



Ricerca di Sistema elettrico

Attività di modifica e sperimentazione sugli impianti di gassificazione

G.Cali, F.Tedde, P.Miraglia, D.Marotto, P.Deiana, C.Bassano



ATTIVITÀ DI MODIFICA E SPERIMENTAZIONE SUGLI IMPIANTI DI GASSIFICAZIONE

G.Cali, F.Tedde, P.Miraglia, D.Marotto (Sotacarbo)
P. Deiana, C. Bassano (ENEA)

Gennaio 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Progetto: *Tecnologie e metodologie low carbon e Edifici a energia quasi zero (nZEB) – I16C18000200001*

Parte A: Tecnologie per l'impiantistica energetica 'low carbon'

Tema A: Impianti ad emissione negativa: Gassificazione e co-gassificazione di biomasse per lo sviluppo di piccoli sistemi energetici e trattamento del syngas e utilizzo della CO₂

Sottotema a.3: Gassificazione e co-gassificazione di biomasse per la produzione di syngas e suo utilizzo per la produzione di energia elettrica

Responsabile del Progetto: dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Tecnologie e metodologie Low Carbon e Edifici ad energia quasi zero (nZEB)*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Indice

1	L'IMPIANTO DIMOSTRATIVO SOTACARBO	6
1.1	IL REATTORE DI GASSIFICAZIONE	6
1.2	SCRUBBER E SISTEMI DI SCARICO E STOCCAGGIO REFLUI.....	10
1.3	SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO DELL'IMPIANTO.....	11
1.4	SISTEMA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI.....	11
1.4.1	<i>Composizione del gas</i>	11
2	OBIETTIVI DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE (GABRIELE).....	12
2.1	OBIETTIVI SPECIFICI DEI TEST SPERIMENTALI	12
2.2	COMBUSTIBILI IMPIEGATI	13
2.3	CARATTERIZZAZIONE DELLE BIOMASSE	14
2.3.1	<i>Analisi immediata</i>	14
2.3.2	<i>Analisi elementare</i>	14
2.3.3	<i>Determinazione del potere calorifico</i>	14
2.3.4	<i>Sistema di campionamento TAR</i>	15
3	PROCEDURE OPERATIVE DEL PROCESSO DI GASSIFICAZIONE.....	17
3.1	VERIFICHE E AVVIAMENTO DELLE APPARECCHIATURE AUSILIARIE	17
3.2	FASE DI START-UP	17
3.2.1	<i>Caricamento iniziale del reattore</i>	17
3.2.2	<i>Accensione del letto combustibile</i>	18
3.2.3	<i>Analisi Syngas</i>	18
3.3	FASE OPERATIVA.....	18
3.4	FASE DI SHUT-DOWN	19
4	MODIFICHE DI IMPIANTO ESEGUITE SULL'IMPIANTO DIMOSTRATIVO	20
4.1	MODIFICHE DEL PIPING DI CARICAMENTO DEL COMBUSTIBILE	20
5	TEST SPERIMENTALI DI GASSIFICAZIONE	24
5.1	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI CO-GASSIFICAZIONE DEL 22-23/11/18	24
5.2	ANALISI DATI SPERIMENTALI OTTENUTI DAI TEST DI GASSIFICAZIONE DEL 11-12/12/2018	26
6	CONCLUSIONI.....	28
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	29

Sommario

Il presente documento riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test di gassificazione effettuati nel corso delle campagne sperimentali sull’Impianto Dimostrativo Sotacarbo nel periodo Ottobre – Dicembre 2018. Nel rapporto sono illustrate le modifiche principali effettuate che hanno riguardato principalmente il piping del sistema di caricamento del combustibile. Successivamente sono stati effettuati due test sperimentali necessari alla verifica delle modifiche effettuate.

I test sperimentali effettuati sono stati due, tutti orientati alla valutazione dell’impianto esercito con un mix di biomasse legnose (cipresso, pino ed eucalipto) al 90% e di carbone al 10%:

Durante lo svolgimento dei test sperimentali è stata ottimizzata la funzionalità delle varie sezioni dell’impianto in previsione di un suo sviluppo commerciale.

Introduzione

I test sperimentali di gassificazione effettuati nel periodo Ottobre-Dicembre 2018, hanno consentito di verificare il funzionamento e le prestazioni dell'impianto dimostrativo Sotacarbo e di studiare il processo di gassificazione con un mix di cippato di legna vergine (90%) e Carbone Colombiano (10%).

Il rapporto fornisce una sintesi dei principali risultati ottenuti nei test sperimentali di gassificazione effettuati.

In particolare il documento è stato articolato come segue:

- nel primo capitolo è riportata una descrizione sintetica dell'impianto dimostrativo;
- nel secondo capitolo sono riportati i principali obiettivi dei test di gassificazione, l'organizzazione della campagna sperimentale e le caratteristiche dei combustibili impiegati;
- nel terzo capitolo sono descritte le procedure operative adottate nel corso dei test;
- nel quarto capitolo sono riportate le principali modifiche all'impianto dimostrativo e la valutazione dei dati sperimentali ottenuti;
- nel quinto capitolo sono riportati i confronti fra i dati ottenuti per la sperimentazione in oggetto;
- nel sesto capitolo sono riportate le conclusioni sulle attività svolte e gli sviluppi futuri per l'ottimizzazione dell'impianto dimostrativo.

1 L'impianto Dimostrativo Sotacarbo

L'impianto è costituito, in estrema sintesi, da:

- una sezione di gassificazione,
- un sistema di Clean-up (Scrubber) in equi-corrente,
- una torcia.

1.1 Il reattore di gassificazione

Il gassificatore dimostrativo della piattaforma Sotacarbo è costituito da un reattore a letto fisso up-draft, alimentato ad aria e progettato per operare a pressione pressoché atmosferica.

Il reattore, sviluppato per gassificare differenti tipologie di carbone e biomasse, è stato utilizzato per effettuare test di gassificazione di biomasse legnose e co-gassificazione di carbone e biomasse.

Il gassificatore ha un diametro interno di 1300 mm e un'altezza complessiva pari a 2800 mm; l'altezza massima del letto di combustibile può arrivare a circa 2400 mm. Il combustibile viene introdotto nel gassificatore attraverso una tramoggia posta sulla sua parte superiore, a cui segue un condotto con forma a Y integrato da tre ghiottine atte alla gestione della tempistica del caricamento.

Il combustibile viene caricato sulla tramoggia attraverso l'utilizzo di un sistema di caricamento automatico con trasportatore a catena "Redler" visibile in Figura 1. Il sistema è dotato di una tramoggia inferiore nella quale viene caricato il materiale (attraverso l'utilizzo di un muletto) e di una tramoggia superiore dotata di quattro celle di carico con fondoscala di 150 kg; la tramoggia superiore è quindi in grado di misurare carichi fino a 600 kg.



Figura 1. Sistema di caricamento automatico del combustibile "Redler"

Il gassificatore, visibile in Figura 2, al suo interno ha delle pareti in acciaio raffreddate tramite una camicia dove circola dell'acqua. Il sistema di raffreddamento del gassificatore è completato da un corpo cilindrico superiore e da un condensatore ad aria con flusso forzato. Il profilo termico all'interno del gassificatore è monitorato con l'ausilio di 36 termocoppie posizionate su sei livelli differenti delle pareti del reattore. Su ogni livello sono presenti sei termocoppie a 60° l'una dall'altra (vedi Tabella 1). Si riporta di seguito un'immagine del gassificatore e una tabella rappresentante la disposizione delle termocoppie rispetto all'altezza (espressa in mm) del gassificatore stesso.



