



Ricerca di Sistema elettrico

Attività di sperimentazione dei processi di gassificazione c/o impianto GESSICA

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

ATTIVITÀ DI SPERIMENTAZIONE DEI PROCESSI DI GASSIFICAZIONE C/O IMPIANTO GESSICA

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

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.1 "Bioenergia"

Obiettivo: Parte B - Tecnologie avanzate di gassificazione e abbattimento del tar

Responsabile del Progetto: Vincenzo Gerardi, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 LA GASSIFICAZIONE DELLE BIOMASSE.....	6
2.1 LE BIOMASSE.....	6
2.2 LA GASSIFICAZIONE DELLE BIOMASSE.....	7
3 L'IMPIANTO GESSICA.....	11
3.1 DESCRIZIONE DELLA FACILITY.....	11
3.2 SISTEMA DI ACQUISIZIONE E CONTROLLO.....	13
3.3 ANALISI DEL GAS.....	14
4 ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....	15
5 SPERIMENTAZIONE SU UN REATTORE DI REFORMING OSSIDATIVO DEL TAR.....	19
6 CONCLUSIONI.....	22
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	23
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	23

Sommario

Il presente Rapporto descrive le attività svolte nell'ambito del progetto di Ricerca di Sistema, Piano Annuale di realizzazione 2015 in riferimento all'obiettivo b "Tecnologie avanzate di co-gassificazione e abbattimento del tar.

Le attività svolte riguardano lo sviluppo e la caratterizzazione del processo di gassificazione di biomasse e/o miscele biomasse-carbone e di trattamento del syngas prodotto. La sperimentazione è stata condotta utilizzando l'impianto GESSICA del C.R. ENEA Casaccia. L'impianto presenta il vantaggio di essere allocato su skid mobile ed equipaggiato di più sezioni di conversione e pulizia che ne permettono una completa versatilità nel testare i differenti processi di trasformazione del syngas in prodotti a maggiore valore aggiunto. Le attività si sono sviluppate nell'ottica di perseguire l'obiettivo relativo alla sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione alimentati a biomasse. In quest'ambito si sono affrontate le problematiche intrinseche di questa tipologia di impianti, che sono per lo più legate ad un esercizio continuo dell'impianto e alla pulizia del syngas nel suo contenuto in tar, al fine di consentire la produzione di energia elettrica mediante un motore combustione interna.

I primi test a caldo hanno visto l'accensione del gassificatore alimentato a pellet di pino e una prima verifica di tutta la componentistica e dei sistemi di misura. Durante la prova si sono monitorati in continuo i principali parametri di processo quali portate degli agenti gassificanti, temperature all'interno del gassificatore, pressioni e composizione del gas uscente. Monitorando le temperature, registrate dalle termocoppie poste lungo l'altezza del reattore di gassificazione, si è agito sulla portata degli agenti gassificanti in modo tale da portare il processo in condizioni stazionarie e, parallelamente, evitare picchi di temperatura. Il test ha visto la produzione di un syngas di buona qualità con una composizione tipica dei gassificatori updraft e con un PCI del syngas che si è mantenuto nel range tra 6-12 MJ/Nm³.

Tra le barriere di natura tecnologica caratteristiche della gassificazione, di particolare importanza risulta il funzionamento in continuo dei gassificatori legato ad una appropriata pulizia del syngas dal suo contenuto in tar. L'impianto Gessyca è dotato pertanto di un reattore su cui testare il processo di reforming ossidativo dei tar. Tale processo di conversione del tar in gas leggeri avviene ad alte temperature, essendo endotermico, e su riempimenti tipo allumina o catalizzatori. Per studiarne e comprendere le problematiche si è allestito un set up sperimentale su skid, presso cui si è allocato il reattore, dotato della sensoristica industriale, collegata ad un PLC, necessaria al controllo e allo studio del reforming ossidativo del tar. La prima fase dell'attività ha visto lo svolgimento di una serie di test di studio e sperimentazione della fase di start up del processo, allestendo un bruciatore interno al reattore ed un sistema di tiraggio che ha consentito al letto di allumina di portarsi alla temperatura idonea all'avvio del processo di reforming.

Tale attività proseguirà con un approfondimento delle attività di sviluppo di un bruciatore dedicato, con test sperimentali su diversi riempimenti con o senza catalizzatori al fine di trasferire il processo e le competenze acquisite nel progetto di un componente, abbattitore del tar da installare presso impianti di scala maggiore

In prospettiva l'obiettivo dell'attività è quello di sviluppare procedure automatiche di conduzione ed esercizio di un impianto di gassificazione, nonché individuare le condizioni operative per un regime stazionario e stabile da testare in una facility di piccola scala facilmente modulabile di gassificazione e produzione di energia elettrica da biomasse da realizzare.

1 Introduzione

Il presente Rapporto descrive le attività svolte nell'ambito del progetto di Ricerca di Sistema, Piano Annuale di realizzazione 2015 in riferimento all'obiettivo b. "Tecnologie avanzate di co-gassificazione e abbattimento del tar".

Le attività svolte riguardano lo sviluppo e la caratterizzazione del processo di gassificazione di biomasse e/o miscele biomasse-carbone e di trattamento del syngas prodotto, con l'obiettivo finale di inviare il syngas in un utilizzatore che lo possa convertire in energia elettrica. L'attività sperimentale è stata condotta presso l'impianto GESSICA del C.R. ENEA Casaccia. Su di esso è stata testata una tipologia di biomassa (pellets), analizzando ed elaborando i dati sperimentali ottenuti nel corso delle prove.

Nel particolare le attività svolte si sono sviluppate nell'ottica di perseguire l'obiettivo relativo alla sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione alimentati a biomasse. L'obiettivo ambizioso, che proseguirà anche nel PAR 2016, è quello di sviluppare procedure automatiche di conduzione ed esercizio di impianto. I primi test a caldo hanno visto l'accensione del gassificatore e una prima verifica di tutta la componentistica e dei sistemi di misura.

2 La gassificazione delle biomasse

2.1 Le biomasse

Le biomasse sono combustibili solidi costituiti da tre componenti principali: fibre di cellulosa (ca.50%) immerse in una matrice di emicellulosa (ca.25%) e lignina. La cellulosa è un polimero lineare con un grado di polimerizzazione superiore a 10.000 unità di glucosio anidro, contenente il 49%p di ossigeno. L’emicellulosa è chimicamente simile alla cellulosa, ma ha un grado di polimerizzazione più basso compreso fra 100 e 200 unità in cui si alternano zuccheri anidri a 5 e a 6 atomi di carbonio. Inoltre ha un contenuto di ossigeno pari al 54%p. La lignina è un polimero tridimensionale costituito principalmente da fenoli il cui contenuto di ossigeno è compreso fra il 12% e il 29%p (Bridgwater et al., 1999).

Con il termine biomassa s’intende genericamente ogni sostanza organica, di origine vegetale o animale, da cui sia possibile ricavare energia. Ai sensi del D. Lgs. del 30 marzo 2011 di recepimento della Direttiva Europea 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, che ha modificato e successivamente abrogato le direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE, per biomassa s’intende “la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall’agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l’acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.

