

ANALISI E STUDI RELATIVI ALL'OTTIMIZZAZIONE DI UN IMPIANTO DI GASSIFICAZIONE E COGENERAZIONE A BIOMASSE LIGNOCELLULOSICHE

A. Cai, A.P. Carlucci, G. Colangelo, M. G. De Giorgi, A. de Luca,
D. Laforgia, G. Minosi, A. Nuzzo, A. Scarpello, G. Starace

Università del Salento, Dip. Ingegneria dell'Innovazione, via per Arnesano – 73100 Lecce

SOMMARIO

I dispositivi per la produzione combinata di energia elettrica e termica a partire dal processo di gassificazione di biomasse di origine lignocellulosiche devono essere progettati, ottimizzati e accoppiati attraverso una scrupolosa attività di studio e analisi, teorica, progettuale e sperimentale. Quest'attività coinvolge numerose professionalità ed esperienze impegnate in un processo di ricerca della soluzione, ricco di problematiche diverse e complesse. Si vuole illustrare un esempio di successo di questo processo di realizzazione, che, nell'ambito di una attività di ricerca finanziata al Consorzio GI_INNOVAZIONE di Monopoli (Ba), in collaborazione con l'Università del Salento, ha consentito la costruzione, allo stadio di prototipo di ricerca, di un impianto completo di potenza elettrica nominale pari a 100kW. L'impianto si compone di un gassificatore a letto fisso, di una sezione di abbattimento dei contenuti di ceneri del *syngas*, di un motore alternativo opportunamente modificato per l'alimentazione da gas povero e di una sezione di recupero per l'utilizzo della potenza termica (sia in caldo sia in freddo).

L'approccio di studio al processo di gassificazione del reattore a letto fisso è stato dapprima numerico e poi sperimentale. La validazione del modello numerico è avvenuta con i dati relativi a uno studio sperimentale condotto dal Centro Ricerche ENEA Trisaia (MT) presso un impianto pilota simile a quello in fase di studio. La successiva applicazione del modello validato sulla geometria del gassificatore del Consorzio GI_INNOVAZIONE ha dato come risultato una composizione finale del gas prodotto ben sovrapponibile ai valori sperimentali. Il motore utilizzato per la generazione di energia elettrica è derivato da un motore alimentato a gas naturale di 12 litri di cilindrata. Per l'utilizzo di tale propulsore alimentato a gas povero, si è agito sul rapporto di compressione, operando scelte opportune sulla forma della camera di combustione. Le prove sperimentali, effettuate con l'intero impianto in funzione, hanno evidenziato un rendimento utile del motore compreso tra 0,15 e 0,2. Il progetto della sezione di recupero termico è stato orientato alla massima sfruttabilità della potenza termica disponibile all'intercooler e alla sezione di raffreddamento del motore alternativo, nonché a quella di raffreddamento dei dispositivi di produzione e raffreddamento del *syngas*.

INTRODUZIONE

La biomassa è considerata un importante combustibile naturale in alternativa al combustibile fossile. Esistono diverse modalità di sfruttamento dell'energia da biomassa. Tra queste, importanza rilevante riveste la gassificazione, ovvero la produzione di gas povero (*syngas*) a partire da biomasse lignocellulosiche quali legno, scarti e residui di origine vegetale.

La gassificazione delle biomasse legnose è più conveniente rispetto a quella dei combustibili fossili. I principali componenti sono, infatti, la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina, che contengono importanti quantitativi di ossigeno ed acqua, elementi importanti per la formazione delle molecole gassose. A fronte della sua combustione, il *syngas*, inoltre, produce un ridotto contenuto di cenere e di zolfo.

Si stima che circa il 14% della domanda energetica mondiale sia soddisfatta da risorse energetiche rinnovabili. Le biomasse provvedono allo 0,7% della richiesta totale [1].

Le modalità di sfruttamento energetico delle biomasse sono principalmente tre: la combustione diretta, la gassificazione e la trasformazione in combustibile liquido.

La prima è senza dubbio la più semplice ed antica, ma presenta un grosso limite nella difficoltà di gestione di combustibile di pezzatura non sempre ben definita e spesso di notevole ingombro. Per ovviare all'inconveniente è opportuno trasformare, allora, il combustibile solido in forma gassosa o in

forma liquida. Questa pratica rende possibile l'utilizzo della biomassa in un più vasto campo di applicazioni, tra cui i motori alternativi a combustione interna.

La possibilità di ottenere un combustibile gassoso a partire dalle biomasse lignocellulosiche è legata alla natura delle reazioni chimiche che si sviluppano nei processi che si innescano e si controllano all'interno dei gassificatori.

Alcuni autori come Lee et al. [2] affrontano il problema dello studio numerico del fenomeno di produzione del *syngas* partendo dall'analisi elementare della biomassa. Essi dividono il processo in due fasi: la prima, affrontata con approccio termodinamico, riguarda la trasformazione dello stato della biomassa da solido a gassoso; la seconda fase, affrontata imponendo i vincoli della cinetica chimica, consente la predizione della composizione finale del gas.

Altri come Scharler et al. [3] adottano un metodo semi-empirico, utilizzando un modello CFD le cui condizioni al contorno sono costituite da dati sperimentali sulle velocità di rilascio della frazione volatile e dell'energia dal letto fisso.

In letteratura sono relativamente pochi gli studi di gassificatori a letto fisso reali che non si basino su dati empirici inerenti il rilascio di frazione volatile dal combustibile.