Figura 2. Gassificatore impianto dimostrativo

Tabella 1. Posizionamento termocoppie

Altezza						
2700	TIT – 189P/PV	TIT – 183P/PV	TIT – 177P/PV	TIT – 171P/PV	TIT – 165P/PV	TIT – 159P/PV
1250	TIT – 188P/PV	TIT – 182P/PV	TIT – 176P/PV	TIT – 170P/PV	TIT – 164P/PV	TIT – 158P/PV
800	TIT – 187P/PV	TIT – 181P/PV	TIT – 175P/PV	TIT – 169P/PV	TIT – 163P/PV	TIT – 157P/PV
650	TIT – 186P/PV	TIT – 180P/PV	TIT – 174P/PV	TIT – 168P/PV	TIT – 162P/PV	TIT – 156P/PV
500	TIT – 185P/PV	TIT – 179P/PV	TIT – 173P/PV	TIT – 167P/PV	TIT – 161P/PV	TIT – 155P/PV
350	TIT – 184P/PV	TIT – 178P/PV	TIT – 172P/PV	TIT – 166P/PV	TIT – 160P/PV	TIT – 154P/PV
	Nord Est	Nord	Nord Ovest	Sud Ovest	Sud	Sud Est
Disposizione	300°	0°	60°	120°	180°	240°
ENEA	6	1	2	3	4	5
Sotacarbo	A	B	C	D	E	F

Il letto di combustibile poggia sopra una griglia metallica che consente lo scarico delle ceneri attraverso un sistema composto da più piani concentrici come mostrato nella Figura 3.



Figura 3. Parte esterna della griglia del gassificatore dimostrativo

La fase di accensione avviene tramite l'ausilio di sei irradiatorii ceramici da 800 W disposti in maniera circolare ad una altezza di 500 mm dal fondo del reattore, dove è stato posizionato lo strato di carbone vegetale. Si riporta di seguito la sezione del gassificatore dove viene indicato il posizionamento degli irradiatorii:

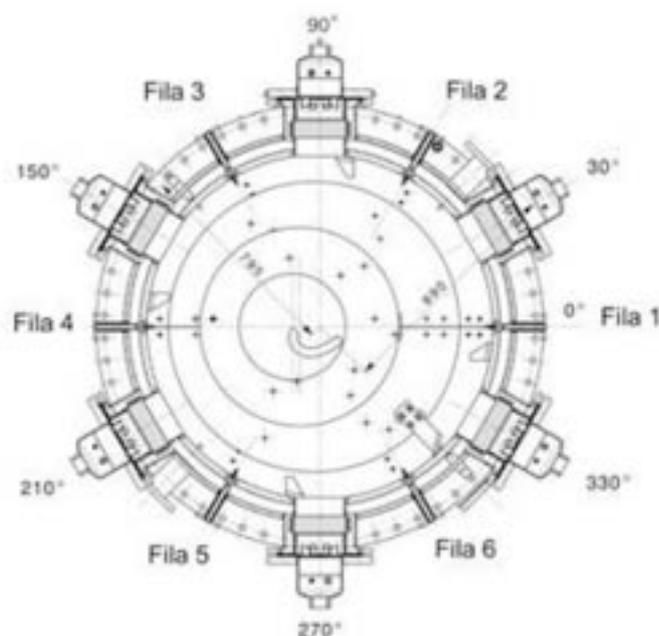


Figura 4. Sezione del gassificatore: posizione degli irradiatorii di accensione

Come si può notare dalla Figura 4 i sei irradiatorii ceramici ad infrarosso sono disposti a 60° l'uno dall'altro, hanno dimensioni 125mm X 125mm e sono dotati di termocoppia interna di tipo K (0-1000 °C). L'irradiatore è inserito in un involucro metallico (lampada), montato sul gassificatore.

Gli irradiatorii sono alimentati da tre SCR monofase della potenza di 2 kW con controllo dell'energia elettrica erogata da sistema di regolazione e controllo in relazione al set point di temperatura impostata; ciascun SCR comanda una coppia di lampade.

Il gassificatore, possiede un sistema di movimentazione del letto (Stirrer) inter-refrigerato, visibile in Figura 5. Esso è costituito principalmente da:

- un albero verticale cavo (per poter effettuare il raffreddamento con circolazione d'acqua);
- un'asta perpendicolare posta all'estremità inferiore dell'albero dotata di rostri per effettuare il mescolamento del letto;
- un pistone oleodinamico dotato di centralina che permette al pistone di traslare verticalmente;
- un motore di rotazione con una cella di carico per stimare la resistenza alla rotazione stessa.

Nella Figura 5 è riportata un'immagine dello stirrer, nella stessa figura si notano i motori di rotazione e traslazione insieme al sistema che collega lo stirrer al pistone oleodinamico.



Figura 5. Stirrer

Il campo d'azione dello stirrer varia da quota 1400 mm fino a quota 2400 mm del reattore di gassificazione e la sua traslazione verticale è effettuata tramite un pistone oleodinamico comandato da una centralina di immissione dell'olio.

Il sistema di raffreddamento detto Steam Drum, visibile in Figura 6, ha la capacità di dissipare 500 kW termici (in condizioni di progetto) corrispondenti ad una portata massima di 800 kg/h di vapore con salto termico di circa 50 °C (da 100 °C a circa 50-70 °C).



Figura 6. Steam Drum

Il gassificatore è dotato dei seguenti sistemi ausiliari:

- sistema di produzione e adduzione aria processo;
- sistema di produzione e adduzione vapore;
- sistema di stoccaggio e adduzione azoto.

Gli agenti gassificanti necessari al funzionamento del gassificatore sono aria processo e vapore, generati rispettivamente da una soffiante con una portata massima di 1100 m³/h e da due caldaie in grado di produrre una portata pari a 250 kg/h ognuna, ad una pressione di 4 bar.

Considerato che la pressione massima di esercizio del gassificatore è pari a 0,5 barg (pressione relativa), lungo la linea vapore, a monte del gassificatore, è presente una valvola di laminazione che consente di ridurre la pressione fino al valore desiderato.

1.2 Scrubber e sistemi di scarico e stoccaggio reflui

Lo scrubber, visibile in Figura 7, ha lo scopo di effettuare un lavaggio del syngas tramite un flusso d'acqua equi corrente immesso mediante tre ugelli conici. Gli ugelli sono di tipo a cono pieno e sono stati posizionati su tre rampe sovrapposte. Lo scrubber svolge anche la funzione di guardia idraulica anti ritorno di fiamma. Il syngas in uscita attraversa un demister costituito da 8 dischi forati sovrapposti al fine di eliminare l'acqua eventualmente trascinata. Il TAR separato dal syngas confluisce nella parte conica inferiore dello scrubber; da dove viene rimosso mediante una pompa monovite. Il volume di acqua contenuto nello scrubber è di 6 m³; che unito a quello del contenitore di accumulo (successivamente descritto), consente di avere un discreto volano termico e di mantenere efficiente il potere lavante dell'acqua, evitando fenomeni repentini di saturazione sia in rapporto all'acidità cloridrica sia alla concentrazione salina. La vasca di accumulo ha un volume di 6 m³ ed è collegata allo scrubber mediante una tubazione; internamente è divisa da due setti che fungono da barriere per il trattenimento dell'eventuale frazione saturante o di quella sedimentabile. La vasca di accumulo ha nella parte bassa una valvola per lo scarico dei sedimenti, inoltre è dotata di una presa di reintegro dell'acqua evaporata durante il lavaggio del syngas e dell'acqua scaricata come refluo che viene poi rinviato ad un sistema di trattamento dei reflui prodotti. L'acqua proveniente dalla vasca di accumulo viene rilanciata agli ugelli di lavaggio tramite delle pompe. A monte delle pompe si trova un sistema di filtri che ha il compito di proteggere le pompe stesse. Si riportano di seguito due immagini: una relativa allo scrubber.



Figura 7. Scrubber

1.3 Sistema di regolazione e controllo dell'impianto

L'impianto è dotato di una serie di strumenti che consentono di monitorare, in modo continuo, i principali parametri del processo: pressioni, portate e temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto, nonché i profili termici all'interno del reattore. Tali valori vengono monitorati tramite un sistema di regolazione e controllo (SRC) che li acquisisce attraverso un segnale di tipo elettrico (4-20 mA) e li registra tenendoli in memoria. Sulla base di tali parametri l'operatore per via manuale o in automatico (tramite sequenze già impostate) è in grado di intervenire sull'impianto al fine di modificarli. In particolare, il sistema di regolazione e controllo permette di azionare e movimentare: valvole pneumatiche di regolazione e ON-OFF, pistoni pneumatici e oleodinamici, compressori, pompe, motori, inverter. Attraverso tali operazioni l'operatore può regolare e controllare tutti i parametri dell'impianto durante il suo funzionamento.

