particolare l'attività si è posta come obiettivo lo studio della reattiva di un carbone alto volatile con differenti tipologie di miscele di agenti gassificanti.

A titolo di esempio di seguito si riportano i risultati del test di gassificazione effettuato con l'obiettivo di analizzare la gassificazione con miscele di CO₂/O₂.

A valle delle verifiche funzionali si è avviata la fase sperimentale di test dell'impianto utilizzando un carbone di tipo Alaska proveniente da Usibelli, la cui analisi immediata ed elementare sono riportate in tabella 1 e 2.

Tabella 1: Analisi immediata del carbone Alaska secondo ASTM D5142/02¹

	% in peso	% in peso s.s. sostanza secca
Carbonio fisso	36,4	
Volatili	31,6	
Ceneri	9,0	
Umidità'	23,0	

Tabella 2: Analisi elementare del carbone Alaska

Elemento	% in peso s.s. sostanza secca
C	61,72
H	4,87
N	0,91
S	0,16
O	32,32
Ceneri	0,0

Il potere calorifico superiore del carbone alaskiano è 19,5 MJ/kg, la carica utilizzata nell'avviamento presentava una granulometria 1-3 cm con una densità apparente di 742 kg/m³.

Al fine di inviare la corrente di CO₂ preriscaldata si è allestito l'impianto inserendo a monte dell'ingresso della miscela degli agenti gassificanti un forno dotato di un sistema di controllo e settaggio della temperatura (Figura 6)

Il forno tubolare è di fornitura Nabertherm ed è equipaggiato con un sistema automatico di controllo delle temperature che permette di realizzare programmi che effettuino rampe di temperatura ed isoterme

¹ L'analisi immediata ed elementare è stata effettuata presso i laboratori di Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università di Roma La sapienza

inoltre attraverso la visione su pannello dei valori misurati da due termocoppie posizionate esternamente al forno tubolare è possibile seguire il valore della temperatura impostato nella prova sperimentale. La temperatura di ingresso della CO₂ si è settata sul valore di 250°C.

La conduzione della prova 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 infine di gassificazione con una miscela CO₂/O₂. al 75 % in peso di CO₂

Durante la fase di esercizio si è mantenuta costantemente la temperatura al di sotto dei 900 °C al fine di operare in condizioni di sicurezza. A tale scopo si è monitorato continuamente il profilo di temperatura lungo l'asse del reattore attraverso le termocoppie posizionate sul mantello.



Figura 6: allestimento del set up sperimentale gassificatore e forno di preriscaldamento

La tabella 3 riporta le portate degli agenti gassificanti durante il test sperimentale.

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.

Tabella 3: portate degli agenti gassificanti nelle fasi del test sperimentale

Agenti gassificanti	aria/vapore	CO ₂ /O ₂
intervallo di tempo	13:30-15:30	15:30-18:00
portata media aria kg/h	3	-
portata media vapore kg/h	1,25	-
portata media ossigeno kg/h	-	1,03
portata media CO ₂ kg/h	-	3,21

In Figura 7 è riportato l'andamento temporale della composizione del syngas nei suoi principali componenti, nelle differenti fasi della prova sperimentale.

Nella fase di gassificazione con aria/vapore si è ottenuto un gas con la composizione tipica dell'esercizio dei gassificatori updraft in queste condizioni, con valori del contenuto in H₂ di quasi al 20 % e di CO leggermente al di sopra del 20 %.

La fase della gassificazione con CO₂ ha prodotto un syngas ricco in CO con concentrazioni fino al 70 % come conseguenza dello sviluppo della reazione di Boudouard.

La Figura 9 riporta il potere calorifica del syngas durante il test, da cui si evidenzia che durante la fase di gassificazione con CO₂ il contenuto energetico della syngas ha raggiunto valori intorno ai 10 MJ/Nm³.

Va indicato che il contenuto energetico del syngas ottenuto con valori alti è una conseguenza dell'alto contenuto di CO nel gas il cui potere calorifico è elevato.

Infatti gassificando con CO₂ e O₂, ossia fornendo parte del calore necessario allo sviluppo della reazione attraverso l'oxicombustione del char, con l'incremento della % in volume di O₂ contenuto nel flusso in ingresso, il contenuto energetico del syngas in uscita, espresso come PCI, migliora.

Infine in Figura 8 è riportata la composizione in volume del syngas nel tempo ottenuta durante l'avviamento del mini gassificatore. Il carbone analizzato ha presentato una buona reattività in entrambe le condizioni sperimentali.

Tabella 4: Composizione media del syngas nelle due fasi del test sperimentale

Agenti gassificanti	aria/vapore	CO ₂ /O ₂
intervallo di tempo	13:30-15:30	15:30-18:00
composizione % vol.		
H ₂ S	0,5	0,4
H ₂	16,6	8,8
O ₂	0,6	0,3
CH ₄	2,3	1,5
CO ₂	12,9	21,8
CO	21,2	65,2
N ₂	46,0	-
Altro	2	2
PCI syngas (kJ/Nm ³)	5397	9824