Il gassificatore a letto fisso installato presso il Consorzio GI_INNOVAZIONE a Monopoli (Ba), dispositivo a monte dell'impianto pilota di produzione di energia elettrica di 100

kW nominali, è stato studiato a partire dai risultati delle analisi sul combustibile bruciato e *syngas* prodotto (Figura 1), frutto di una campagna di prove condotte dall'ENEA C.R. Trisaia (MT). Tramite il codice CHEMKIN, sono state individuate e quantificate le specie chimiche ottenute dalla reazione di pirolisi, che sono state successivamente introdotte nel dominio di calcolo del codice CFD FLUENT. Questo approccio ha consentito di ridurre gli sforzi computazionali evitando l'utilizzo di flussi bifase nel codice CFD. E' stata, da ultimo, condotta un'analisi di sensibilità alla portata dell'agente gassificante costituito da aria ambiente.

In linea con studi e analisi presenti in letteratura [6] si sono valutate le performance in termini di consumo specifico, efficienza termica, potenza, nonché di composizione dei gas di scarico del motore alimentato con il *syngas* prodotto dell'impianto del Consorzio GI_INNOVAZIONE.

Il motore oggetto di studio è stato il DOOSAN (Daewoo) GE12TIC, propulsore di 12 litri, sovralimentato con turbocompressore, modificato da gas naturale a *syngas*. Le modifiche hanno riguardato il rapporto di compressione, ridotto opportunamente e la forma della camera di combustione. Si è, in aggiunta, simulata la fluidodinamica del collettore di aspirazione, per la stima della uniforme carica di miscela aria/combustibile nei singoli cilindri. Sulla base dei risultati ottenuti, sono state valutate configurazioni alternative, con il risultato di una massimizzazione della massa totale di miscela intrappolata e di una soddisfacente omogeneità di riempimento dei singoli cilindri.

Le prove sperimentali, effettuate con in funzione l'intero impianto gassificatore-motore, hanno evidenziato un rendimento utile del motore compreso tra 0,15 e 0,2 a seconda delle condizioni di utilizzo.

Il progetto della sezione di recupero della potenza termica, integrato con quello di raffreddamento del gassificatore, di pulizia del *syngas* e di raffreddamento del motore e dei suoi organi a corredo, è seguita ad un'attenta analisi per la valutazione delle potenzialità di sfruttamento energetico sia all'interno del sistema (essiccazione della biomassa in entrata, potenza di attivazione di sistemi ad assorbimento per la condensazione del tar), sia all'esterno per l'utilizzo in processi industriali e/o civili. Non sono semplici le decisioni riguardo alle strategie di utilizzo dell'energia termica sia per la complessità dell'impianto, sia per le non eccessive temperature dei fluidi il cui contenuto energetico interessa ai fini del

recupero, sia per la possibile variabilità della richiesta da parte delle utenze esterne.

L'assetto cogenerativo, nonostante le difficoltà realizzative, insieme con l'utilizzo organico di energia termica rappresenta l'occasione di un sensibile miglioramento complessivo del rendimento di impianto e, perciò, la motivazione decisiva per l'adozione della soluzione di gassificazione delle biomasse.

DESCRIZIONE DELLE SEZIONI E DEI COMPONENTI DEL SISTEMA COMPLETO

L'impianto gassificatore-motore alimentato a biomassa lignocellulosiche (Figura 1) si compone nell'ordine di:

- una sezione di alimentazione della biomassa:

Un trasferitore a coclea inclinato alimenta in maniera lenta e regolare la biomassa dall'alto per farla confluire nel reattore. L'alimentazione avviene attraverso una bocca di carico la cui forma previene la formazione di blocchi dell'alimentazione in presenza di corpi legnosi di dimensione eccessiva. La gestione dell'ingresso della biomassa è legata a quella dell'aria comburente. Nella sezione di alimentazione è allo stato progettuale l'adozione di un dispositivo per l'essiccazione della biomassa legnosa;

- una camera di reazione (gassificatore) per l'essiccazione finale, la pirolisi e la gassificazione

La camera di reazione (o gassificatore) a flusso d'aria trasversale perchè immersa da condotti disposti radialmente prevede un flusso della biomassa dall'alto verso il basso. Nella parte superiore del gassificatore si realizza il processo di combustione, il quale fornisce il calore alle reazioni di pirolisi della biomassa che avvengono immediatamente al di sotto. Nella parte inferiore hanno luogo le reazioni di gassificazione. Una griglia rotante in basso sostiene e regola il deflusso della biomassa ancora incombusta e delle ceneri raccolte in basso. La tubazione di uscita del *syngas* prodotto è radiale;

- una sezione di pulizia del *syngas*;

A valle della produzione di *syngas* vi sono due *scrubber* utili alla sua pulizia dalle componenti solide disperse (particolato carbonioso).