Le caratteristiche fisiche rilevanti ai fini della valutazione di una biomassa come combustibile sono le seguenti [1]:

- Potere Calorifico Inferiore (PCI): esprime la quantità di calore che si sviluppa con la combustione completa di 1 kg di biomassa, considerando l’acqua allo stato di vapore a 100 °C, cioè tenendo conto della sola quota parte di calore effettivamente utilizzabile. Esso rappresenta il parametro chiave per valutare la qualità della biomassa in termini energetici. Il PCI si misura in kJ/kg , kcal/kg o kWh/kg .
- Umidità (U): esprime la quantità di acqua contenuta in un kg di biomassa umida. L’umidità incide sul potere calorifico in maniera inversamente proporzionale: quanto più è alta tanto più il PCI della specie sarà basso e viceversa (Figura 1). Questo perché umidità alta significa essenzialmente alte quantità di acqua presenti nella biomassa (che vanno a sommarsi a quella che si forma per reazione dell’idrogeno con l’ossigeno atmosferico) che durante la combustione verranno vaporizzate sottraendo al processo parte dell’energia liberata. Inoltre, all’aumentare dell’umidità cala bruscamente il rendimento di combustione. La concentrazione limite di acqua che consente l’utilizzo di biomassa come combustibile si attesta attorno a valori di umidità del 60%. D’altro canto, evidenze sperimentali dimostrano come un minimo contenuto di acqua (attorno al 5% di umidità) rappresenti la condizione migliore dal punto di vista del rendimento di combustione:

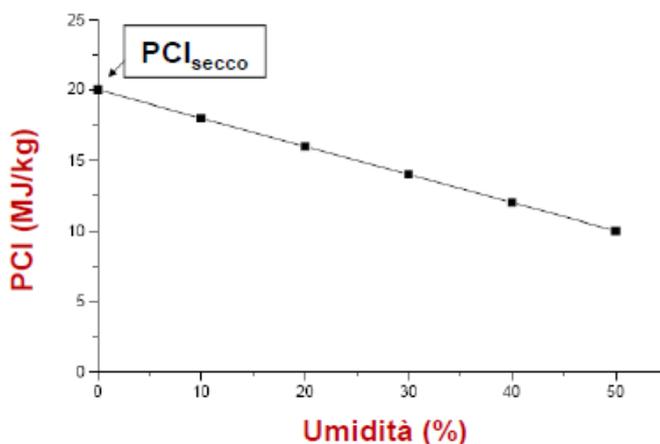


Figura 1. Relazione tra PCI e U [1]

- Densità (ρ , kg/m³): è il rapporto tra la massa della biomassa (umida) e il volume occupato.

- Rapporto C/N: è il rapporto ponderale tra Carbonio e Azoto presente nella biomassa. È un parametro fondamentale nella valutazione dei processi di valorizzazione biochimica della biomassa.
- Produzione media (t/ha): rappresenta la quantità di biomassa prodotta da un ettaro di terreno.
- Composizione chimica: la composizione influisce sui rendimenti di combustione e sulle emissioni in atmosfera derivanti da processi di combustione. È noto che un elevato contenuto di carbonio e idrogeno ha come diretta conseguenza un potere calorifico elevato, mentre l'ossigeno, l'azoto e gli altri elementi presenti nella biomassa non danno alcun contributo al riguardo.
- Aria teorica di combustione (kg di aria/kg di combustibile): definisce la quantità di aria contenente esattamente tanto ossigeno quanto necessario per bruciare in maniera completa una quantità stabilita di combustibile. È anche detta aria stechiometrica.
- Eccesso d'aria: percentuale di aria alimentata in eccesso rispetto alla quantità teorica o stechiometrica. Dipende dalle condizioni di funzionamento dell'impianto e influenza grandemente il rendimento di combustione, il livello e la tipologia di emissioni al camino.
- Ceneri presenti: sono costituite da quei composti (azoto, fosforo potassio e altri metalli pesanti presenti) di cui la biomassa necessita per costituire i propri tessuti e svolgere i processi vitali. La loro presenza incide negativamente nel processo di combustione in quanto non partecipando alla reazione rimangono nei prodotti e possono causare problemi di deterioramento per gli impianti, dovuti a eccessiva presenza di depositi, o di corrosione. In generale costituiscono anche un problema per l'ambiente in quanto anche quando non vengono rilasciate sotto forma di composti volatili (estremamente dannosi per la salute umana), devono comunque essere smaltite.

L'elevato contenuto di ossigeno presente nelle biomasse fa sì che il loro potere calorifico sia piuttosto basso (19 - 20 MJ/kg su base secca) rispetto a quello dei combustibili fossili (40 - 44 MJ/kg). Il confronto appare sfavorevole anche in termini volumetrici, 4,8 GJ/m³ contro 34 GJ/m³ (Bridgwater et al., 1999). A tal fine bisogna infatti precisare, quando si parla di biomasse, che questa tecnologia ha una densità di energia minore rispetto ai combustibili fossili usati al giorno d'oggi. Dal solo punto di vista energetico il paragone non c'è: prevalgono nettamente il petrolio, il gas e il carbone.

2.2 La gassificazione delle biomasse

La gassificazione può essere definita come la conversione termochimica di un combustibile solido in un gas, attuata mediante una combustione in carenza di ossigeno che impedisce l'ossidazione completa del combustibile. A seconda del tipo di processo e delle condizioni operative, si ottengono un gas di sintesi o syngas a basso o medio valore, costituito prevalentemente da CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂, H₂O, H₂S e le ceneri, ovvero residui solidi costituiti dalla frazione inerte del materiale trattato, come è possibile osservare dalla seguente figura.

Tabella 1. Principali caratteristiche delle diverse categorie di gassificatori [2]

Categoria dei gassificatori					
	Letto fisso		Letto fluido		Letto trascinato
Ceneri	Dry ash	Slagging	Dry ash	Agglomerato	Slagging
Processi tipici	Lurgi	BGL	Winkler, HTW,CFB	KRW,U-Gas	Shell, Texaco, E-Gas, Noell, KT
Caratteristiche dell'alimentazione					
Dimensioni	6-50 mm		6-10 mm		<100µm
Accettabilità fini	limitata	maggiore del letto dry ash	buona	migliore	illimitata
Alimentazione preferita	lignite, bituminoso reattivo, antracite, rifiuti	bituminoso, antracite, petcoke, rifiuti	lignite, bituminoso reattivo, rifiuti	lignite, bituminoso, coke, biomassa, rifiuti	lignite, bituminoso reattivo, antracite, petcoke
Limiti sul contenuto ceneri	nessun limite	<25%	nessun limite		< 25%
Temperatura fusione delle ceneri, °C	> 1200	< 1300	> 1100		< 1300
Condizioni operative					
Temperatura gas uscente, °C	425-650		925-1040		1260-1600
Pressione, Mpa	3		0,1	0,1-3	< 8
Richiesta ossigeno	bassa		moderata		alta
Vapore	alta	bassa	moderata		bassa
Taglia, MWth	10-350		100-70	20-150	fino a 700

Si possono distinguere più tipologie di reattori di gassificazione e per una loro classificazione è possibile utilizzare il criterio che si basa sul moto relativo tra il solido ed il gas. Si possono suddividere quindi i gassificatori in:

- gassificatori a letto fisso o mobile;
- gassificatori a letto fluido;
- gassificatori a letto trascinato.