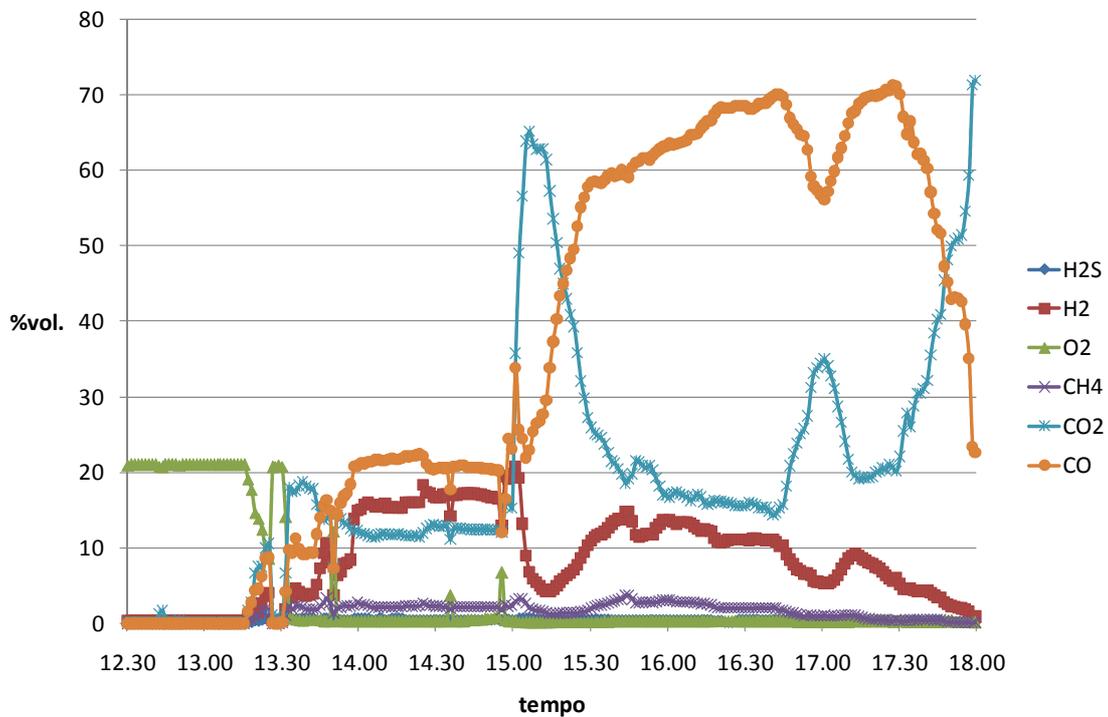


Figura 7: Andamento della composizione del syngas durante un test sperimentale

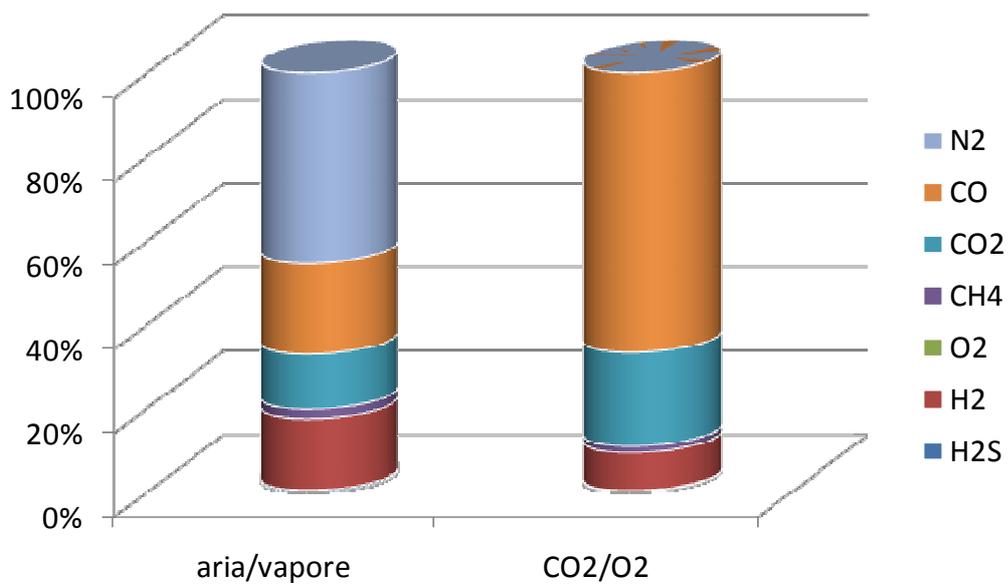


Figura 8: Composizione media del syngas nelle due differenti fasi di esercizio

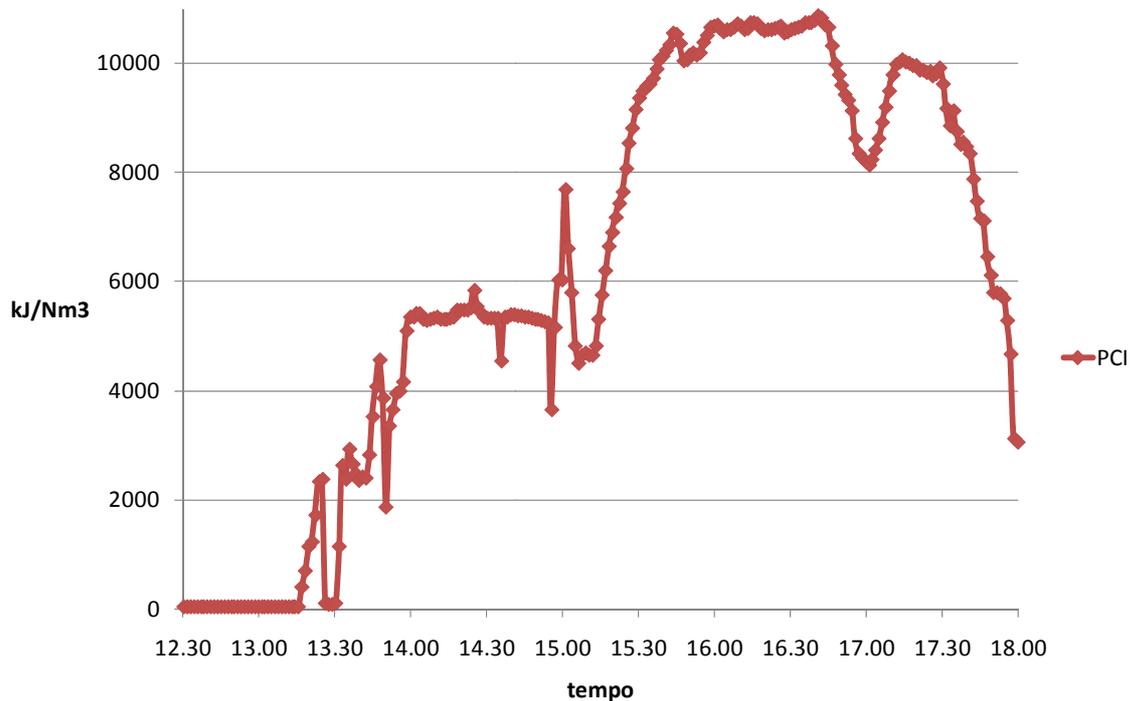


Figura 9: Andamento della potere calorifico inferiore del syngas durante un test sperimentale

2.4.2 Progettazione

L'attività in parola si è sviluppata, come sopra descritto, con la finalità di realizzare un nuovo impianto in grado di esercire e monitorare il processo di gassificazione, la depurazione del syngas e il suo smaltimento in torcia.