I due sistemi di pulizia rivestono grande importanza anche ai fini dell'abbattimento della temperatura del *syngas*. La pulizia del *syngas* ed il controllo delle sue proprietà di pressione e temperatura sono necessari alla buona e sicura marcia dell'impianto e, in particolare, del motore alternativo installato in coda all'intero sistema;

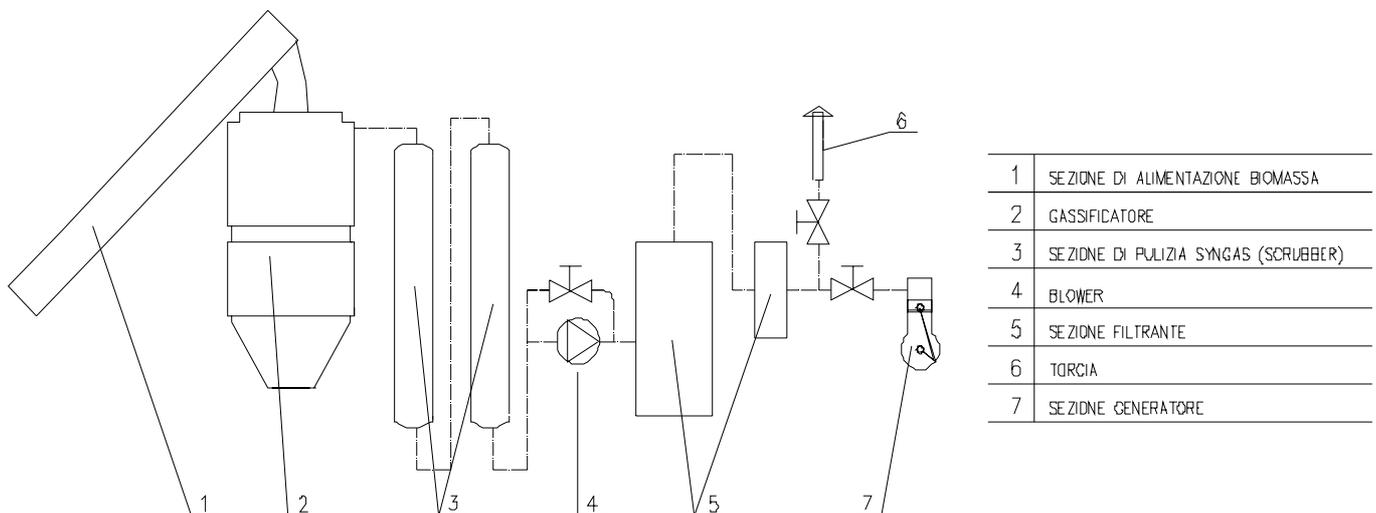


Figura 1: Schema funzionale dell'impianto gassificatore

- *una sezione fluidodinamica*

Ai due scrubber segue la sezione di spinta del *syngas* costituita da un soffiatore volumetrico che consente di vincere le perdite di carico di tutta la linea, per consegnare al motore il *syngas* in condizioni di e pressione opportuna. Per una corretta fase di avviamento dell'impianto è previsto un sistema di intercettazione dei flussi per l'alimento di una torcia di ispezione. Un serbatoio di accumulo consente un funzionamento del motore a pressione di alimentazione pressoché costante. Completano la sezione fluidodinamica sezioni filtranti di varia misura;

- *una sezione di produzione di energia meccanica*

L'organo nel quale avviene la trasformazione dell'energia chimica del *syngas* in energia meccanica (poi utilizzato per produrre la rotazione dell'asse di un alternatore elettrico) è il motore alternativo a combustione interna. La descrizione delle sue caratteristiche è riportata nel seguito della memoria.

- *una sezione di scambio termico*

E' allo stato progettuale e consiste di più scambiatori di calore posti in guisa da recuperare opportunamente l'energia termica dei gas di combustione, dei fluidi di raffreddamento e dell'olio di lubrificazione del motore.

APPARATO SPERIMENTALE GASSIFICATORE

Il prototipo del reattore oggetto dello studio termofluidodinamico è quello presentato in Figura 2.



Figura 2: Il gasificatore

I parametri rilevati durante le prove sono le temperature in determinate posizioni all'interno del reattore, in uscita del gas a monte del primo filtro e a monte del motore. Per quanto concerne i valori di pressione, essi sono stati rilevati al di sotto della griglia di sostegno della biomassa e prima dell'uscita del *syngas* appena prodotto. I valori di portata sono stati acquisiti per mezzo di manometro differenziale opportunamente posizionato sulla linea del *syngas*; campioni di *syngas* sono stati prelevati e analizzati prima e dopo l'attraversamento dei molteplici filtri posti in serie. Infine sono stati rilevati i valori di polveri e condensati a monte e a valle della sezione di pulizia gas tramite prelievo isocinetico.

IL MODELLO NUMERICO DEL GASSIFICATORE

Per la predizione delle specie del volatile si è fatto ricorso al software CHEMKIN. A partire dalla composizione elementare del combustibile, il codice calcola, per ogni pressione e temperatura, la composizione del gas in condizioni

di equilibrio attraverso la minimizzazione dell'energia libera di Gibbs. Utilizzando come valori di riferimento una temperatura di 1100 K, tipica di un processo di pirolisi, e un valore di pressione pari a quello atmosferico, tipico del funzionamento del gassificatore, sono state indicate e quantificate le specie volatili prodottesi, le cui concentrazioni sono state poi impiegate come condizioni al contorno per il codice FLUENT.