I sistemi di gassificazione differiscono se come agente ossidante è utilizzata aria o ossigeno . Inoltre il metodo di alimentazione del carbone varia con il sistema considerato: il carbone può essere alimentato sia in granuli, sia in polvere secca o in un impasto. La geometria di flusso, che determina il modo in cui il combustibile e l'ossidante vengono a contatto, differisce da un gassificatore all'altro, così come la temperatura, la pressione e le caratteristiche del syngas prodotto. Infine le diverse tipologie di gassificatori differiscono anche in base al metodo di rimozione dei minerali presenti nel carbone, che possono essere rimossi come cenere secca o scorie. Nella seguente tabella è possibile osservare le principali caratteristiche delle diverse categorie di gassificatori.

La tecnologia a letto fisso è quella di più lunga applicazione e maturità commerciale presenta tuttavia lo svantaggio delle potenzialità di una singola unità ossia tipicamente un gassificatore a letto fisso può trattare dalle 10-15 t/h di combustibile. Il processo di gassificazione che si sviluppa in tali reattori, inoltre, non è omogeneo e determina problemi nella gestione e nel controllo del gassificatore stesso durante l'esercizio.

Nei gassificatori a letto fisso o mobile del tipo in controcorrente (anche denominati con il termine inglese updraft) il combustibile solido scorre lentamente verso il basso in controcorrente con i gas caldi prodotti dal letto fino al di sopra di una griglia che può essere rispettivamente fissa oppure mobile .

Gli agenti gassificanti, costituiti da vapore e aria o ossigeno, vengono introdotti all'interno del reattore attraverso appositi ugelli comunicanti direttamente con la zona centrale del reattore o disposti al di sotto della griglia attraverso la quale vengono anche scaricate le ceneri prodotte dal letto.

Come illustrato in Figura 2, il reattore di gassificazione può essere schematizzato in quattro macro zone alle quali corrispondono i diversi processi di essiccazione, di volatilizzazione, gassificazione e combustione. Il passaggio in controcorrente favorisce lo scambio termico fra il carbone che si riscalda e il syngas prodotto che conseguentemente si raffredda, per cui l'efficienza energetica del processo è piuttosto elevata. Nella zona superiore del reattore il carbone viene preriscaldato a spese del calore sensibile posseduto dal syngas in uscita, ivi il combustibile fa il suo ingresso liberando subito gli elementi più volatili, che poi si ritrovano nel gas di sintesi sotto forma di tar e fenoli allo stato liquido.

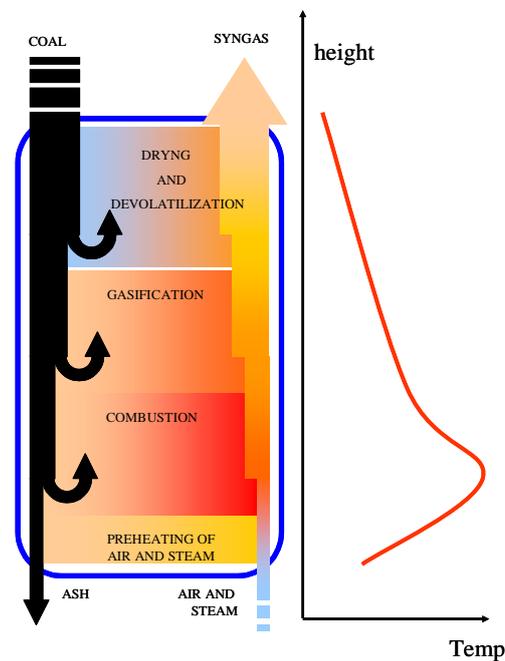


Figura 2. Profilo di temperatura e zone di reazione in un gassificatore updraft [4]

Nella zona centrale il char restante viene gassificato dando luogo alle reazioni di gassificazione agevolate dalla presenza di vapore mentre grazie all'ossidante alimentato nella zona sottostante avvengono le reazioni di combustione e conseguentemente si raggiungono i più alti valori di temperatura. Da ultimo nella parte inferiore del reattore si realizza il preriscaldamento degli agenti gassificanti grazie alla sottrazione di parte del calore sensibile delle ceneri.

Il syngas prodotto è a temperature moderate (400÷600°C) e contiene una notevole quantità di idrocarburi in fase gassosa, mentre è relativamente povero di polveri e di residui carboniosi. Il particolare assetto fluidodinamico di tali reattori e le basse temperature operative favoriscono le reazioni di formazione del metano ($\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ e $\text{C}_n\text{H}_m + 2n-m/2 \text{H}_2 \leftrightarrow n\text{CH}_4$). Il syngas contiene percentuali elevate di tale sostanza e, per contro, minori concentrazioni di idrogeno e monossido di carbonio, il suo potere calorifico inferiore risulta quindi piuttosto elevato. A valle del reattore è necessario operare un "lavaggio" del syngas per eliminare le polveri e gli idrocarburi liquidi in esso sospesi, che vengono poi separati e riciclati. Questi processi di depurazione complicano notevolmente l'impiantistica connessa costituendo un punto critico di tali gassificatori.

La principale problematica dei gassificatori updraft è la notevole quantità di tar prodotta, tipicamente nell'ordine di 50-150 mg/Nm³ [3], causata dalle basse temperature di uscita. Nel caso di un utilizzo del syngas in un motore combustione interna al fine di produrre energia a elettrica è necessario pertanto

equipaggiare l'impianto di determinati dispositivi o sistemi che permettano di abbattere il contenuto di tar ad un range accettabile.

I gassificatori a letto fisso risultano essere particolarmente adatti per gassificare carboni bitumosi aventi un elevato contenuto di composti volatili. Tuttavia tali reattori sono in grado di accettare praticamente tutti i carboni, fatta eccezione per quelli eccessivamente agglomerati. I gassificatori a letto fisso o mobile necessitano di basse quantità di ossidante a causa dell'elevata efficienza energetica del reattore, ma è necessaria una notevole quantità di vapore per moderare la temperatura. Il grosso limite dei reattori in questione è dato dalla bassissima potenzialità dovuta all'elevato tempo di permanenza (fra una e tre ore) del combustibile nel reattore. Per quello che concerne la pressione operativa, per i gassificatori a letto fisso o mobile, varia tra i 20 e 30 bar. A questa categoria appartengono i processi Lurgi e British Gas/Lurgi.

Le due principali applicazioni del processo Lurgi non sono inserite in cicli IGCC, ma sono l'impianto CTL della Sasol in Sud Africa, che produce essenzialmente benzine, e l'impianto nel Nord Dakota (Stati Uniti), dove si produce gas naturale e altri chemicals. Entrambi gli impianti utilizzano ossigeno come agente gassificante e vengono alimentati con carbone di basso rango proveniente da miniere limitrofe agli impianti stessi.

Gli ultimi anni non hanno portato novità significative nel campo dei gassificatori a letto fisso convenzionali tuttavia le problematiche ben note (capacità di funzionamento in continuo, residui, emissioni e redditività) connesse a questa tecnologia risultano tuttora irrisolte.