1.4 Sistema di campionamento e analisi

A supporto delle sperimentazioni, l'impianto è dotato di una serie di strumenti che consentono di monitorare, in modo continuo, i principali parametri del processo: pressioni, portate e temperature degli agenti gassificanti e del syngas prodotto, nonché i profili termici all'interno del reattore.

1.4.1 Composizione del gas

La composizione del syngas è misurata principalmente mediante due differenti sistemi:

- un gas cromatografo portatile (Agilent 3000);
- un sistema di analisi in tempo reale (Armadio ABB).

Il gas cromatografo portatile Agilent 3000 viene collegato di volta in volta ai vari punti di campionamento posti a monte e a valle di ciascuna delle sezioni principali dell'impianto. In particolare, il gas cromatografo fornisce una misura, ogni tre minuti circa, della composizione del syngas nelle specie CO₂, H₂, O₂, CO, CH₄, N₂, H₂S, COS, C₂H₆ e C₃H₈.

Infine, il sistema di analisi del gas in tempo reale è costituito da un armadio ABB contenente i seguenti analizzatori gas:

- misura delle concentrazioni di CO, CO₂ e CH₄ tramite modulo URAS26 di tipo IR (raggi infrarossi), con i seguenti campi di misura:
 - CO₂: 0-25% in volume;
 - CH₄: 0-5% in volume;
 - CO: 0-30% in volume;
- misura della concentrazione di H₂ tramite modulo CALDOS 25 di tipo a conducibilità termica, con campo di misura tra lo 0 e il 100% in volume;
- misura della concentrazione di O₂ tramite modulo Magnos 206 di tipo paramagnetico, con campo di misura tra lo 0 e il 25% in volume;
- misura della concentrazione di H₂S tramite modulo Limas 11 di tipo a raggi ultravioletti, con campo di misura tra lo 0 e il 2% in volume.

2 Obiettivi della campagna sperimentale (Gabriele)

La campagna sperimentale svoltasi durante questa annualità sull'impianto dimostrativo Sotacarbo ha avuto come obiettivi:

- Il miglioramento delle procedure di funzionamento dell'impianto, in modo da massimizzare la produzione di Syngas ed aumentare il rendimento dell'impianto in regime stazionario;
- L'analisi quantitativa e qualitativa (effettuata con bilanci di massa, campionamenti e analisi di laboratorio) sui prodotti della gassificazione (Syngas, TAR e ceneri residue);
- I test sul sistema di clean-up ;
- Verifica del funzionamento della modifica del piping di caricamento del combustibile;
- Il miglioramento del sistema di trattamento delle acque reflue, attraverso la caratterizzazione delle stesse e dei sottoprodotti derivati (Fanghi e acque trattate), che ha permesso una diminuzione dei costi di smaltimento.

2.1 Obiettivi specifici dei test sperimentali

Al fine di raggiungere gli obiettivi suddetti, sono stati programmati due test sperimentali di differente durata: 24 e 36 ore, (escluso lo spegnimento), secondo il seguente calendario:

- 22-23/11/2018;
- 11-12/12/2018;

Nella Tabella 2 sono riportate le durate, in ore effettive di funzionamento (fra accensione e stato di regime del gassificatore), dei test sperimentali effettuati nel periodo Ottobre-Dicembre 2018; il conteggio orario non tiene conto dello spegnimento dell'impianto (della durata di circa 8 ore per ciascun test).

Tabella 2. Test sperimentali con biomasse per il periodo Ottobre - Dicembre 2018

<i>Data</i>	<i>Obiettivo principale</i>	<i>Sperimentazione (ore)</i>	<i>Totale ore (Compreso spegnimento)</i>
22-23/11/2018	Gassificazione biomasse-carbone (90%-10%)	24	32
11-12/12/2018	Gassificazione biomasse-carbone (90%-10%)	36	48
	Totale (escluso spegnimento)	60	80

2.2 Combustibili impiegati

Come risulta dalla Tabella 2, i test sperimentali sulla piattaforma pilota sono stati eseguiti con cippato misto di diversa qualità, coadiuvate da una percentuale di carbone pari al 10% in peso. Le biomasse utilizzate sono state caratterizzate presso i laboratori Sotacarbo con differenti strumentazioni e metodi di analisi nel mese di Settembre.

In particolare, sulle biomasse, è stata effettuata l'analisi immediata (mediante termo-gravimetria, TGA), l'analisi elementare (mediante il determinatore CHN/S) e l'analisi calorimetrica per la determinazione del potere calorifico superiore.

La seguente tabella riporta, in sintesi, i risultati delle analisi effettuate sui principali campioni di biomasse presso i laboratori Sotacarbo secondo le metodiche descritte nel paragrafo 3.3.

Tabella 3. Caratterizzazione delle biomasse impiegate nei test, in miscela con il carbone colombiano (2018)

Sample Name	Date	Moisture %	Volatile %	Ash %	Fixed C%	Total C %	H %	N %	O %	HHV MJ/Kg	LHV ₀ MJ/Kg	LHV MJ/Kg
Misto_1	Set	27,69	53,79	3,76	14,76	49,90	5,39	0,79	43,92	17,60	15,78	10,71
Misto_2	Set	26,97	54,55	2,83	15,66	50,45	5,41	0,46	43,68	17,80	15,99	11,00
Misto_3	Set	9,32	68,42	2,56	19,71	51,20	5,49	0,68	42,63	19,64	18,23	16,30
Col. Coal	Gen	4,89	36,39	2,95	55,77	82,10	5,17	1,85	10,88	28,74	27,51	26,04

2.3 Caratterizzazione delle biomasse

Di seguito sono brevemente descritti gli strumenti e le metodologie di analisi impiegate per la caratterizzazione dei combustibili.

2.3.1 Analisi immediata

L'analisi immediata dei combustibili impiegati è stata effettuata mediante un termogravimetro LECO TGA-701, secondo il metodo rispondente alla normativa ASTM D5142 Moisture Volatile Ash, che prevede l'analisi in sequenza di umidità, volatili e ceneri. In accordo con tale metodo, l'analisi dell'umidità è effettuata portando il campione alla temperatura di 107°C, l'analisi della devolatilizzazione avviene a una temperatura di 950°C mentre l'analisi delle ceneri prevede un successivo raffreddamento a 752°C e il cambio del gas di copertura da azoto a ossigeno.

I risultati finali delle analisi immediate, riportati in Tabella 3, sono la media di un'analisi termogravimetrica effettuata su diversi campioni di ciascun combustibile macinati in tempi diversi nel corso della campagna sperimentale.

2.3.2 Analisi elementare

L'analisi elementare dei vari combustibili impiegati nella campagna sperimentale è stata effettuata mediante un determinatore LECO Truspec CHN/S, secondo una procedura appositamente sviluppata dal fornitore dello strumento, su campioni di circa 100 mg.

In particolare, il modulo CHN opera una combustione rapida e completa, con ossigeno, del campione alla temperatura di 950 °C e il contenuto di carbonio, idrogeno e azoto è determinato mediante un'analisi dei gas. D'altra parte, il modulo di determinazione del contenuto di zolfo opera una combustione, sempre con ossigeno, alla temperatura di 1350°C e analizza il contenuto di SO₂ nel gas mediante un rivelatore a infrarossi.

I risultati finali delle analisi, riportati in

Tabella 3, sono la media di un'analisi CHN/S effettuata su diversi campioni di carbone macinati in tempi diversi nel corso dell'intera campagna sperimentale.