Il codice di calcolo Fluent 6.3 della FLUENT Inc. tratta le equazioni di conservazione della massa, quantità di moto, energia e specie chimiche mediante un metodo di discretizzazione basato sui volumi di controllo. Il modello di turbolenza utilizzato è stato il k-ε standard. La combustione è stata analizzata con due differenti modelli: il modello di equilibrio chimico delle specie tramite funzione densità di probabilità (PDF) ed il modello Finite Rate – Eddy Dissipation, basato sull'imposizione dei parametri relativi alla cinetica delle reazioni reperiti in letteratura. Il secondo modello ha dato migliori risultati nei termini di sovrapposizione dei risultati numerici e sperimentali circa la composizione del *syngas*. La presenza del letto fisso è stata modellata attraverso la creazione di un mezzo poroso avente opportune proprietà.

Validato il modello chimico e fluidodinamico con un caso sperimentale con risultanze note, esso è divenuto utile alla predizione delle performance del gassificatore dell'impianto.

La geometria del modello del gassificatore

Sono stati simulati due diversi domini di calcolo, il primo bidimensionale, il secondo assialsimmetrico.

La simulazione del caso bidimensionale ha avuto lo scopo di trovare la migliore configurazione parametri delle costanti numeriche dell'algoritmo di calcolo atte a garantire la convergenza della soluzione.

Il caso assialsimmetrico, più simile al caso reale, si è rivelato più indicato per ricalcare al meglio le condizioni sperimentali.

Il dominio di calcolo assialsimmetrico è rappresentato nella Figura 3. Esso è costituito da 100746 celle quadrate. Le simulazioni numeriche sono state condotte in regime stazionario.



Figura 3: Dominio di calcolo nel caso assialsimmetrico

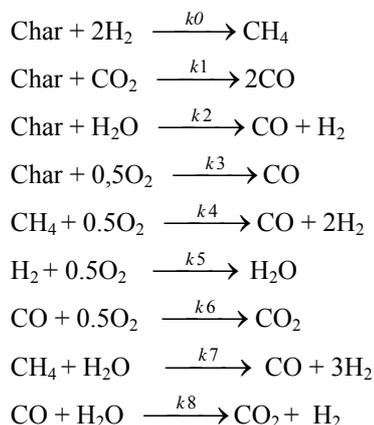
Casi analizzati e condizioni al contorno

Si è dapprima studiato il caso avente parametri operativi corrispondenti a quelli della campagna di prove sperimentali condotta sull'impianto, al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla validità del modello. Successivamente, al

variare della portata di aria di alimentazione e a parità di quantità di combustibile consumato, si è studiato l'andamento delle specie all'uscita.

Nel modello le portate all'ingresso sono introdotte tramite ugelli nella sezione ristretta del reattore. Insieme all'aria di alimentazione, alla temperatura di 300 K, sono presenti le portate di volatile, che successivamente evolverà nelle specie corrispondenti tramite una reazione fittizia infinitamente veloce e di char, sotto forma di molecola gassosa, che a sua volta reagirà in seguito.

Le reazioni di ossido-riduzione attivate nel dominio sono quelle utilizzate da Watanabe e Otaka [4] e N. Gao, A. Li [5]:



con riferimento, per le costanti, ai valori riportati nella tabella 1.

Tabella 1: Dati delle reazioni delle specie gassose.

| | E(J/kgmol) | A (s ⁻¹) |
|---------|----------------------|-----------------------|
| Reaz. 0 | 1,92 10 ⁷ | 4,19 10 ³ |
| Reaz. 1 | 2,71 10 ⁸ | 3,34 10 ¹² |
| Reaz. 2 | 2,52 10 ⁸ | 2,89 10 ¹² |
| Reaz. 3 | 1,30 10 ⁶ | 1,30 10 ¹² |
| Reaz. 4 | 1,26 10 ⁸ | 3,00 10 ⁸ |
| Reaz. 5 | 1,68 10 ⁸ | 6,80 10 ¹⁵ |
| Reaz. 6 | 1,67 10 ⁸ | 2,20 10 ¹² |
| Reaz. 7 | 1,68 10 ⁸ | 4,40 10 ¹¹ |
| Reaz. 8 | 8,38 10 ⁷ | 2,75 10 ¹⁰ |

Successivamente, con riferimento al dominio di calcolo assialsimmetrico, sono state condotte una serie di simulazioni volte a valutare l'influenza della portata di aria sul *syngas* prodotto.

Le condizioni al contorno per il caso corrispondente a quello sperimentale sono indicate nella tabella 2.

Tabella 2: Condizioni al contorno caso sperimentale.

| Aria alimentazione 250 Nm ³ /h | Portata [kg/s] | Frazione di massa |
|--|----------------|-------------------|
| O ₂ | 0,0196 | 0,1735 |
| N ₂ | 0,0655 | 0,5810 |
| Volatile | 0,0211 | 0,1874 |
| Char | 0,0036 | 0,0316 |
| H ₂ O | 0,0030 | 0,0264 |
| Totale [kg/s] | 0,1128 | |
| Totale [Nm ³ /h] | 331,32 | |
| Rapporto aria/combustibile [Nm ³ /kg] | 2,49 | |

Altre prove sono state effettuate attivando le medesime reazioni e con portate di aria di alimentazione pari a 225, 275, 300 e 325 Nm³/h.

All'interno del reattore è stato infine imposto un profilo di temperatura rilevato con termocoppie immerse a diversi livelli nello strato di biomassa durante la marcia dell'impianto.

ANALISI DEI RISULTATI DEL GASSIFICATORE

Caso sperimentale

Le simulazioni riguardanti il calcolo della composizione dei gas in uscita nelle condizioni sperimentali hanno mostrato le percentuali volumetriche riportate nella tabella 3.