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, 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

2.4.3 Nuovo GESSICA (GGeneratore Sperimentale di SIngas da CARbone)

Si è dato corso alla progettazione ed alla realizzazione di un nuovo impianto prova per lo studio dei processi di gassificazione del carbone e di trattamento del gas di sintesi prodotto.

La realizzazione del nuovo impianto comprende un nuovo skid di dimensioni tali da rientrare nella sagoma normalmente trasportabile su camion (4000x2200x2000). La tal cosa consente di avere a disposizione un'impianto mobile che può essere facilmente trasportato ed esercito in differenti sedi operative.



Fig. 10 – Lavori di realizzazione del nuovo impianto GESSICA



Fig. 11 – Lavori di realizzazione dello skid del nuovo impianto GESSICA

La dotazione di impianto comprende un nuovo reattore refrattariato, una nuova sezione di abbattimento polveri e lavaggio, un nuovo sistema di acquisizione e controllo. L'impianto così descritto verrà avviato nel proseguo della nuova annualità.

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 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.

In particolare si è dato corso ad un'attività di monitoraggio del processo di gassificazione. Infatti al fine di avere una migliorata mappatura termica del processo in svolgimento all'interno del gassificatore si è proceduto con l'installazione di una serie di punti di misura basati su termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica.

Tra i primi risultati si è riscontrata una dinamica più rapida per il sistema con le termocoppie in parete, inoltre è degno di nota il fatto che i profili termici ricavati danno un'informazione anche in senso radiale, in caso di avarie si ha una maggior ridondanza dei dati sui diversi piani ed anche la sostituzione di un singolo sensore è possibile senza operazioni troppo dispendiose o che comportino la fermata dell'impianto.

L'obiettivo è quello di poter efficacemente monitorare il processo ed effettuare con cognizioni di causa le operazioni di carico del carbone, di scarico delle ceneri, di modulazione dei reagenti gassosi e di movimentazione dello stirrer omogeneizzatore in modo da pervenire ad un funzionamento stabile ed efficiente in linea con le richieste di gas necessarie all'utenza finale (produzione elettrica o di idrogeno/syngas).

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.

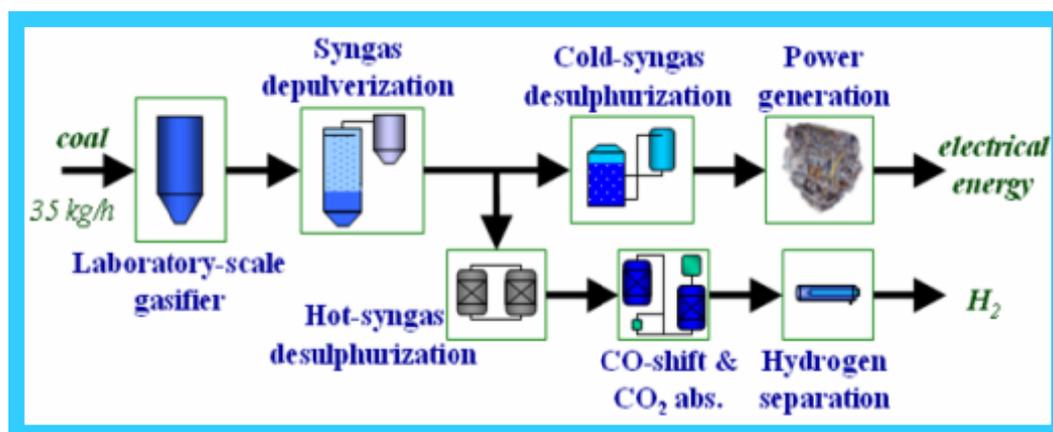


Figura 12: Schema di flusso semplificato dell'impianto pilota.

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 Nm³/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 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 (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.

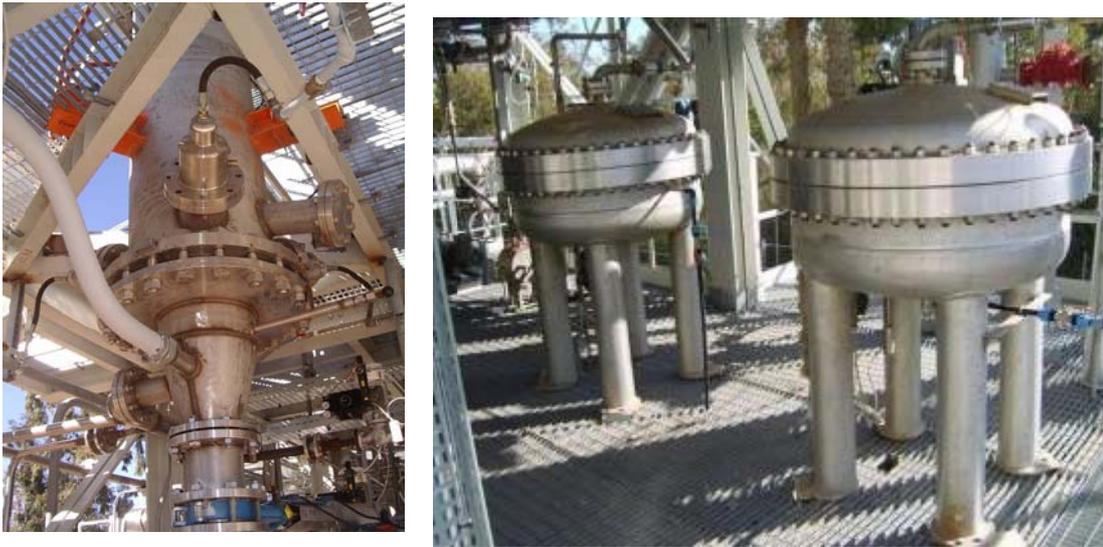


Figura 13 - Parte inferiore del gassificatore pilota e dettaglio dei reattori a bolle.

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 dm³). 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 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 (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.

3.2 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.