Tra le barriere di natura tecnologica caratteristiche della gassificazione di particolare importanza risulta il funzionamento in continuo del processo legato sia ad una appropriata pulizia del syngas dal suo contenuto in tar che alla capacità di operare continuamente nelle fasi di carico e scarico.

Il rendimento elettrico complessivo varia tra il 23 ed il 28%. Ciononostante attualmente i gassificatori a letto fisso convenzionali non sono in grado di garantire la continuità di funzionamento. Il livello massimo di ore garantite non supera le 7500 ore/a. Le problematiche connesse a questa tecnologia, quali il sistema di trattamento dei catrami, il problema delle emissioni e la bassa redditività risultano tuttora irrisolte¹.

A livello tecnologico, la ricerca e sviluppo si sta orientando verso la modulazione del processo di gassificazione. I sistemi modulari sono applicabili per potenze superiori a 50 kWe. È in atto un cambiamento del processo per la separazione dei catrami (tar): sono perfezionati i sistemi per l'ampliamento delle zone di alta temperatura (zona di ossidazione) per aumentare sia la qualità del Syngas stesso che il potenziale della separazione dei catrami.

I principali nodi critici da affrontare risultano quindi: garantire uniformità nella pulizia del gas e nell'esercizio del gassificatore al fine di garantire uniformità all'alimentazione del motore di generazione di energia elettrica. Risultano pertanto questi gli aspetti approfonditi nella presente attività di ricerca.

¹ FIPER Ing. Gerd Huber - Syneco Consulting "Potenzialità, prospettive e rischi della gassificazione della biomassa"

3 L'impianto GESSICA

GESSICA è un impianto sperimentale dedicato allo studio e la sperimentazione dei processi di gassificazione, di produzione di gas naturale sintetico dal carbone/biomasse e la sua implementazione nel settore del "Power to gas". L'impianto Gessicca è dotato di un gassificatore a letto fisso del tipo updraft e di una sezione di trattamento e upgrading del syngas. L'impianto è alloggiato su uno skid e conseguentemente facilmente trasportabile, inoltre ciascuna sezione di cui è composto può essere testata singolarmente. Questo permette una sua modularità e la possibilità di effettuare test su più tipologie di processi, verificandone la fattibilità separatamente prima di testare l'intero processo.

Conseguentemente presso l' Gessicca si possono svolgere differenti test quali:

- Test dei processi di gassificazione con differenti tipologie di combustibili in configurazione sia updraft che downdraft
- Test di differenti processi e tecnologie di abbattimento del tar
- Test di differenti sorbenti per la desolforazione a caldo
- Test di differenti catalizzatori per la metanazione
- Test di differenti tecnologie di upgrading del SNG (es. membrane)

3.1 Descrizione della facility

L'impianto Gessicca [4] include un gassificatore a letto fisso del tipo updraft alimentato ad aria e/o O₂ con una potenza teorica di 70-80 kWt. L'impianto (Figura 3) è caratterizzato dal fatto di essere alloggiato su di uno skid mobile, il cui ingombro ricade all'interno della sagoma standard trasportabile su di un camion. Il sistema è equipaggiato di un gassificatore refrattariato a letto fisso, di uno scrubber per la pulizia del syngas, di un reattore di desolforazione, di un reattore di shift, di tre reattori di metanazione che effettuano la conversione del syngas in gas naturale sintetico e di una torcia di smaltimento del gas prodotto. Il gassificatore di tipo updraft è dotato di un sistema di carico e scarico che permette di operare in continuo.



Figura 3. Impianto di produzione di gas sintetico 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. Un sistema a doppia ghigliottina permette di caricare il reattore isolando l'ambiente di reazione dall'ambiente di stoccaggio della carica. Un sistema ausiliario alimentato elettricamente provvede alla produzione del vapore necessario al processo. L'estrazione delle ceneri è resa possibile da una griglia mobile posizionata sul fondo.

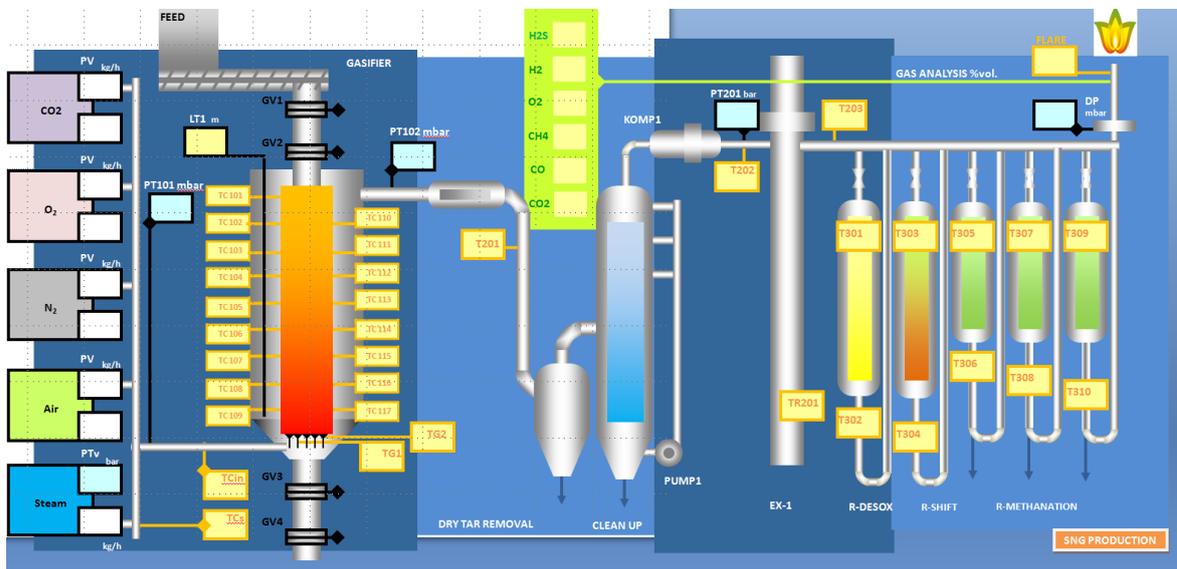


Figura 4. Sinottico del sistema di acquisizione e controllo dell’impianto GESSICA

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. Al fine di controllare il profilo di temperatura lungo il letto del reattore, il gassificatore è stato equipaggiato di termocoppie di tipo K alloggiato frontalmente e posteriormente sui due lati del mantello del reattore (Figura 5).