Tabella 3: Composizione *syngas* caso reale.

| Aria 250 Nm ³ /h | Valori calcolati (% vol dry basis) | Dati di riferimento (% vol dry basis) |
|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Volatile | 0 | |
| O ₂ | 11,08 | 9,09 - 10,93 |
| CO ₂ | 0,32 | 4,22 - 8,19 |
| N ₂ | 52,26 | 57,17 - 58,92 |
| CH ₄ | 0,91 | 2,89 - 3,25 |
| CO | 20,04 | 11,15 - 15,22 |
| H ₂ | 15,39 | 8,41 - 8,94 |

Per questo caso specifico, la Figura 4 mostra la distribuzione di CO nel dominio di calcolo.

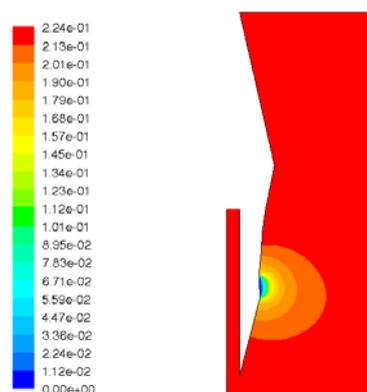


Figura 4: Distribuzione del CO all'interno del gassificatore

Analisi di sensibilità alla variazione della portata di aria

I risultati di tutte le prove (aria di alimentazione pari a 225, 250, 275, 300, 325 Nm³/h) sono riportati nell'istogramma in Figura 5.

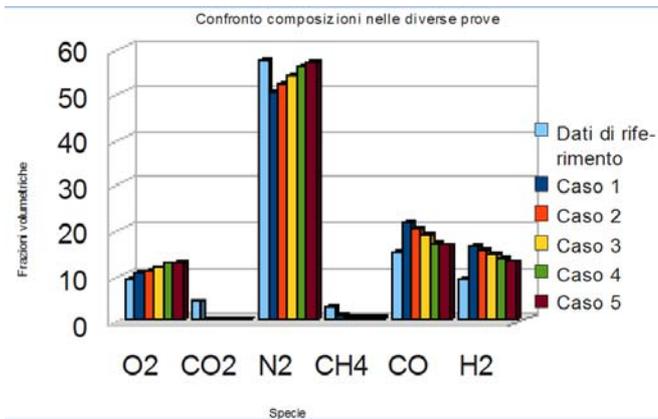


Figura 5: Confronto composizioni syngas

Il comportamento descritto dalla Figura 5 mostra come, all'aumentare della portata di aria di alimentazione, aumenti la presenza di ossigeno e azoto all'uscita. Le variazioni nelle composizioni calcolate, risultano essere rilevanti nella determinazione del potere calorifico. A riprova di ciò, è stata condotta un'analisi di confronto fra i poteri calorifici dei gas (tabella 4).

Tabella 4: Poteri calorifici syngas

| Gas calcolati | Potere calorifico superiore [kJ/Nm ³] | Potere calorifico inferiore [kJ/Nm ³] |
|---------------------------------|---|---|
| Caso 1 (225 Nm ³ /h) | 4835,86 | 4475,72 |
| Caso 2 (250 Nm ³ /h) | 4519,06 | 4181,64 |
| Caso 3 (275 Nm ³ /h) | 4225,98 | 3910,68 |
| Caso 4 (300 Nm ³ /h) | 3864,83 | 3568,34 |
| Caso 5 (325 Nm ³ /h) | 3750,87 | 3470,70 |
| Dati sperimentali | 4386,66 | 4042,46 |

Si può notare come all'aumentare della quantità dell'agente ossidante, nella pratica conseguente all'aumento del carico richiesto dal motore, diminuisca il potere calorifico. L'aumento del carico del motore, infatti, corrisponde ad un maggior consumo di combustibile. E', quindi, necessario immettere più aria nel reattore per produrre più gas. Se da un lato aumenta il gas prodotto, dall'altro la maggiore presenza di ossigeno nel gassificatore fa sì che le reazioni di ossidazione aumentino, e con esse le specie prodotte di reazioni complete, come ad esempio l'anidride carbonica, per sua natura non combustibile. Dai dati sulle composizioni reali dei gas prodotti si nota come le percentuali di specie stabili come l'ossigeno e l'anidride carbonica aumentino, mentre le restanti specie o rimangano sostanzialmente costanti (N₂, H₂) oppure diminuiscano (CO, CH₄). Questo si configura nei fatti come una diluizione del syngas, e una diminuzione dell'efficienza stessa del processo di gassificazione.

Infine la Figura 6 mostra il risultato della predizione degli inquinanti NO_x.