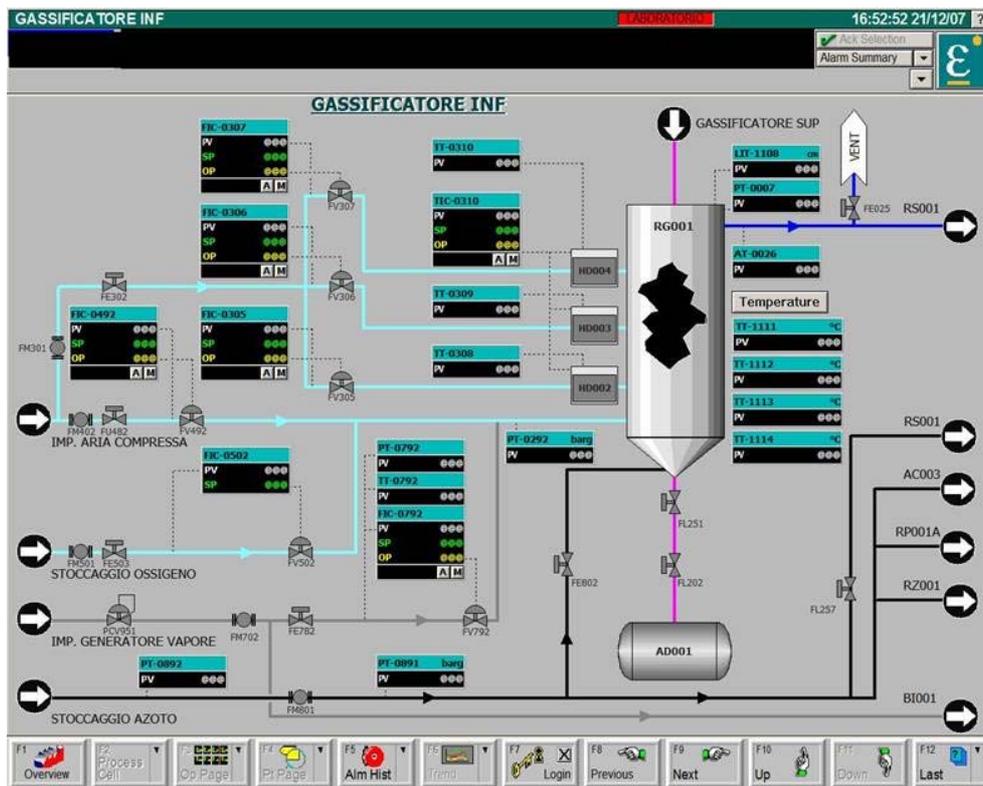


Figura 14 - Esempio di sinottico del sistema di acquisizione e controllo del gassificatore

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

La descrizione delle logiche 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

3.3 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.



Figura 15 - Laboratorio mobile di analisi gas ENEA 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 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.

- Griglia
- Sensore di livello
- Termocoppie
- Procedura di prova

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 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.

Una seconda attività effettuata 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.



Figura 16 - 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

A titolo di esempio si riporta l'andamento del livello del letto durante un test sperimentale.

La prova è stata svolta con l'obiettivo di valutare le prestazioni del processo di gassificazione: con un carbone proveniente dall'Alaska. La fase operativa del test sperimentale ha visto un'iniziale fase di accensione e quindi una fase di gassificazione durante la quale si è regolato il mix aria/vapore in modo tale da consentire il controllo della temperatura operativa che si è mantenuta al di sotto dei 1100°C. Il reattore si è caricato nella fase di avviamento fino a metà.

Durante l'esercizio si è mantenuto il livello del letto il più possibile costante intorno al valore di 1400 mm con l'obiettivo di aumentare la resa del processo; pertanto si sono eseguiti una serie di cariche e scarichi del reattore, alimentando il processo con carbone fresco e reattivo. La fase di scarico è stata eseguita controllando le temperature sulla griglia in modo da preservare il sistema di scarico da valori di temperatura al di sopra dei 1000°C.

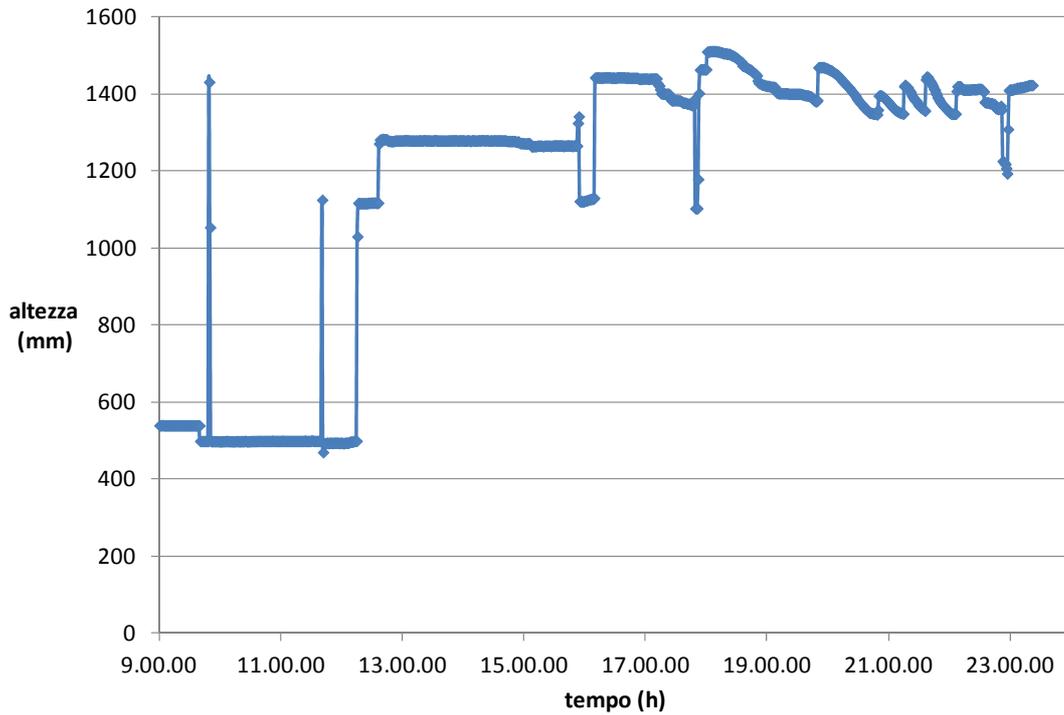


Figura 17 :Andamento dell'altezza de letto durante un test sperimentale presso la piattaforma pilota di Sotacarbo

Nel test sperimentale riportato la conoscenza dell'altezza del letto ha permesso di esercire il gassificatore in continuo fornendo i dati necessari alle operazioni di alimentazione e scarico. Pertanto l'informazione relativa all'altezza del letto insieme agli altri dati di esercizio quali temperature lungo l'asse, temperature di griglia, portata di gas, composizione del gas e altri dati, consente di eseguire un corretto controllo del processo di gassificazione e di migliorare le prestazioni del gassificatore.