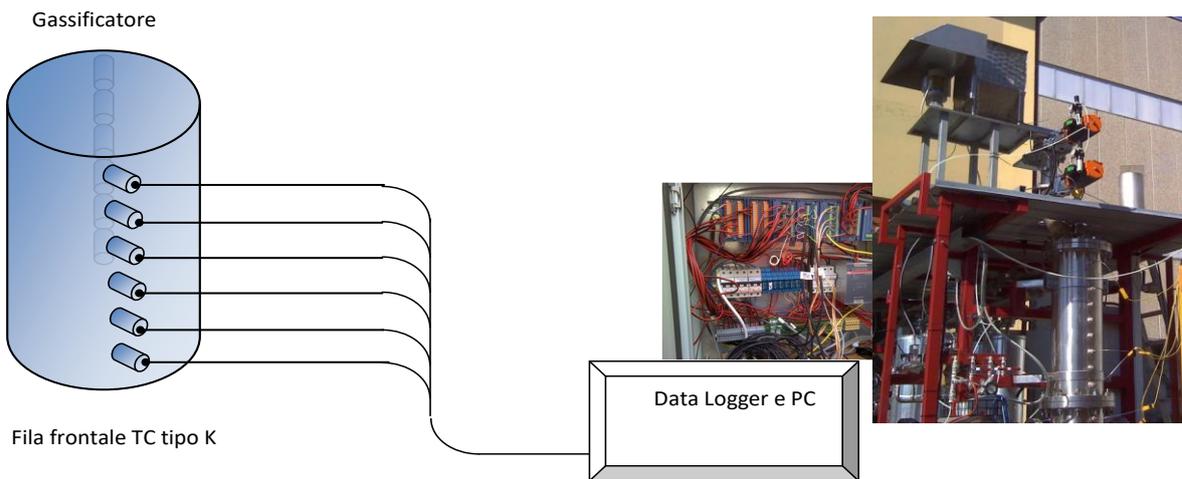


Figura 5. Schema delle termocoppie alloggiate longitudinalmente sul reattore

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 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.

La Figura 4 mostra uno schema di massima del complessivo della sezione di trattamento del syngas a valle del gassificatore. All'interno dei reattori di conversione si va ad operare una trasformazione del syngas in un gas di maggiore qualità attraverso un processo di natura catalitica.

Il reattore di desolfurazione è un reattore tubolare dotato di griglia di sostegno del letto di sorbente e dotato di sistemi compensazione delle dilatazioni dovute all'aumento non uniforme di temperatura.

Il reattore è altresì equipaggiato con un coibente atto a mantenere il sistema autotermico data l'endotermicità della reazione di desolfurazione generalmente operata su sorbenti commerciali a base di zinco. A valle, un reattore a letto fisso è sede della trasformazione di Water Gas Shift (WGS). Anche questo è provvisto di coibente utile ad evitare di disperdere il calore verso l'esterno. Sui fondelli superiore ed inferiore sono inserite una serie di bocchelli per l'immissione e l'uscita del gas e per il monitoraggio della temperatura interna.

Seguono tre reattori tubulari con mantello esterno dove avviene la reazione di metanazione, dotati di bocchelli idonei ad alloggiare le termocoppie per monitorare il processo dal punto di vista termico e di punti di prelievo del gas tra un reattore e l'altro per seguire attraverso la misura della composizione come procede il processo di conversione in metano. Uno scaricatore di condensa è stato inserito a valle di ciascun reattore per eliminare l'acqua prodotta.

3.2 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.

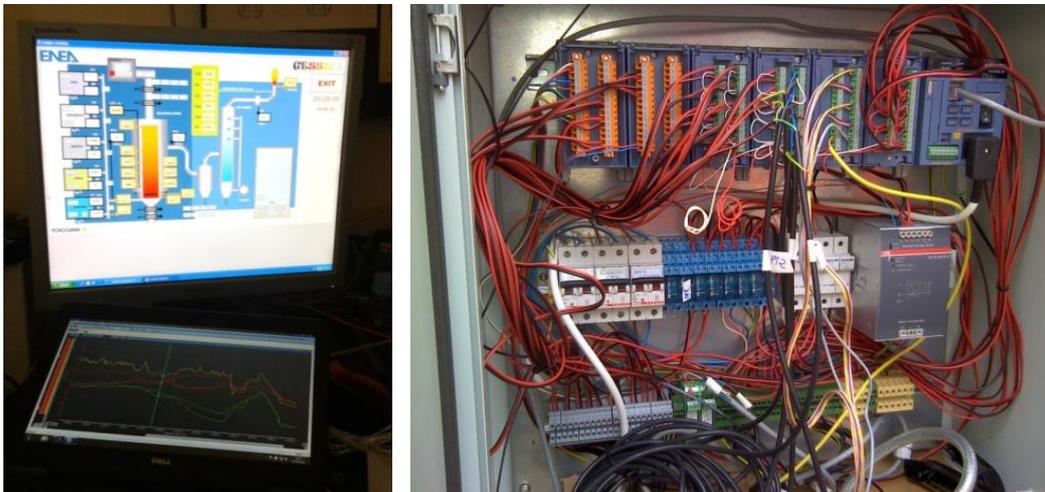


Figura 6. Dettaglio quadro elettrico di acquisizione dati

Come riportato nella Figura 6, 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.

3.3 Analisi del gas

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.

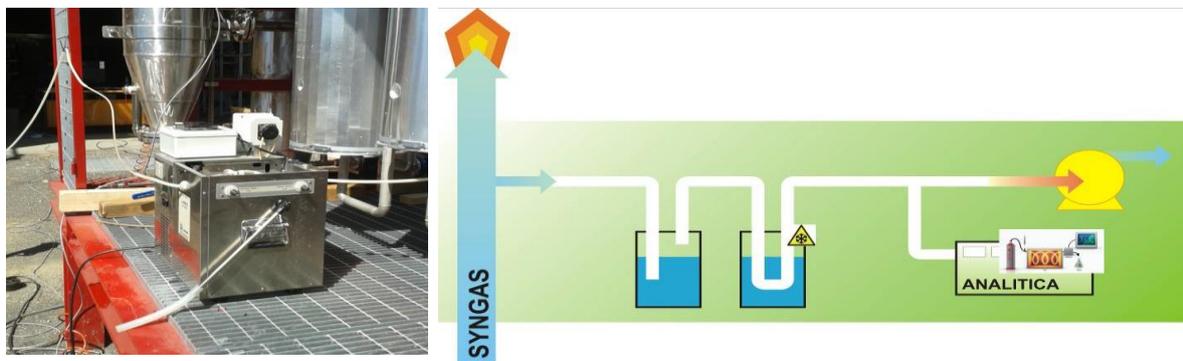


Figura 7. Schema della linea di campionamento e gruppo frigo

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 5.

Le trappole fredde sono alloggiati all'interno di un gruppo frigo, mostrato in Figura 7, 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.

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 8).

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.



Figura 8. Analitica modulare e sinottico di interfaccia con l'operatore

4 Attività sperimentale

I primi test a caldo hanno contemplato l'accensione del gassificatore e una prima verifica di tutta la componentistica e dei sistemi di misura.

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 degli input di ingresso quali la tipologia di agenti gassificanti e la tipologia di carbone utilizzato.

Tabella 2. Analisi elementare ed immediata della biomassa utilizzata

Analisi immediata (su base secca)	
Elemento	Valore (% in peso)
Carbonio fisso (CF)	14,4
Materia volatile (VM)	85
Ceneri (ASH)	0,6
Analisi elementare (su base secca)	
Elemento	Valore (% in peso)
C	45,5
H	6,6
O	47,7
N	-
S	-
CENERI	0,2
PCI	5,3 kWh/kg
Diametro	6 mm

Durante le prove si è monitorato in continuo i principali parametri di processo quali portate degli agenti gassificanti, temperature all'interno del gassificatore, pressioni e composizione del gas uscente. Monitorando le temperature, registrate dalle termocoppie poste lungo l'altezza del reattore di gassificazione, si è agito sulla portata degli agenti gassificanti in modo tale da portare il processo in condizioni stazionarie e parallelamente evitare picchi di temperatura.