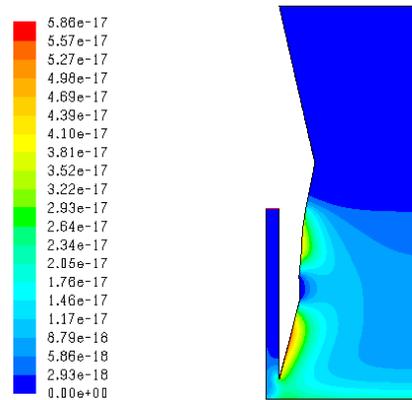


Figura 6: Distribuzione NOx

DESCRIZIONE DEL MOTORE

Il motore utilizzato per la generazione di energia elettrica è il DOOSAN (Daewoo) GE12TIC, propulsore di 12 litri di cilindrata con alimentazione forzata mediante turbocompressore a gas di scarico con intercooler. L'unità in questione è progettata per lavorare a numero di giri costante, selezionabile tra 1500 e 1800 rpm, a seconda che la generazione di corrente sia richiesta a 50 o a 60 Hz; in tali condizioni, il motore eroga rispettivamente 187 e 220 kW di picco e 155 e 180 kW in continuo. Essendo di derivazione Diesel, la camera di combustione è ricavata all'interno del pistone (bowl) ed ha una forma cilindrica. Il volume della camera di combustione è quindi costituito da quello del bowl e da una porzione molto piccola di cilindro, corrispondente allo spazio tra la testa del pistone e il piano delle valvole. La testata del motore è piatta, con la candela non perfettamente centrata, alloggiata in quella che nel motore diesel è la sede dell'iniettore. I condotti che collegano la camera di combustione al collettore di aspirazione e a quello di scarico, sono pressoché identici per le due valvole, presentando un andamento a spirale; partendo da una sezione rettangolare ai lati della testata, si avvolgono intorno alla sede valvola. Per l'utilizzo di tale propulsore alimentato con gas poveri, il rapporto di compressione è stato opportunamente modificato, mantenendo invariata la forma della bowl.

ANALISI NUMERICA DELLA FLUIDODINAMICA DEL MOTORE

Una volta conclusa la fase di modellazione, si è passati alla realizzazione della griglia di calcolo, necessaria al software CFD per discretizzare il volume; è stato utilizzato a questo scopo il software Ansys Gambit. Si è scelto di effettuare lo studio del funzionamento di uno solo dei cilindri del motore; da tale studio è stato estrapolato l'andamento della pressione dinamica sul condotto di aspirazione. Partendo dalle condizioni al contorno note (pressione media nel condotto di aspirazione e nel collettore di scarico) la simulazione del funzionamento del cilindro (realizzata senza tener conto della combustione) ha fornito in output l'andamento della pressione dinamica all'interfaccia tra cilindro e condotto di aspirazione (tale interfaccia è rappresentata dalla superficie di collegamento tra collettore e testata); il dato è stato registrato per ogni angolo di manovella del motore. Il time-step è stato stabilito in modo da corrispondere a un grado di manovella del motore a regime operativo (1500 rpm). Durante le simulazioni sono stati monitorati diversi parametri caratteristici del sistema, tra cui densità, velocità, mass-flow e temperatura in ingresso e in uscita dal condotto; il dato più significativo

deriva dall'analisi del mass-flow rate, che da le indicazioni più immediate sul comportamento del condotto.

L'analisi fluidodinamica è stata finalizzata a determinare il comportamento del condotto di ingresso del motore, riassumibile in termini di massa totalmente aspirata durante un ciclo completo di funzionamento. Si è valutato, inoltre, lo squilibrio tra le masse aspirate dai vari cilindri. Per tener conto di tale deviazione, è stato introdotto un parametro adimensionale così definito:

$$\Delta = \sum_i |m_i - m_a| / m_a$$

con $i = [1;6]$: identificativo del cilindro

m_i : massa aspirata dal cilindro i

m_a : massa media aspirata dai cilindri

Tale parametro risulta tanto più grande quanto maggiore è la disuniformità di funzionamento del condotto; un valore di Δ pari a 0 corrisponde al funzionamento ideale del sistema, con massa aspirata uguale tra tutti i cilindri. L'obiettivo prefissato è quello di ottenere, a parità di sezioni di passaggio, una migliore distribuzione della massa aspirata tra i vari cilindri, riducendo il Δ ; si punta inoltre ad aumentare la massa totalmente aspirata. Di seguito (dalla Figura 7, alla Figura 10) vengono proposte alcune possibili alternative, presentate in base al numero di modifiche da eseguire sullo schema attuale del motore per renderle operative.

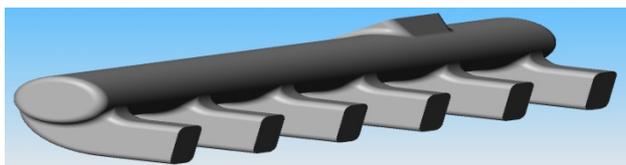


Figura 7: Condotto standard

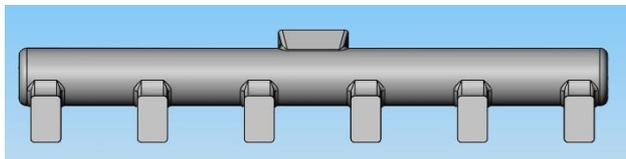


Figura 8: Bocca di aspirazione centrale

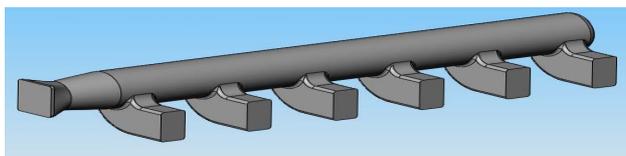


Figura 9: Bocca di aspirazione laterale

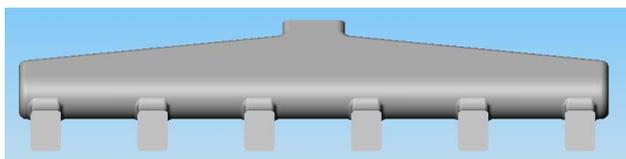


Figura 10: Condotto di aspirazione trapezoidale

Conclusa l'analisi di ogni singolo caso, viene qui proposto un riepilogo delle caratteristiche delle varie soluzioni vagliate.