3.4.2 Monitoraggio delle temperature interne al gassificatore

Nella condizione pregressa il monitoraggio della temperatura interna del gassificatore durante lo svolgersi del processo avviene grazie alla presenza di una termocoppia multipla (dotata di 11 punti di misura disposti lungo un'unica barra) che attraversa il reattore lungo tutta la sua altezza. Oltre a dare un'informazione solo parziale, in quanto individua un unico profilo di temperature, la presenza della sonda è causa di possibili formazioni di cammini preferenziali che alterano il processo ed inficiano la correttezza della misura. Inoltre è di ostacolo (al pari della barra di livello) alla installazione di un agitatore interno (stirrer proposto da ENEA) che sarebbe molto utile per migliorare l'omogeneità del letto reagente e per aumentare la controllabilità del processo nelle fasi più critiche nelle quali intasamenti ed occlusioni bloccano di fatto la prosecuzione delle sperimentazioni.

Per tutti questi motivi al fine di avere una migliorata mappatura termica del processo in svolgimento all'interno del gassificatore si è proceduto con l'installazione di una serie di punti di misura basati su termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica. Al momento attuale il numero totale dei sensori è pari a trenta distribuiti su dieci piani lungo tre direttrici a 120°. A queste si sommano poi le sette termocoppie sulla griglia.

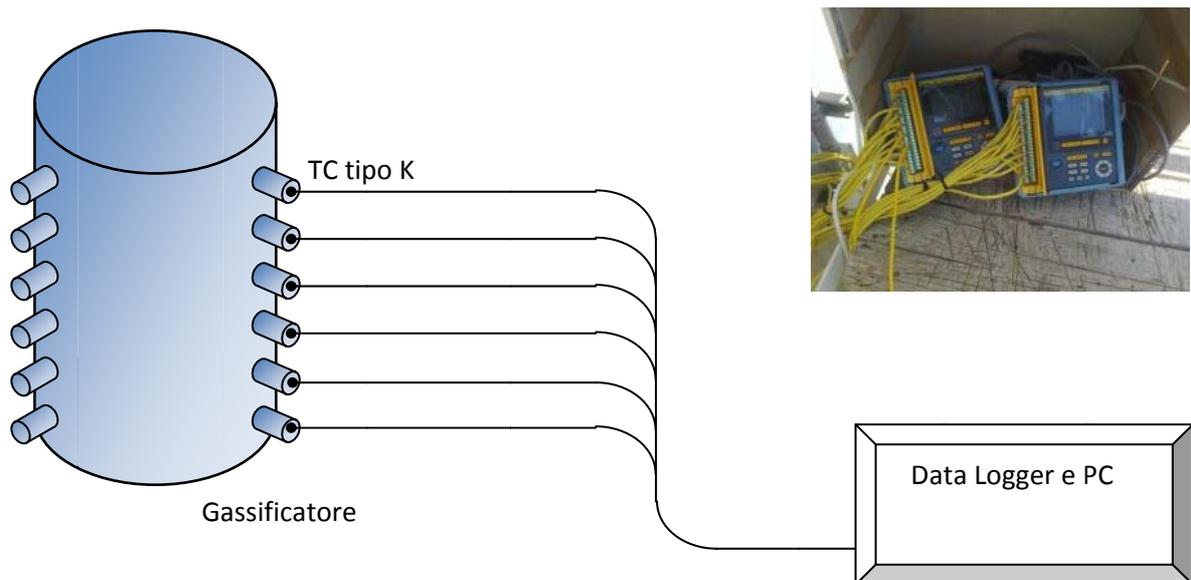


Fig. 18 - Schema disposizione sensori TC e acquisizione dati

Il lavoro di predisposizione e di installazione della sensoristica e del sistema di acquisizione è stato eseguito da personale ENEA in collaborazione con i tecnici di SOTACARBO.

Le diverse fasi di attività hanno contemplato la tracciatura del mantello di coibentazione esterna del gassificatore pilota con i riferimenti per tre fori distribuiti ogni 120° sui piani relativi alle dieci sezioni orizzontali monitorate.

Si è proceduto quindi alla foratura e all'incisione del rivestimento del gassificatore. Una volta smontata la coibentazione esterna sono stati posizionati e saldati a tig i manicotti da mezzo pollice di diametro. Il montaggio dei raccordi a compressione tipo swagelok con foro passante da 6 mm ha completato la predisposizione degli attacchi per le sonde sull'esterno del reattore di gassificazione.

Una fase ulteriore ha interessato la foratura del refrattario interno con una apposita punta. All'interno dei fori così creati è stato inserito un tubo in acciaio inox (AISI316) in modo da realizzare un pozzetto aperto. A seguire si è passati al montaggio su tutti i manicotti filettati degli attacchi swagelok con foro da 3 mm e all'inserzione delle termocoppie nei raccordi swagelok con l'opportuno serraggio a tenuta.

Il collegamento delle termocoppie ai cavi compensati di prolunga e la connessione dei cavi alle morsettiere dei data logger hanno completato la parte di interfacciamento delle linee di segnale. La predisposizione dell'alimentazione data logger ed il collegamento verso il PC via connessione TCP-IP hanno infine portato all'avviamento del sistema di monitoraggio temperature ed all'effettuazione delle prime prove di monitoraggio e registrazione delle temperature all'interno del gassificatore.