Una termocoppia posizionata sulla torcia ha inoltre fornito l'informazione sulla presenza o meno della fiamma.



Figura 9. Pellet di pino utilizzato nel test di gassificazione

Il combustibile utilizzato in un primo test è stato il pellet di pino le cui proprietà sono riportate in tabella 2. Il test ha visto susseguirsi le differenti fasi: dallo start up, che ha consentito al gassificatore di portarsi nelle condizioni ottimali per la successiva fase di gassificazione; si è quindi passati alla fase di gassificazione che si è mantenuta raggiungendo le condizioni stazionarie, per poi nella fase finale del test. spegnere il processo lentamente in ambiente di azoto.

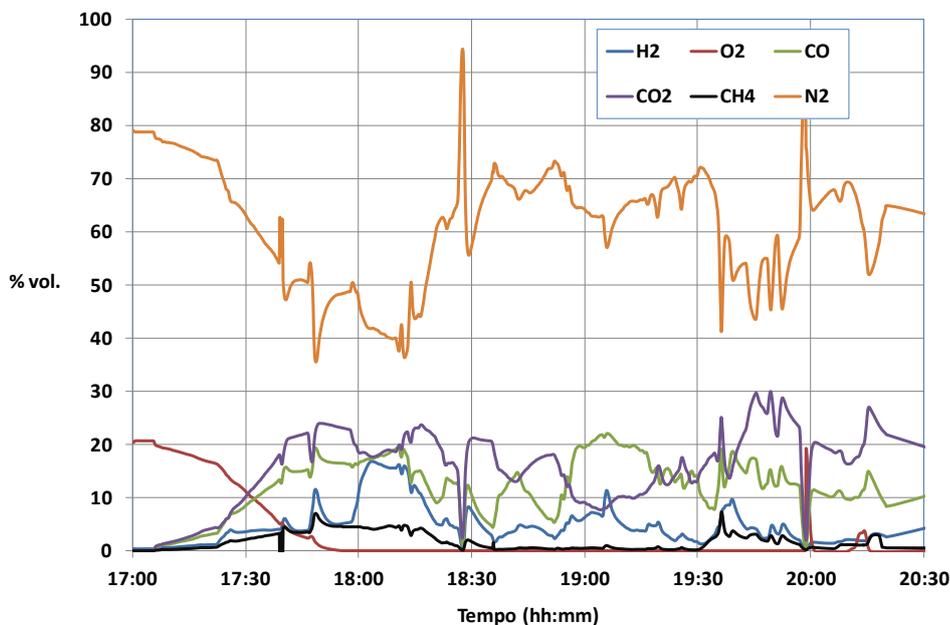


Figura 10. Andamento temporale della composizione del syngas nei suoi principali componenti

In figura 10 è illustrato l’andamento temporale della composizione del syngas nei suoi principali componenti, nelle differenti fasi della prova sperimentale. Come si evidenzia dal grafico 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 che oscilla tra il 5% e il 15%vol., di CO leggermente al di sopra del 10% vol. e della CO₂ compresa tra il 10% e il 20% vol. A conferma di una buona qualità del syngas la fiamma della torcia si è mantenuta stabile durante tutto il test. Il PCI del syngas si è mantenuto nel range tra 5-10 MJ/Nm³.



Figura 11. Soffiante utilizzata nella fase di start up dell’impianto e vista dell’impianto durante un test

Nella Figura 12 sono invece indicate per ciascuna fase dell'avviamento i profili di temperatura per ciascuna fila di termocoppie lungo le due direttrici del gassificatore (frontale e posteriore)

Alla prima situazione, relativa all'avviamento corrispondono temperature abbastanza limitate in prossimità del fondo del reattore che vanno poi a degradare verso l'alto. La temperatura del gas in uscita è all'incirca intorno ai 30°C. Il profilo delle temperature per la fila frontale presenta il tipico andamento a naso.

La situazione riportata dall'immagine successiva è invece relativa all'inizio della fase della gassificazione. Il massimo della temperatura (circa 350°C) si ha in una zona posta abbastanza al di sopra della griglia, la stratificazione delle temperature non è perfetta in senso radiale indice della presenza di zone a reattività maggiore. La temperatura della parte alta del letto si attesta intorno ai 60°C.

La terza immagine è invece relativa ad una raggiunta condizione di sufficiente stazionarietà in cui la zona ad alta temperatura si attesta intorno a valori di 700°C interessa gran parte del letto con una stratificazione delle temperature abbastanza omogenea nella parte bassa del reattore. Con il passare del tempo il profilo a naso presenta un innalzamento della temperatura più alta che corrisponde ad uno spostamento del processo di gassificazione verso zone più alte. La quarta figura mostra invece la fase di inizio spegnimento con le temperature nella parte bassa del reattore in calo.