2.3.3 Determinazione del potere calorifico

La determinazione del potere calorifico superiore del combustibile è stata effettuata mediante un calorimetro LECO AC-500, secondo il metodo di analisi isoperibolico rispondente alle normative ASTM, ISO, DIN e BSI, su campioni di circa 1 g. Il potere calorifico è determinato misurando la variazione di temperatura di un certo volume d'acqua dovuta alla combustione, in ambiente controllato, del campione di combustibile. Il potere calorifico inferiore del combustibile impiegato è stato calcolato mediante il metodo empirico di Dulong (formula 3.2). In particolare, i poteri calorifici superiore (sul secco) e inferiore (sul secco) possono essere calcolati, rispettivamente, secondo le due seguenti formule (la prima espressa in forma semplificata):

$$PCS_0 [kJ/kg] = 33.950 * X_C + 144.200 * (X_{H_2} - X_{O_2}/8) + 9.400 * X_S \quad (3.1)$$

$$PCI_0 [kJ/kg] = PCS_0 - 9 * X_{H_2} * r \quad (3.2)$$

in cui X_C , X_{H_2} , X_{O_2} , X_S , X_{H_2O} rappresentano rispettivamente le frazioni massiche di carbonio, idrogeno, ossigeno, zolfo e umidità ed r è il calore di condensazione dell'acqua, pari a 2500 kJ/kg.

Nel caso specifico, il potere calorifico superiore è stato, come detto, determinato direttamente mediante una misura calorimetrica, mentre il potere calorifico inferiore è stato determinato mediante la relazione 3.2.

Il potere calorifico inferiore sul tal quale (formula 3.3) è determinato a partire dalla percentuale di umidità presente nel combustibile. L'umidità della biomassa esprime il suo contenuto di acqua e può essere

riportata sul tal quale oppure sul secco. Se si indica con m_a la massa d'acqua e con m_s la massa di sostanza secca, il tenore di umidità U sul tal quale è definito, secondo la EN14774, come:

$$U = m_a / (m_a + m_s) \text{ (assume valori compresi tra zero e uno)}$$

Il tenore di umidità U_0 (oppure u) sul secco invece è definito come:

$$U_0 = m_a / m_s \text{ (assume valori compresi tra zero e infinito)}$$

L'energia effettivamente utilizzabile dal punto di vista pratico, non è il potere calorifico inferiore sul secco (PCI_0 , calcolato secondo la 3.2) ma il potere calorifico sul tal quale (PCI). Si tiene conto che l'energia chimica relativa alla massa di sostanza tal quale (secco + acqua) è data dall'energia chimica della sostanza secca diminuita del calore di vaporizzazione dell'acqua che non viene recuperato:

$$PCI \text{ [kJ/kg]} = (1-U) * PCI_0 - U * r = PCI_0 - U * (PCI_0 + r) \quad (3.3)$$

Il potere calorifico inferiore di una biomassa diminuisce linearmente con l'aumento della sua umidità, fino ad annullarsi per valori dell'ordine del 88-90% [1].

2.3.4 Sistema di campionamento TAR

Il sistema di campionamento utilizzato, acquistato nell'annualità 2016 dalla società Gamba & Botteghi (Livorno), è stato utilizzato sull'impianto dimostrativo durante le sperimentazioni effettuate nell'ambito del PAR 2018.

Lo schema del sistema di campionamento è mostrato nella figura sottostante:

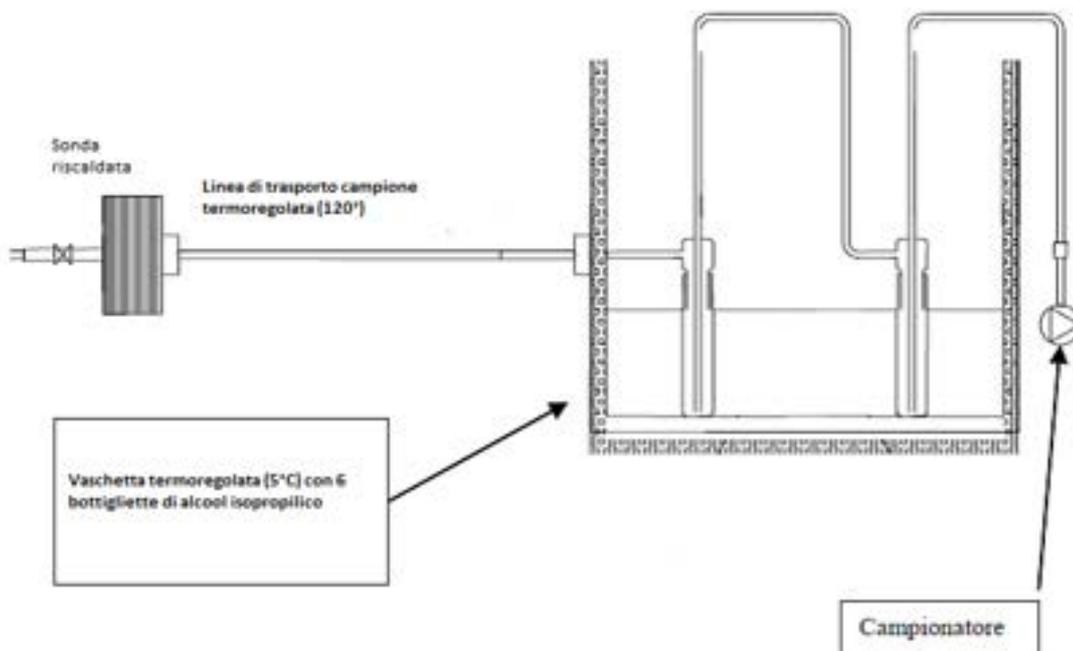


Figura 8. Schema del sistema di campionamento TAR (Gamba & Botteghi)

Lo strumento, acquisito da Gamba & Botteghi, consta di una sonda riscaldata che viene flangiata sulla tubazione del syngas in uscita dal reattore dell'impianto dimostrativo. La sonda è collegata a un sistema

che, tramite un recipiente di raccolta (impinger) posto tra due filtri sinterizzati all'interno di un box metallico, permette una prima separazione di TAR e polveri. L'impinger, così come i due filtri, vengono riscaldati essendo il sistema dotato di termostato: tramite display è possibile scegliere la temperatura della sonda, dei filtri, dell'impinger e della linea attraverso cui il gas campionato fluisce. Questa è presente a valle dell'impinger, dopo il secondo filtro, e permette di mantenere caldo il gas che successivamente può essere condotto ad una serie di due condensatori che, riempiti con propanolo, permettono la condensazione di ulteriore TAR. Il sistema termina così con un campionatore che permette l'aspirazione del syngas e ne determina la portata tramite un contatore volumetrico.

Durante l'annualità si sono presentate diverse problematiche relative alla posizione della sonda riscaldata che non permetteva il corretto afflusso del gas all'interno del campionatore. I tecnici sotacarbo hanno quindi deciso di variare la posizione di innesto del campionatore e le procedure di utilizzo del sistema. Nella figura seguente è mostrata la variazione del montaggio del sistema che ora opera con un angolo di inclinazione rispetto al flusso in uscita pari a 45°, in modo da facilitare la raccolta del campione.

L'accorgimento ha permesso una raccolta più efficace del campione, attraverso un aumento della portata del syngas prelevato e la conseguente riduzione dei tempi di campionamento. È stata inoltre adottata una procedura di raccolta che prevede la pulizia del sistema con azoto alla pressione di 2 bar, nella fase immediatamente precedente al campionamento, in modo da garantire il corretto afflusso del campione alla sezione di raccolta eliminando la possibilità di intasamenti lungo il circuito.

Nella figura seguente mostra la zona di lavoro realizzata al primo piano dell'impianto dimostrativo.



Figura 9. Nuova installazione del sistema di campionamento TAR (Gamba&Botteghi)

3 Procedure operative del processo di gassificazione

Il presente capitolo descrive, in maniera estremamente sintetica e semplificata, le procedure operative impiegate per l'esecuzione dei test sperimentali con l'impianto dimostrativo Sotacarbo. Le procedure operative sono riconducibili alle seguenti fasi principali:

1. verifiche iniziali e avviamento degli ausiliari;
2. *start-up* dell'impianto;
3. fase operativa;
4. *shut-down* dell'impianto.