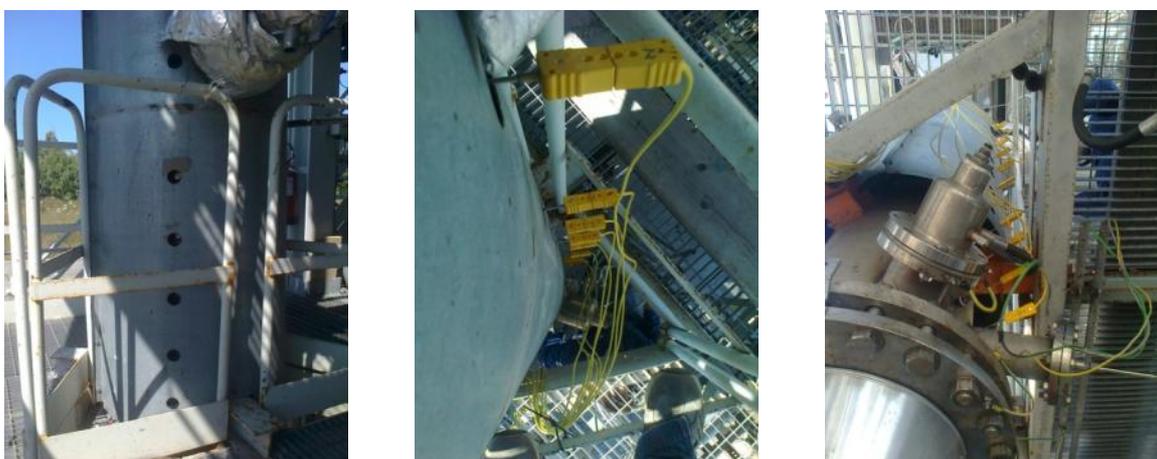


Fig. 19 – Disposizione dei fori e delle connessioni dei sensori TC

Il sistema consente la misura on line delle temperature nella parete interna e sulla griglia. La tal cosa si rileva utile durante il funzionamento dell'impianto per accertare l'uniformità di condizioni del letto, individuare eventuali anomalie di stratificazione delle temperature (spesso dovute a disuniformità legate alla presenza di cammini preferenziali), programmare le azioni di carico e scarico del letto evitando onerosi surriscaldamenti della griglia.

Il sistema provvede anche alla registrazione dei dati che possono essere utilizzati a posteriori per valutazioni sull'andamento del componente e sull'ottimizzazione del processo. In particolare è in corso di valutazione il confronto con i dati provenienti dalla termocoppia multipla originariamente presente all'interno del reattore.

Tra i primi risultati si è riscontrata una dinamica più rapida per il sistema con le termocoppie in parete, inoltre è degno di nota il fatto che i profili termici ricavati danno un'informazione anche in senso radiale, in caso di avarie si ha una maggior ridondanza dei dati sui diversi piani ed anche la sostituzione di un singolo sensore è possibile senza operazioni troppo dispendiose o che comportino la fermata dell'impianto.

La visualizzazione è consentita anche in remoto grazie alla presenza di un PC collegato con protocollo web con un cavo di rete. Come riportato nella Figura sottostante.

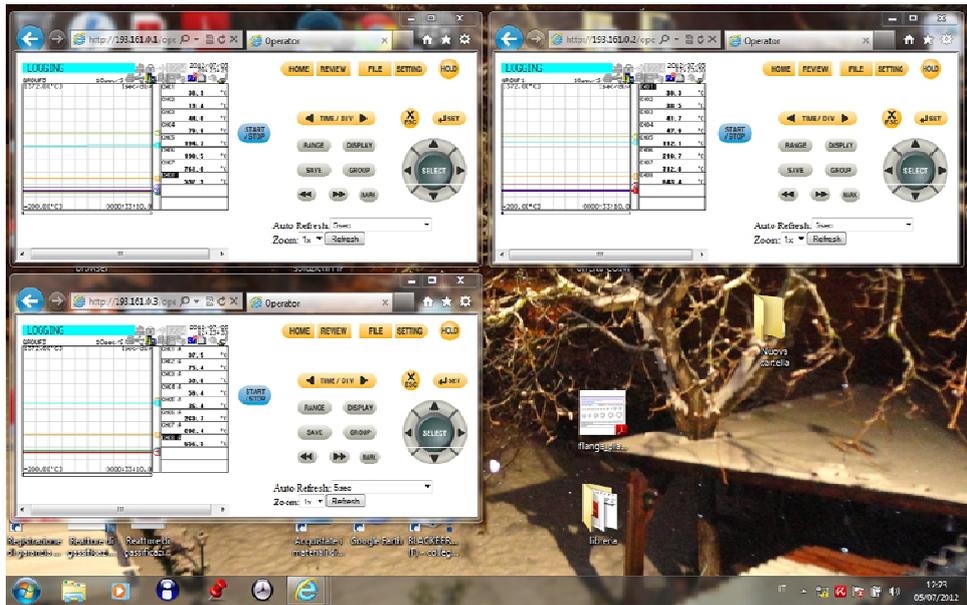


Fig. 20 – Schermata monitoraggio e acquisizione dati (DataLogger Yokogawa)

A titolo di esempio si riportano tre mappature relative alle fasi di avviamento, ad una fase di regime pressoché stazionario ed ad una di incipiente spegnimento.

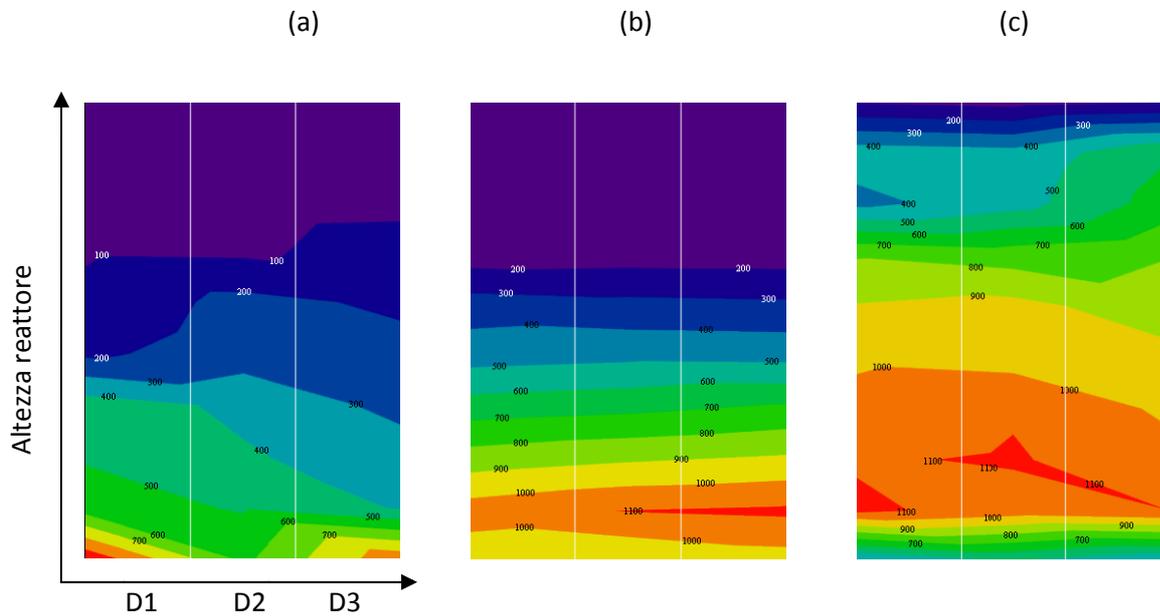


Fig. 21 – Mappatura termica della parete interna del reattore (sviluppo) fasi di avviamento (a), stazionario (b), pre-spegnimento (c)

Alla prima situazione corrispondono temperature abbastanza limitate in prossimità della griglia sul fondo del reattore (500-600 °C) che vanno poi a degradare verso l'alto e una certa disomogeneità radiale dovuta

all'accensione non esattamente simmetrica sulle tre direzioni di avanzamento iniziale dovute alla presenza delle lampade di startup. La temperatura del gas in uscita è all'incirca intorno ai 70°C.