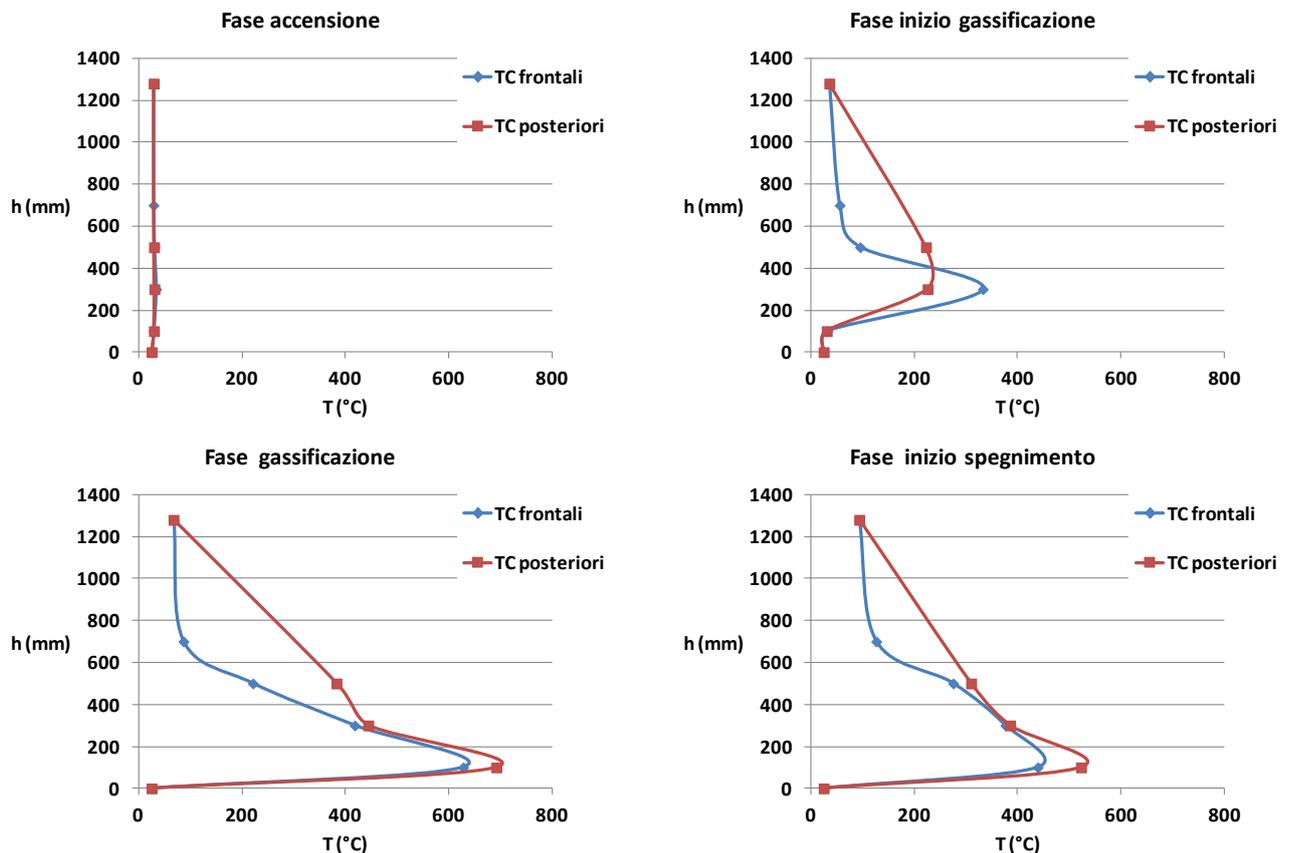


Figura 12. Impianto Gessyca: andamento delle temperature durante l'avviamento

In particolare come atteso si è notata una significativa produzione di tar che ha richiesto una differente procedura per il campionamento del syngas dato l'aumento di condensa nella linea di campionamento.



Figura 13. Particolare del prelievo del gas con predisposizione per la raccolta del tar

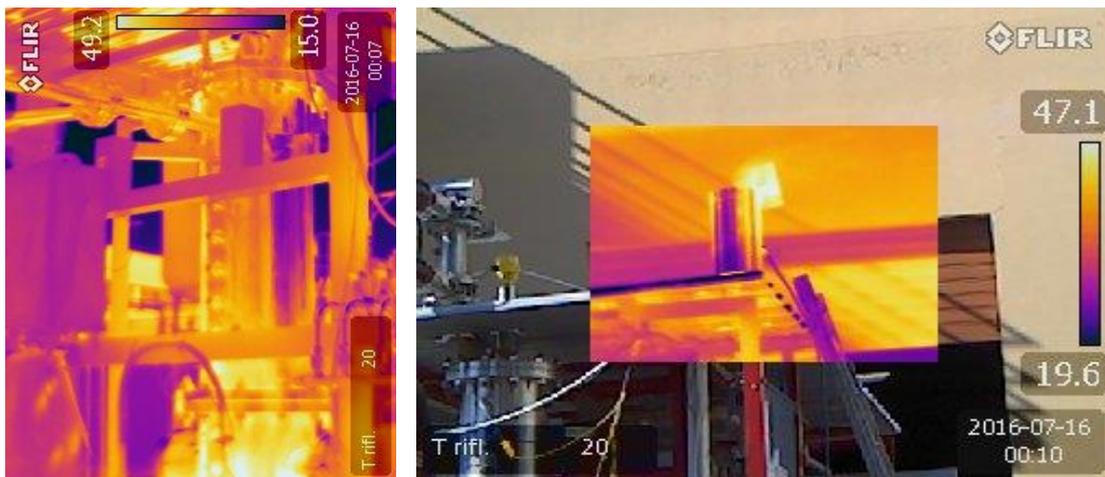


Figura 14. Immagine termografica con dettaglio di gassificatore e torcia

L'approfondimento degli aspetti tecnologici e sperimentali del processo proseguirà per definire le differenti problematiche legate all'esercizio dei gassificatori alimentati a biomassa con particolare attenzione ai sistemi di abbattimento dei tar.



Figura 15. Sinottico durante un test e vista lato gassificatore dell'impianto

5 Sperimentazione sul reattore di reforming ossidativo del tar

Tra le barriere di natura tecnologica caratteristiche della tar necessaria al funzionamento in continuo del processo. Per poter studiare l'abbattimento di tali composti per via termica/catalitica l'impianto Gessyca è stato dotato di un reattore su cui testare il processo di reforming ossidativo dei tar. Tale processo di conversione del tar in gas leggeri è di tipo endotermico ed ha luogo ad alte temperature su riempimenti solidi tipo allumina o su catalizzatori. Al fine di studiare preventivamente le dinamiche di riscaldamento e le reazioni di conversione e di parziale ossidazione con il singolo componente in "isola" è stato allestito uno skid, con alloggiato il reattore e tutto il set up sperimentale comprendente bruciatore addizionale, estrattore fumi, sensoristica industriale e sistema di acquisizione e controllo con hardware e software appositamente progettato e realizzato per i test. (Figura 16).

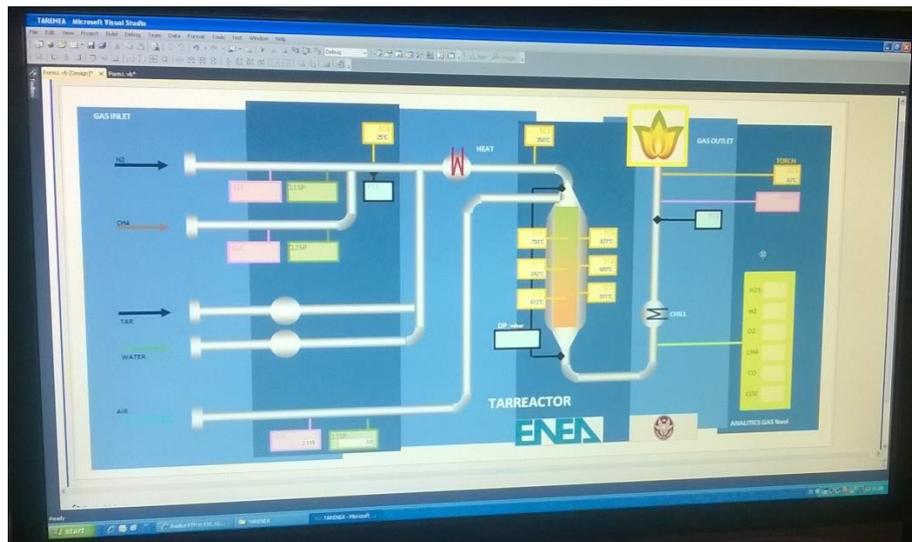


Figura 16. Sinottico ad hoc sviluppato per il test del reattore del tar

Tale set-up permette di emulare le condizioni di funzionamento del reattore di abbattimento tar in modo da poter studiare le dinamiche del transitorio di riscaldamento iniziale del reattore fino a circa 750°C, temperatura di esercizio del processo, e la fase di esercizio durante la quale avvengono le reazioni di reforming del tar e di parziale ossidazione del syngas (Figura 17 e 18).