Per prima cosa viene presentato un confronto tra le masse aspirate dai singoli cilindri nei vari casi (Figura 11), al fine di evidenziare il differente comportamento riscontrato: spicca in tal senso il dato relativo al cilindro 5, dove è più evidente la differenza tra le performance del condotto standard e di quelli

modificati. Degno di nota è anche il comportamento del cilindro 6 nel caso con ingresso laterale, per il quale si ottiene una massa aspirata nettamente superiore a tutte le altre configurazioni; per tutti gli altri cilindri, si nota come le modifiche presentino risultati sempre migliori rispetto al caso standard.

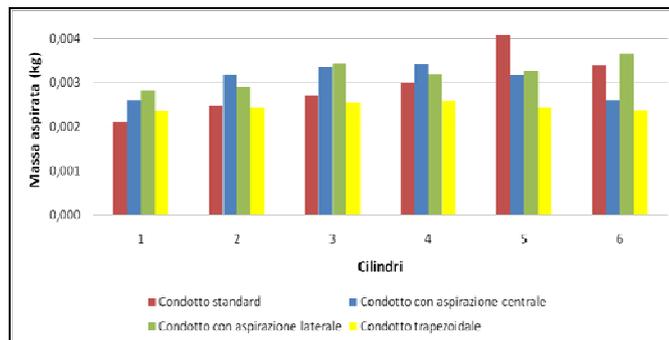


Figura 11: Massa aspirata per cilindro nelle 4 configurazioni

Per meglio comprendere le prestazioni globali dei vari casi studiati, si procede con il confronto tra i parametri caratteristici di ogni condotto e cioè la massa media aspirata e il Δ , riportati in Figura 12.

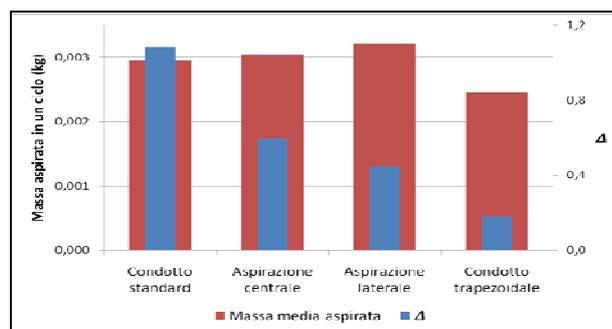


Figura 12: Confronto tra massa media aspirata e Δ nelle 4 configurazioni

Dal grafico è possibile notare come tutte le modifiche attuate comportino una maggiore omogeneità del funzionamento del condotto, rappresentata da una sensibile riduzione del Δ . Il condotto con conformazione trapezoidale, in particolare, fa segnare la migliore performance in questo senso, presentando un valore del parametro adimensionale quasi 10 volte più basso del caso standard. Andando ad analizzare l'andamento della massa media aspirata in un ciclo, indice del riempimento dei cilindri, risulta chiaro che la soluzione migliore sia quella con aspirazione laterale; bisogna tuttavia ricordare che il condotto trapezoidale presenta una sezione di ingresso inferiore, che ne pregiudica il riempimento. Tenendo anche conto della complessità di implementazione delle varie modifiche presentate, l'alternativa migliore potrebbe essere quella con aspirazione centrale che, a fronte di modestissime modifiche in fase di costruzione e di assemblaggio del motore, garantisce un buon incremento di massa aspirata (pari a circa l'8%) e un sensibile miglioramento della distribuzione dell'aria tra i cilindri.

PROVE SPERIMENTALI

Il campionamento del gas di processo è stato effettuato a valle del sistema di purificazione, sulla linea in pressione di alimentazione del motore. Il gas è stato campionato con sacche

per gas a valle del sistema di purificazione senza ausili di sistemi di prelievo poiché la linea è in pressione.

Le tabelle 5 e 6 riassumono i valori rilevati dalle prove.

Tabella 5: frazioni dei gas rilevati in 3 campionamenti

| Gas | prova 1 | prova 2 | prova 3 | Vol1 [m ³] |
|-------------------------------|---------|---------|---------|------------------------|
| H ₂ | 0,089 | 0,084 | 0,0894 | 0,06424 |
| CO | 0,152 | 0,137 | 0,1115 | 0,10958 |
| CH ₄ | 0,032 | 0,031 | 0,0289 | 0,0234 |
| C ₃ H ₆ | 0,002 | 0,003 | 0,0062 | 0,00208 |
| C ₂ H ₆ | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,00043 |

Tabella 6: Valori calcolati del volume di ogni gas rispetto all'intera miscela e del calore fornito da quel gas nella prova i-esima

| Gas | Q1 [MJ] | Vol2 [m ³] | Q2 [MJ] | Vol3 [m ³] | Q3 [MJ] |
|-------------------------------|---------|------------------------|---------|------------------------|---------|
| H ₂ | 0,6936 | 0,06055 | 0,6539 | 0,06436 | 0,69517 |
| CO | 1,3766 | 0,09921 | 1,24640 | 0,08028 | 1,00851 |
| CH ₄ | 0,8424 | 0,02296 | 0,82684 | 0,02080 | 0,74908 |
| C ₃ H ₆ | 0,1933 | 0,00280 | 0,26002 | 0,00446 | 0,41336 |
| C ₂ H ₆ | 0,0279 | 0,00079 | 0,05116 | 0,00072 | 0,04651 |

In tabella 7 sono riportati i valori calcolati del potere calorifico delle singole prove.