La situazione riportata dall'immagine al centro è invece relativa ad una raggiunta condizione di sufficiente stazionarietà. Il massimo della temperatura (1000 - 1100°C) si ha in una zona posta abbastanza al di sopra della griglia, la stratificazione delle temperature è abbastanza omogenea anche in senso radiale, la temperatura di uscita del gas si attesta intorno ai 200°C.

La terza immagine propone invece una situazione già compromessa in cui la zona ad alta temperatura interessa gran parte del letto con asimmetrie in senso radiale indice della presenza di zone a reattività maggiore e/o della presenza di zone di blocco e occlusione causate dalla presenza di ceneri fuse o anomalie nello scaricamento dei solidi. La temperatura di uscita del gas è abbastanza elevata fino a raggiungere i 600 - 700 °C.

Ulteriori sviluppi sono previsti per il proseguo dell'attività in modo da pervenire ad un sistema integrato per il monitoraggio ed il controllo del processo di gassificazione basato sull'integrazione della mappatura on line delle temperature interne del reattore con la misura di livello del letto reagente e la misura delle perdite di carico tra monte e valle del reattore.



Fig. 22 – Strategia di controllo basata sull'integrazione di più variabili

L'obiettivo è quello di poter efficacemente monitorare il processo ed effettuare con cognizioni di causa le operazioni di carico del carbone, di scarico delle ceneri, di modulazione dei reagenti gassosi e di movimentazione dello stirrer omogeneizzatore in modo da pervenire ad un funzionamento stabile ed efficiente in linea con le richieste di gas necessarie all'utenza finale (produzione elettrica o di idrogeno/syngas).



Fig. 23 – Acquisizione dei dati su Datalogger

3.4.3 Esempio di una procedura di prova

Nell'ambito delle attività sperimentali svolte, in coordinamento tra personale ENEA e Sotacarbo si è definita un procedura di prova standard relativa ad un test di cattura della CO₂ con una soluzione 5M di MEA con l'obiettivo di stimare le capacità assorbenti del solvente sottoposto a più cicli di assorbimento. Nel particolare si è proceduto ad ottimizzare il sistema costituito da una colonna a riempimento operante in assorbimento e da una seconda colonna di rigenerazione dotata di un ribollitore. Si è quindi definito un lay out integrando le due sezioni quella di assorbimento e quella di rigenerazione con l'obiettivo di effettuare in continuo più cicli di assorbimento e rigenerazione. Pertanto si è proceduto a delineare uno schema di impianto riportato in figura 24 che evidenzia come le connessioni tra le due sezioni sono state ottimizzate ed integrate .