3.1 Verifiche e avviamento delle apparecchiature ausiliarie

Il funzionamento della sezione di gassificazione dell'impianto dimostrativo Sotacarbo è subordinato alla disponibilità di una serie di apparecchiature che devono essere attivate e la cui funzionalità dev'essere verificata prima di ciascuna operazione di *start-up* dell'impianto stesso.

In particolare, le apparecchiature ausiliarie vengono avviate e verificate secondo il seguente ordine:

1. compressore dell'aria per la strumentazione;
2. compressore dell'aria di alimentazione del processo di gassificazione;
3. sistema di vaporizzazione del GPL (impiegato per l'avviamento della torcia e per l'alimentazione del generatore di vapore);
4. generatore di vapore;
5. pompe di invio dell'acqua all'impianto;
6. invio portata di acqua di raffreddamento al sistema stirrer;
7. messa in linea dell'azoto di inertizzazione;
8. verifica dei livelli dei tank dello scrubber ed eventuale reintegro dell'acqua affinché entrambi raggiungano il livello di 1700 mm;
9. verifica del riempimento della camicia (water jacket) e del controllo del livello dello steam drum (circa 220 mm);
10. verifica del posizionamento dello stirrer ad un'altezza massima all'interno del gassificatore di altezza massima pari a 2400 mm.

3.2 Fase di start-up

Una volta avviate le apparecchiature ausiliarie, si procede allo *start-up* del gassificatore, secondo le fasi di seguito descritte.

3.2.1 Caricamento iniziale del reattore

Il caricamento iniziale del gassificatore viene effettuato a freddo con carbone vegetale e assumendo la quota della griglia periferica come zero delle altezze, nel particolare:

- Carbone vegetale 550 mm circa 1000 lt circa 320kg;

Il carbone vegetale funge da letto di accensione in sostituzione dell'argilla e del combustibile per la sola fase di accensione, successivamente viene caricato il combustibile previsto dal test sperimentale che andrà a sostituire nel tempo la carica di accensione fatta con carbone vegetale. Nelle vicinanze degli irradiatori viene inserita della carta al fine di facilitare la reazione di combustione in fase di accensione. A valle di questo primo caricamento si effettua un test di rotazione della griglia al fine di far posizionare correttamente il materiale, ed un test di rotazione/traslazione dello stirrer per verificare l'effettivo livello del gassificatore. La risposta dell'impianto all'accensione mediante carbone vegetale è stato ottimale, non si sono verificate problematiche relative alla gestione delle temperature sul reattore e al funzionamento della griglia di scarico ceneri.

3.2.2 Accensione del letto combustibile

L'accensione del reattore di gassificazione avviene per mezzo di sei resistenze elettriche (irradiatori di accensione) in materiale ceramico poste a contatto con il letto del gassificatore in prossimità dello strato carbone vegetale.

Gli irradiatori vengono alimentati elettricamente, portati alla temperatura di 750-800 °C e mantenuti in tale condizione per dieci minuti circa, al fine di consentire il riscaldamento delle zone limitrofe del letto combustibile. Dopo tale tempo viene inviata, una portata d'aria pari a circa 50-60 kg/h al fine di dare avvio alla combustione. Una volta accertata l'accensione del letto sulla base di: verifiche visive sull'uscita di fumi di combustione dal vent e un aumento della temperatura fino a circa 100 °C, l'alimentazione elettrica delle lampade viene interrotta. Successivamente viene chiuso il vent, si accendono le pompe di lavaggio dello scrubber ed il syngas viene inviato in torcia. Contestualmente viene inviata una portata di aria sottogriglia di circa 500-600 kg/h e viene interrotto l'invio dell'aria attraverso gli irradiatori di accensione.

3.2.3 Analisi Syngas

La misura della composizione del syngas prodotto è indispensabile per la corretta gestione dell'impianto e per la valutazione delle prestazioni d'impianto al variare dei parametri di processo. Sono stati effettuati dei campionamenti di syngas in automatico dalle apparecchiature di analisi tramite delle prese di campionamento poste nelle seguenti zone dell'impianto:

- in uscita dal gassificatore (DJ001P);
- in uscita dallo scrubber (DJ002P);
- in uscita dalla torcia (DJ003P);

3.3 Fase operativa

La fase operativa dell'impianto riguarda tutte quelle operazioni e verifiche necessarie per portare il gassificatore Dimostrativo a regime e mantenerlo in tale condizione. Un ruolo chiave è ricoperto dal sistema di analisi del syngas e dal profilo termico registrato sulle pareti del gassificatore; sulla base di tali parametri è possibile gestire il gassificatore ed effettuare le azioni necessarie ad una corretta gestione delle apparecchiature. Riportiamo di seguito le procedure messe a punto durante i test sperimentali al fine di portare il gassificatore in condizioni di regime:

- regolazione aria processo: aumentare per step l'aria sottogriglia dal valore di accensione 100 kg/h (aria agli irradiatori) fino al valore previsto per i test sperimentali all'incirca 450-550 kg/h; l'aumento dell'aria sottogriglia deve essere effettuato sulla base: del consumo di ossigeno (le analisi del syngas devono mostrare valori sempre inferiori all'1%) e delle temperature delle pareti (non devono aumentare rapidamente e non devono superare i 600-650 °C);
- livello del riempimento nel gassificatore: caricare il combustibile con il sistema Redler fino a portare l'altezza del riempimento nel gassificatore a circa 2000 mm (anche nell'effettuare tale operazione è fondamentale avvalersi delle analisi del syngas e dei profili di temperatura);
- movimentazione letto di gassificazione: ad ogni caricamento è necessario far ruotare e traslare lo stirrer fino a raggiungere il livello del combustibile nel gassificatore (il raggiungimento del combustibile è valutato attraverso la misurazione dello sforzo con una cella di carico) al fine di compattare il combustibile e valutare il livello del riempimento; inoltre al fine di omogenizzare la distribuzione del letto di combustibile del gassificatore lo stirrer viene lasciato in rotazione alla quota dove si rileva il materiale (2000 mm quota massima);
- carico combustibile e scarico ceneri: attraverso il sistema Redler è stato possibile caricare il gassificatore con una frequenza compresa nel range di 200-350 kg/h al fine di valutare le potenzialità dell'impianto. La potenzialità globale di scarico della griglia è di circa 120 lt/h (anche se dipende dalla granulometria e dalla tipologia del materiale scaricato);
- circuito di raffreddamento: quando la temperatura all'uscita dello steam drum aumenta rispetto a quella iniziale e allo steam drum arriva una portata di vapore (anche minima) dalla camicia di

- raffreddamento bisogna avviare le ventole del condensatore ed inviare il condensato alla camicia di raffreddamento. Inoltre è necessario verificare il livello dello steam drum; se esso scende sotto i 200 mm è necessario reintegrare con acqua dal circuito principale fino al valore soglia di 217-230 mm;
- invio vapore: quando la temperatura monitorata sulle pareti del gassificatore si mantiene in maniera costante sopra i 650-700 °C è necessario inviare vapore; la portata deve essere inviata da un valore minimo di 30-50 kg/h a salire per step se il controllo delle temperature lo richiede;
 - scrubber: il sistema scrubber ha il compito di gestire il lavaggio e la pulizia del syngas, le pompe di lavaggio devono essere avviate prima dell'invio del syngas in torcia. Al fine di mantenere efficiente lo scrubber è necessario: scambiare i filtri posti prima della pompa di lavaggio quando la pompa in funzione inizia a perdere portata.
 - torcia: verificare che la temperatura della camera di combustione non superi gli 950 °C, pulire la valvola rompifiamma in caso di rottura della guardia idraulica dello scrubber (la pressione dovrebbe superare i 50 mbar).