Figura 17. Set up di studio e sperimentazione del processo di reforming del tar

Il syngas viene alimentato mediante una serie di linee gas che, dotate di misuratori/controllori di portata, possono riprodurre la composizione di gas desiderata. Il tar viene emulato mediante un composto liquido, quale il toluene, che alimentato da una pompa insieme all'acqua viene miscelato al gas. La corrente viene successivamente preriscaldata alla temperatura necessaria a far vaporizzare il componente liquido ed inviata nel reattore dove avvengono le reazioni di reforming e di parziale ossidazione.



Figura 18. Immagine del riempimento in alluminia del reattore e del set up allestito

Il reattore è dotato di un ingresso d'aria secondaria che permette di regolare la temperatura all'interno del riempimento, mediante la parziale combustione del syngas. La procedura di prova prevede un iniziale fase di start up nella quale il letto di riempimento viene portato in temperatura, seguita da una fase di funzionamento nominale, durante la quale si alimenta il syngas emulato insieme al tar e si regola il livello di temperatura ($T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$), all'interno del reattore, agendo sulla portata di aria.

La prima fase dell'attività ha visto lo svolgimento di una serie di test di studio e sperimentazione della fase di start up del processo, allestendo un bruciatore interno al reattore ed un sistema di tiraggio che ha permesso il raggiungimento della temperatura idonea all'avvio del processo di reforming all'interno del letto di allumina. La Figura 19 riporta l'andamento delle temperature durante un test della fase di riscaldamento, si evidenzia come si è riusciti con un tempo di circa un'ora a portare il letto di allumina a temperature superiori ai valori di innesco delle reazioni di reforming. Il letto inoltre dopo un iniziale fase di avviamento presenta un profilo termico lungo l'altezza quasi costante.

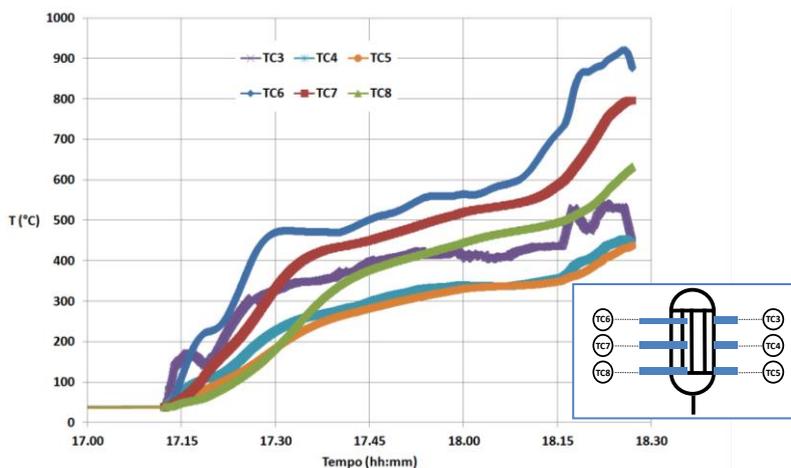


Figura 19. Andamento delle temperature durante la fase di riscaldamento del reattore

Tale attività proseguirà con un approfondimento delle attività di sviluppo di un bruciatore dedicato, con test sperimentali su diversi riempimenti con o senza catalizzatori, al fine di trasferire il processo e le competenze acquisite nel progetto di un componente, da installare presso impianti di scala maggiore.

6 Conclusioni

L'esperienza maturata durante le campagne sperimentali svolte nel corso delle precedenti annualità ha consentito la modifica ed il miglioramento di attrezzature ed impianti che a partire dalla gassificazione delle biomasse consentono di produrre energia elettrica.

Anche in questa annualità lo sviluppo delle attività sulla gassificazione delle biomasse e sul trattamento del syngas effluente ha avuto proseguito presso il Centro Ricerche ENEA di Casaccia. Tra i risultati più importanti si annoverano i primi test di sperimentazione a caldo sull'impianto GESSICA di produzione di gas naturale sintetico. L'impianto presenta il vantaggio di essere allocato su skid mobile, di essere equipaggiato di più sezioni di conversione e pulizia del syngas che ne permettono una completa versatilità nel testare differenti processi di conversione del syngas in prodotti ad maggiore valore aggiunto. I primi test a caldo hanno visto l'accensione del gassificatore alimentato a pellet di pino e una prima verifica di tutta la componentistica e dei sistemi di misura.

Il syngas prodotto è risultato di buona qualità con una composizione tipica dei gassificatori updraft e con un PCI che si è mantenuto nel range tra 5-10 MJ/Nm³.

Tra le barriere di natura tecnologica caratteristiche della gassificazione di particolare importanza risulta l'opportuna pulizia del syngas dal suo contenuto in tar necessaria al funzionamento in continuo del processo. Per poter studiare l'abbattimento di tali composti per via termica/catalitica l'impianto Gessyca è stato dotato di un reattore su cui testare il processo di reforming ossidativo dei tar. Tale processo di conversione del tar in gas leggeri è di tipo endotermico ed ha luogo ad alte temperature su riempimenti solidi tipo allumina o su catalizzatori.

Al fine di studiare preventivamente le dinamiche di riscaldamento e le reazioni di conversione e di parziale ossidazione con il singolo componente in "isola" è stato allestito uno skid con alloggiato il reattore e tutto il set up sperimentale comprendente bruciatore addizionale, estrattore fumi, sensoristica industriale e sistema di acquisizione e controllo con hardware e software appositamente progettato e realizzato per i test. La prima fase dell'attività ha visto lo svolgimento di una serie di test di studio e sperimentazione della fase di start up del processo, allestendo un bruciatore interno al reattore ed un sistema di tiraggio che ha consentito al letto di allumina di portarsi alla temperatura idonea all'avvio del processo di reforming.

Tale attività proseguirà con un approfondimento delle attività di sviluppo di un bruciatore dedicato, con test sperimentali su diversi riempimenti con o senza catalizzatori al fine di trasferire il processo e le competenze acquisite nel progetto di un componente, abbattitore del tar da installare presso impianti di scala maggiore

In prospettiva l'obiettivo dell'attività è quello di sviluppare procedure automatiche di conduzione ed esercizio di un impianto di gassificazione, nonché individuare le condizioni operative per un regime stazionario e stabile. Il fine ultimo sarà quello di realizzare una facility di piccola scala facilmente modulabile di gassificazione e produzione di energia elettrica da biomasse.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] Debora Del Ferraro “Analisi e modellazione di un impianto di co-gassificazione di carbone e biomasse”
Tesi di Laurea Magistrale
- [2] Rohan F., Coal gasification, Rapporto tecnico IEA CCC/140, March 2008, IEA Clean Coal Centre ISBN 978-92-9029-459-7
- [3] E. Kurkela, E StShlberg, R Simell, J. Leppilahti "Updraft Gasification of Peat and Biomass" Biomass 19 (1989) 37-46
- [4] C. Bassano, P. Deiana, A. Assettati, M. Subrizi First experimental results of coal gasification tests on small scale plant" CCT 2011- Fifth International Conference on Clean Coal Technologies Paper 70316 8-12 May 2011, Zaragoza, Spain
- [5] P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano “Tecnologie avanzate di gassificazione” Report RdS/PAR2013/294

8 Abbreviazioni ed acronimi

GESSICA	GEneratore Sperimentale di Singas da Carbone
PCI	Potere Calorifico Inferiore
TC	Termocoppia
WGS	Water Gas Shift