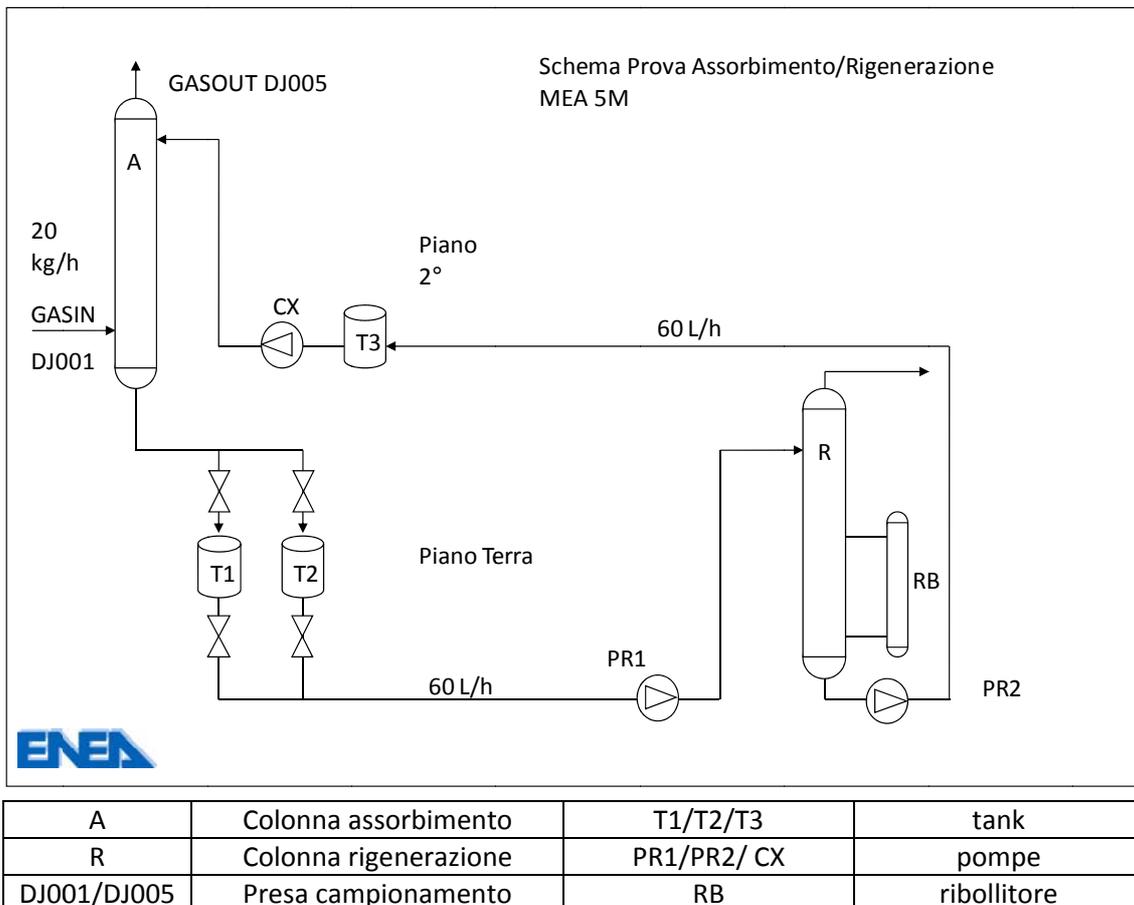


Figura 24: schema del test sperimentale di assorbimento/rigenerazione MEA 5M

E' stato quindi possibile stimare le prestazioni della sezione di assorbimento della CO₂ fissando un rapporto della portata di solvente liquido sulla portata di gas (L/G) pari a 3 kg/kg, valore tipico utilizzato su impianti di scala industriale. La corrente di gas da trattare si è ipotizzata composta al 15% in volume di CO₂ in N₂. In tali condizioni operative la procedura del test sperimentale si è delineata al fine di valutare il decadimento delle prestazioni dell'ammina (a partire da ammina MEA5M fresca) ad ogni ciclo di assorbimento/rigenerazione .

Allo schema di impianto si è allegata una procedura di prova nella quale si è descritto per tutta la durata della prova le operazioni e le modalità di esercire l'impianto (Tabella 5). Si è inoltre indicata la tempistica dei prelievi dei campioni di MEA necessari alla verifica di come variano nel tempo ,in funzione del suo utilizzo, le capacità assorbenti dell'ammina.

Tabella 5: procedura di prova

Ora	Attività
07-08	Operazioni preliminari: Caricamento T3 con 60 litri di MEA 5M fresca Caricamento colonna rigenerazione R con 65 litri di MEA5M fresca Check portata gas (20kg/h, CO2 15% e N2 85% in vol) e campionamento gas DJ001 e DJ005
08-09	Colonna R: transitorio di riscaldamento (durata 1h?) Pompe PR1 e PR2 OFF Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX: ON Campionamento* (*carico CO2, densità e pH) sul T1 ore 8:30
09-10	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 9:30
10-11	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON Campionamento T3 e T1 ore 10:30
11-12	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 11:30
12-13	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON Campionamento T3 e T1 ore 12:30
13-14	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 13:30
14-15	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON Campionamento T3 e T1 ore 14:30
15-16	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 15:30
16-17	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON

	Campionamento T3 e T1 ore 16:30
17-18	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 17:30
18-19	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON Campionamento T3 e T1 ore 18:30
19-20	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 19:30
20-21	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON Campionamento T3 e T1 ore 20:30
21-22	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T1 e manda al T3 Pompe PR1 e PR2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T2 Pompa CX ON Campionamento sul T3 e T2 ore 21:30
22-23	Colonna R: rigenerazione 60 l/h aspira dal T2 e manda al T3 Pompe Pr1 e Pr2 ON Assorbitore A: assorbimento 60 l/h di MEA 5M aspira dal T3 e manda al T1 Pompa CX ON Campionamento T3 e T1 ore 22:30

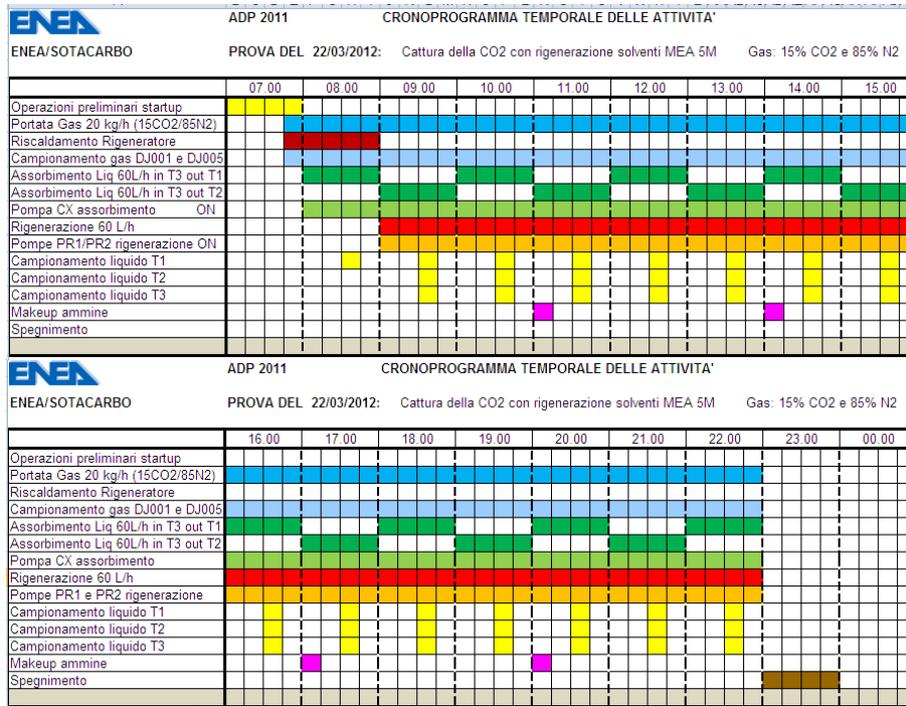


Figura 25: Diagramma di GANNT della prova

4. Conclusioni

Lo sviluppo delle attività sulla gassificazione del carbone e sul trattamento del syngas effluente ha avuto proseguo sia presso il Centro Ricerche ENEA di Casaccia sia presso il C.R. Sotacarbo ed in particolare sulla Piattaforma Sperimentale di Produzione di Energia Elettrica ed Idrogeno da Carbone. Sono stati eseguite oltre 400 ore di sperimentazione a caldo, sono stati progettati e realizzati nuovi sistemi ed impianti nella prosecuzione della strategia di approfondimento degli studi sulla conversione termochimica del carbone.

5. Riferimenti bibliografici

1. M.L. Hobbs, P.T. Radulovic, L.D. Smoot, Modeling fixed-bed coal gasifiers, AIChE Journal, vol. 38, No. 5, May 1992
2. Rohan Fernando, Coal gasification CCC/140, ISBN 978-92-9029-459-7
3. P. Deiana, A. Pettinau, V. Tola, Hydrogen production from coal gasification in updraft gasifier with syngas treatment line, CCT 2007 Third International Conference on Clean Coal Technologies 15-17 May, Cagliari, Sardinia, Italy
4. P.Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, "COAL LEVEL MEASUREMENT IN FIXED BED GASIFIERS", 11th Gasification Conference, Icheme, Cagliari, May 2012.