Attraverso le operazioni sopra descritte l'impianto si trova in condizioni di regime; si riassume di seguito i principali parametri di processo impostati:

- aria sottogriglia: circa 650 -800 kg/h;
- vapore: all'occorrenza con portata da verificare;
- consumo di combustibile (cippato): da 200-350 kg/h;
- reintegro acqua scrubber: livelli costanti a 1600 mm;
- Reintegro Steam Drum: livello costante a 217 mm;

3.4 Fase di shut-down

Al termine della fase sperimentale vera e propria, si procede allo spegnimento (shut-down) del processo secondo quanto di seguito descritto:

- interruzione del caricamento;
- interruzione dell'invio di vapore;
- parzializzazione dell'invio dell'aria sottogriglia;
- scarico completo del materiale presente nel gassificatore;
- apertura degli scarichi del gas in atmosfera e spegnimento della torcia;
- spegnimento del generatore di vapore e interruzione dei campionamenti e delle analisi del gas;
- disattivazione delle pompe di ricircolo dello scrubber e svuotamento del serbatoio di accumulo dell'acqua di lavaggio;
- disattivazione delle apparecchiature ausiliarie ancora in funzione e interruzione dell'alimentazione elettrica.

4 Modifiche di impianto eseguite sull'impianto dimostrativo

Durante questa annualità le modifiche principali si sono concentrate sul sistema di caricamento del combustibile all'impianto dimostrativo, in particolare è stato rivoluzionato il piping di iniezione del combustibile al gassificatore.

4.1 Modifiche del piping di caricamento del combustibile

Durante la presente estensione al par 2017 sono state studiate e realizzate delle modifiche al sistema di caricamento del gassificatore a causa dei problemi relativi ad intasamenti verificatisi nei precedenti test sperimentali. Nello specifico tali modifiche hanno riguardato i condotti di caricamento inferiori. In una prima fase è stato modificato il solo condotto di caricamento di destra posto in corrispondenza della valvola a ghigliottina FL104P. In Figura 10 è riportato il disegno delle modifica in oggetto:

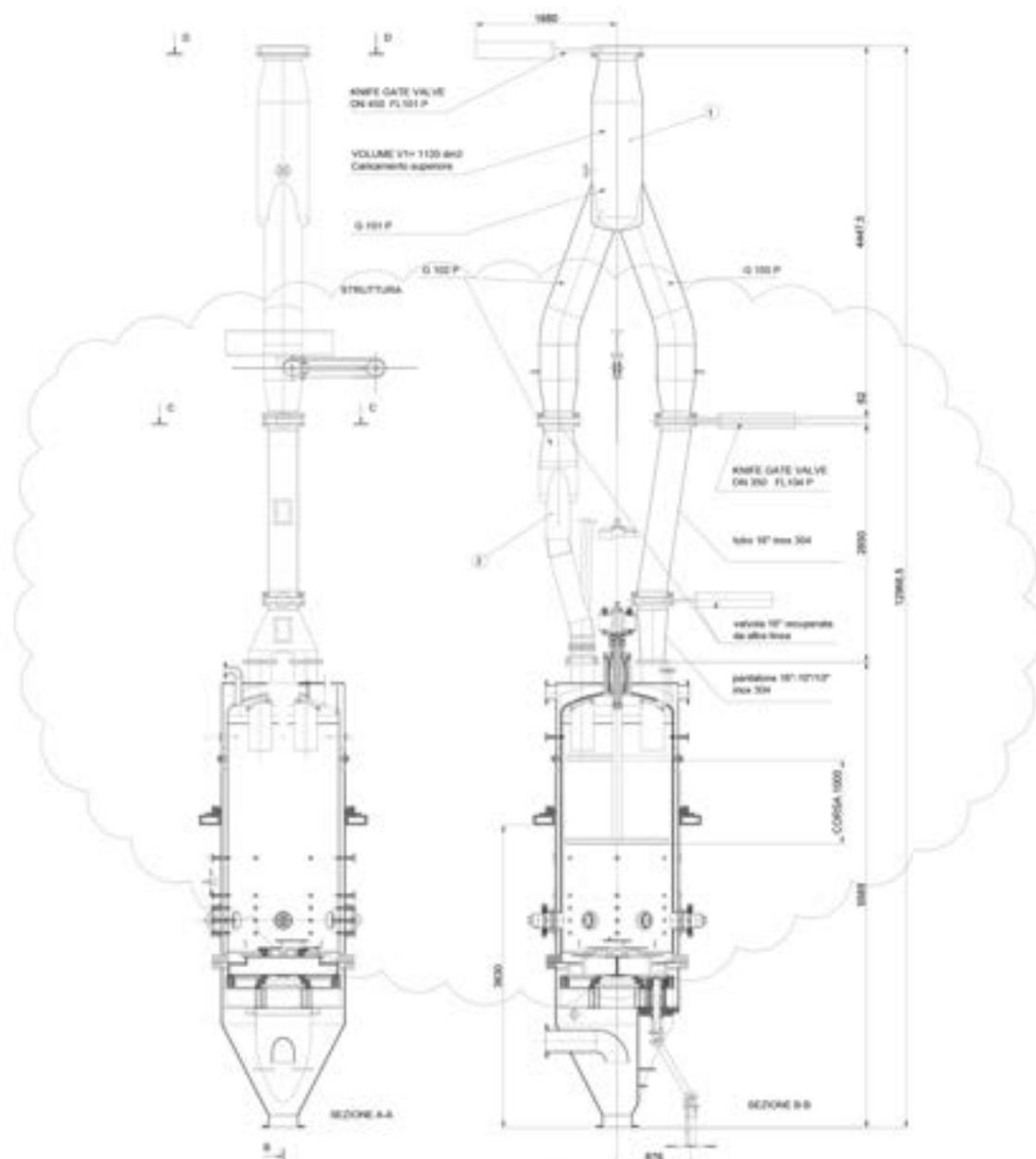


Figura 10. Schema delle modifiche del condotto di carico

Come si può vedere in figura il condotto di carico inferiore è stato modificato eliminando la cuspidi che andava a fare da accumulo per il materiale portando all'intasamento del condotto stesso. Inoltre è stata cambiata la sezione della tubazione e gli è stata data un'inclinazione maggiore, in modo da creare una sorta di scivolo per il materiale. Si è anche aggiunta una seconda ghigliottina di caricamento sopra la FL104P e due sportelli d'ispezione. L'intero condotto è stato realizzato in acciaio AISI 304 in modo da evitare i problemi di sporcamento avuti con il materiale che costituiva il vecchio condotto. Tali modifiche sono state testate con la prova di accensione del 22 novembre 2018. In Figura 11 è riportato un dettaglio della modifica in cui si può vedere la nuova inclinazione del ramo di condotto prima dell'innesto nel gassificatore.

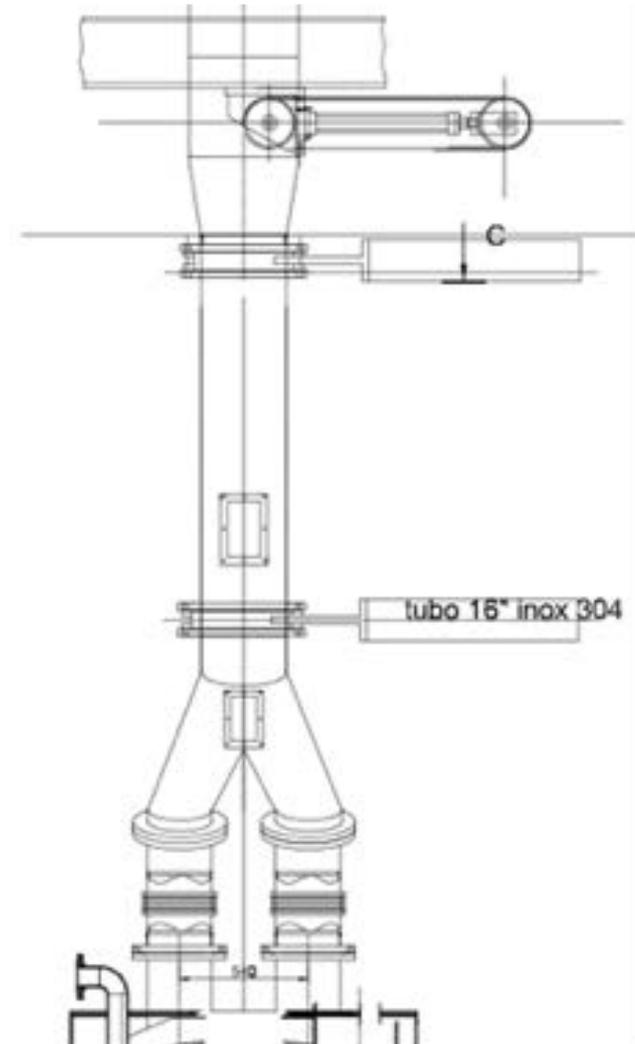


Figura 11. dettaglio della modifica

Durante il test sperimentale suddetto si sono verificati dei fenomeni di intasamento del combustibile nel volume tra le due ghigliottine. Si è perciò provveduto ad apportare alcune correzioni. Sono stati eliminati gli sportelli di ispezione, è stata eliminata la seconda valvola a ghigliottina, poiché il volume compreso tra le due, non era sufficiente a garantire un corretto caricamento del materiale come evidenziato nel test. Apportate queste correzioni si è estesa la modifica anche al ramo di caricamento attenente alla valvola a ghigliottina FL103P, con le medesime caratteristiche sopra indicate. In Figura 12 è riportato il disegno con tali modifiche.

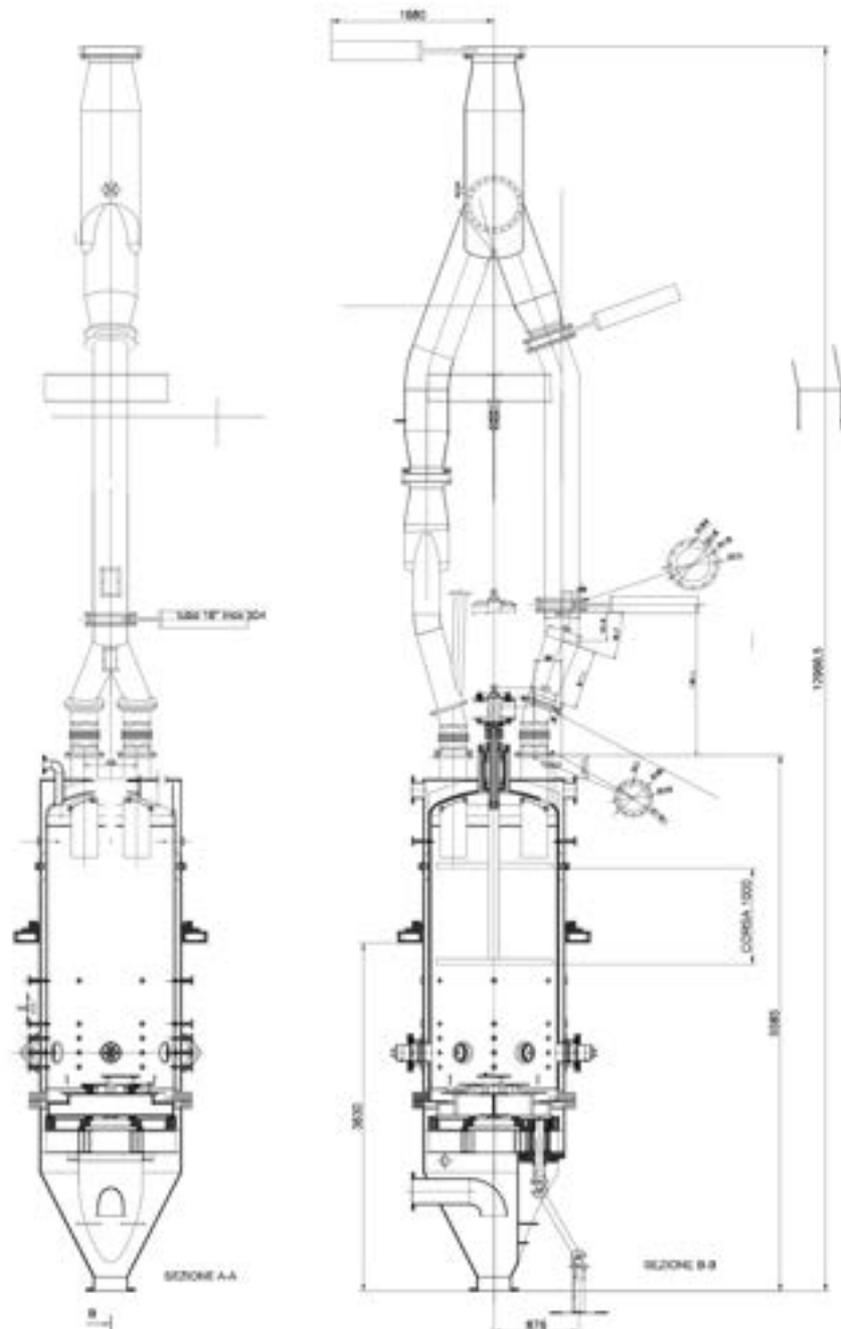


Figura 12. dettaglio della seconda modifica

Tali modifiche sono state verificate e collaudate con il test sperimentale dell'11 dicembre 2018.

4.2 Modifiche di indirizzamento del combustibile nel piping di caricamento

Al fine di indirizzare il combustibile nel suo percorso nel piping si è valutato necessario realizzare un sistema di indirizzamento manuale governato da un pistone pneumatico per spostare il combustibile, tale modifica permette all'operatore di indirizzare a suo piacimento il combustibile da caricare nel gassificatore. Riportiamo di seguito un'immagine di tale sistema:

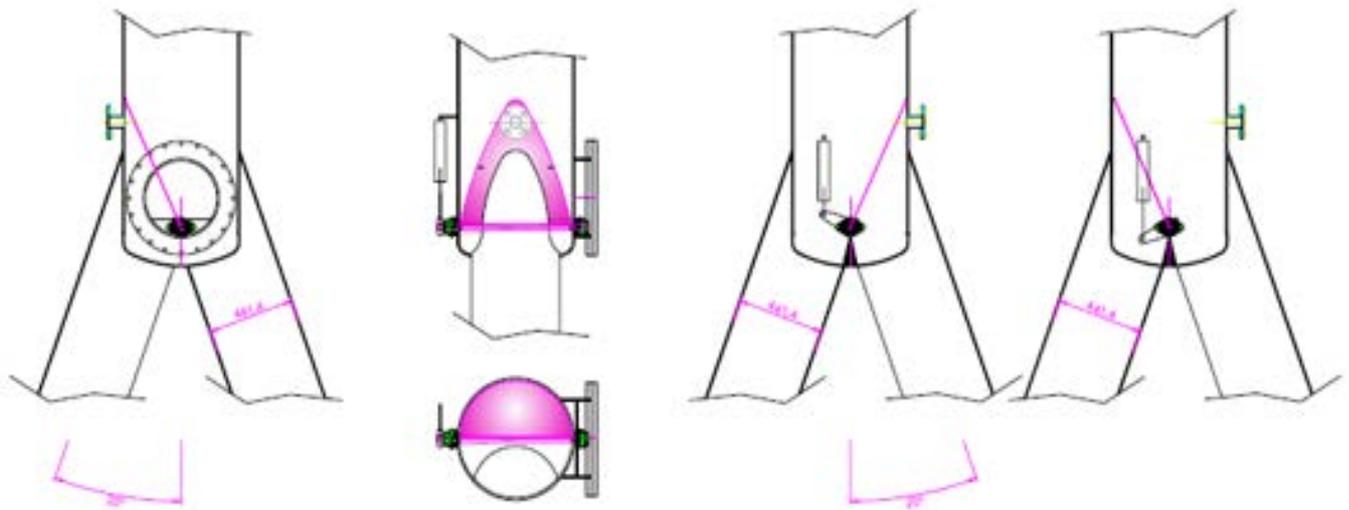


Figura 13. Viste relative al deviatore realizzato sul piping di caricamento

Tale modifica è molto importante perché consente di indirizzare il combustibile alternativamente su uno dei tubi presenti sulla Y mostrata in Figura 13. Grazie a tale modifica si potrà indirizzare il flusso del combustibile su una singola tubazione riuscendo in caso di problemi su una linea a cambiare sull'altra. Tale modifica consente di avere un caricamento del combustibile più uniforme alternando l'utilizzo delle linee. Un altro importante beneficio derivante da tale modifica consiste nel poter operare una cogassificazione di due combustibili indirizzando il flusso del combustibile alternativamente sulle due tubazioni del gassificatore.

5 Test sperimentali di gassificazione

5.1 *Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di co-gassificazione del 22-23/11/18*

L'analisi del processo di gassificazione è basata sui dati ottenuti nel test del 22-23/11/18 (24 ore).

Nel corso della prova sperimentale, sono stati gassificati mediamente, considerando unicamente i periodi in cui il gassificatore si trovava in condizioni di regime, 123,5 kg/h di combustibile. La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 456,8 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri. La Figura 14 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova, circa ogni 8 ore a partire dal momento in cui il gassificatore è entrato a "regime". I dati di temperatura sono stati prelevati dalla fila Nord Ovest dove si è sviluppata la reazione di gassificazione in modo preponderante.

Figura 14. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 22-23/11/2018 (Fila Nord-Ovest)

La Figura 15 mostra l'andamento nel tempo delle concentrazioni, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H_2 , CO e CO_2 e CH_4 sulle prese di campionamento DJ001P.

Figura 15. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 22-23/11/2018

L'andamento oscillante della composizione è dovuto a diversi fattori quali le manutenzioni straordinarie sull'impianto dovute a intasamenti del sistema di caricamento (discontinuità di alimentazione) che hanno compromesso il normale funzionamento del gassificatore; tali complicazioni hanno comportato un blocco del sistema di caricamento che ha causato l'interruzione del test.

5.2 *Analisi dati sperimentali ottenuti dai test di gassificazione del 11-12/12/2018*

Nel corso della prova sperimentale del 11-12/12/2018 (36 ore), sono stati gassificati mediamente 180 kg/h di combustibile, durante una specifica fase del test in cui l'impianto è stato portato in condizioni di carico massimo.

La portata di aria utilizzata, si è attestata sui 537 kg/h nei periodi di regime del gassificatore. Il vapore è stato utilizzato unicamente per il raffreddamento costante della griglia di scarico ceneri. La Figura 16 riporta i profili di temperatura all'interno del reattore rispetto alle altezze del gassificatore in tempi diversi della prova, circa ogni 8 ore a partire da quando il gassificatore è entrato a "regime". I dati di temperatura sono stati prelevati dalla fila Sud dove si è sviluppata la reazione di gassificazione in modo preponderante.

Figura 16. Profilo di temperatura all'interno del gassificatore durante le prove di gassificazione del 11-12/12/2018 (Fila Sud)

La Figura 17 mostra l'andamento nel tempo delle concentrazioni medie, nel syngas grezzo, delle principali specie gassose: H₂, CO e CO₂ e CH₄ sulle prese di campionamento DJ001P.

Figura 17. Andamento nel tempo della composizione del syngas grezzo DJ001P del 11-12/12/2018

Durante il funzionamento a regime, nella fascia oraria compresa fra le 21:36 e le 02:26, la concentrazione media di H₂ risulta pari a circa il 16,9%, quella di CO pari a circa il 16,6%, quella di CH₄ pari al 2,0 % e quella di CO₂ pari a circa 14,1% per un rapporto CO/CO₂ pari a 1,18 ed un rapporto H₂/CO pari a 1,02.

Durante la fase di funzionamento è stata registrata una concentrazione quasi nulla di O₂. Di seguito riportiamo:

in Tabella 4 le concentrazioni medie % (dry basis) del Syngas ottenute dall'elaborazione dei dati ABB;

Tabella 4. Concentrazioni medie % (dry base) del syngas da ABB (DJ001) del 17-20/04/2017

CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ S	O ₂	N ₂
1,999	18,564	14,112	16,900	0,0000	0,183	48,242

Come si i carichi sono terminati alle ore 00:46 a causa di problematiche al sistema di caricamento.

6 Conclusioni

Durante il PAR 2018 si è proceduto a testare il gassificatore dell'impianto dimostrativo Sotacarbo con l'obiettivo principale di valutare il funzionamento e le prestazioni del sistema di invio del combustibile al gassificatore tramite il piping di collegamento; inoltre sono state effettuate insieme all'Università di Cagliari delle attività di campionamento e analisi in laboratorio sui reflui del sistema di clean-up. Le principali modifiche effettuate sul sistema di caricamento sono state le seguenti:

- Eliminazione di possibili zone di accumulo del combustibile nel piping di caricamento;
- Modifica della sezione di parte del piping di caricamento;
- Aggiunta di due valvole nei due differenti rami di caricamento combustibile al gassificatore;
- Inserimento di un deflettore per indirizzare la portata di combustibile in due differenti innesti al gassificatore.

Sono stati effettuati due test sperimentali per verificare il funzionamento delle modifiche effettuate sull'impianto Dimostrativo, sono stati mantenuti invariati i principali parametri di funzionamento quali:

1. Tipologia del combustibile
2. Portata di combustibile
3. Agenti gassificanti
4. Letto di gassificazione
5. Quantità di ceneri scaricate.

Durante il primo test sperimentale si sono riscontrati problemi d'intasamento dovuti al non sufficiente volume presente tra la nuova ghigliottina e quella esistente. Questo fenomeno si è verificato a causa di un tempo di sosta del combustibile eccessivo tra le ghigliottine suddette. Per le motivazioni sopra esposte è stato quindi deciso di eliminare la ghigliottina aggiuntiva, lasciando immutate le precedenti modifiche. Sono stati modificati inoltre anche gli sportelli di supervisione in quanto risultanti inutili.

Il secondo test sperimentale ha avuto un andamento positivo nella prima fase, mentre successivamente il sistema di caricamento si è ostruito. Questo fatto però è ascrivibile all'elevata percentuale d'umidità presente nel combustibile e non alle modifiche effettuate. Nella prima parte del test infatti quando l'umidità del combustibile aveva valori intorno al 30%, rilevati mediante il misuratore di umidità portatile, il sistema ha funzionato correttamente.

Si sottolinea che tale regime di funzionamento è quello standard fatto questo confermato dalla composizione del syngas. Quando però l'umidità nel combustibile è aumentata fino a valori del 40-50% il sistema di caricamento si è bloccato. L'aumento dell'umidità nel combustibile è correlata alla percentuale di H₂ presente nella composizione del syngas. L'elevata quantità di umidità rilevata infatti è stata confermata da una concentrazione dell'idrogeno nel syngas pari al 20% un valore questo, circa doppio di quello solitamente misurato pari al 10%.

In conclusione si può affermare che in condizioni di funzionamento standard con le modifiche effettuate, il sistema di caricamento lavora in maniera ottimale, condizioni di umidità troppo elevata invece generano ancora problemi di intasamento. Tali condizioni quindi non sono adatte a far lavorare l'impianto correttamente.

Per tali motivazioni sarebbe utile avere un sistema di essiccazione del combustibile al fine di poterlo inviare al gassificatore con umidità controllata.

Durante il secondo test sperimentale sono stati raccolti alcuni i campioni di refluo relativi al sistema di clean-up, per poter effettuare delle valutazioni relative a tale sistema in collaborazione con l'Università di Cagliari, i risultati di tale attività sono presentati nel report proseguo dell'attività di caratterizzazione, sulla base delle modifiche effettuate sul clean-up, del trattamento dei reflui prodotti dall'impianto di gassificazione dimostrativo sotacarbo e individuazione di soluzioni migliorative per il trattamento e riduzione delle acque di lavaggio".

7 Riferimenti bibliografici