Tabella 7: Valori calcolati del potere calorifico

| | Prova1 | Prova2 | Prova3 |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| ΣQ [MJ] | 3,13392 | 3,038395 | 2,912658 |
| LHV [MJ/Nm ³] | 4,35267 | 4,219993 | 4,045359 |

I valori rilevati sperimentalmente sono quelli riportati in tabella 8.

Tabella 8: Valori sperimentali del potere calorifico.

| | Prova1 | Prova2 | Prova3 |
|---------------------------|---------|---------|---------|
| LHV [kJ/Nm ³] | 4360,86 | 4217,21 | 4042,46 |

Nella tabella 9 sono riportate le concentrazioni delle singole molecole di tar nel *syngas* in mg/Nm³ calcolate dalle concentrazioni determinate tramite gascromatografia sulla soluzione di campionamento.

Tabella 9: concentrazione di tar

| Molecola | Totale tar campionati [mg/Nm ³] |
|------------------------|---|
| Pyridine | n.d. |
| Toluene | n.d. |
| Phenol | 51,68 |
| Guaiacol | 3,39 |
| Naphtalene | 117,29 |
| Creosol | 16,41 |
| Acenaphthylene | 27,22 |
| Acenaphthene | 5,19 |
| Fluorene | 6,90 |
| Phenanthrene | 20,89 |
| Anthracene | 6,42 |
| Fluoranthene | 8,35 |
| Pyrene | 8,55 |
| Benzo(a)anthracene | 3,60 |
| Chrysene | 2,84 |
| Benzo(b)fluoranthene | 3,38 |
| Benzo(k)fluoranthene | 1,69 |
| Benzo(a)pyrene | 0,07 |
| IndenoPyrene | 0,09 |
| Dibenzo(a,h)anthracene | 1,85 |
| Benzo(ghi)Perylene | 0,47 |
| Totale | 286,27 |

Il contenuto di tar riportato in tabella 9 è elevato; il sistema necessita ancora di un'attività di ottimizzazione nella sezione di pulizia del *syngas* perché il gas possa direttamente alimentare il motore. All'analisi dei tar gravimetrici va aggiunta, inoltre, quella dei "tar totali cromatografici" misurati in GCMS la cui concentrazione è espressa in g/Nm³ di naftalene.

La concentrazione di "tar gravimetrici" misurata nel gas è di 3,24 g/Nm³. Il contenuto di "tar totali cromatografici" nel gas è di 998 mg/Nm³. Inoltre, nello stesso punto di campionamento il contenuto di acqua e di particolato nel gas sono rispettivamente di 44,0 e 1,5g/Nm³.

Nelle figure sottostanti sono riportati i cromatogrammi GCMS relativi rispettivamente alla soluzione di campionamento e all'estratto in soxlet del ditale filtrante utilizzato per il campionamento del gas e la determinazione dei tar e del particolato. Dall'analisi dei cromatogrammi e dei relativi spettri di massa effettuata con l'ausilio di una libreria Wiley per spettri GCMS si evince che le molecole sono prevalentemente di natura aromatica e policiclica aromatica, vi è scarsa presenza di altre famiglie di molecole.

Nella figura a seguire invece è riportato il cromatogramma GCMS di un campione di acqua prelevata dal circuito di purificazione del gas dell'impianto al termine della prova. durante la quale sono stati processati circa 2400 kg di biomassa e prodotti circa (stima) 3000 Nm³ di gas.

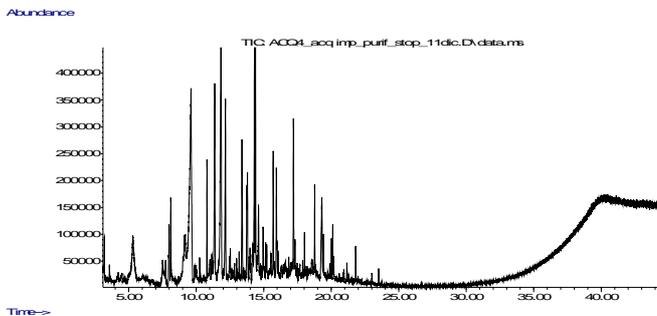


Figura 13: Cromatogramma GCMS relativo alla soluzione di campionamento

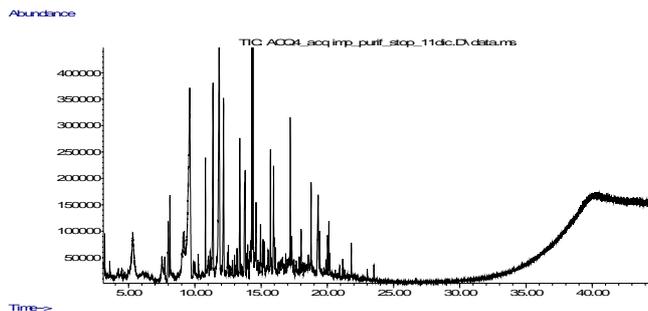


Figura 14: Cromatogramma GCMS relativo alla soluzione di campionamento e all'estratto in soxlet

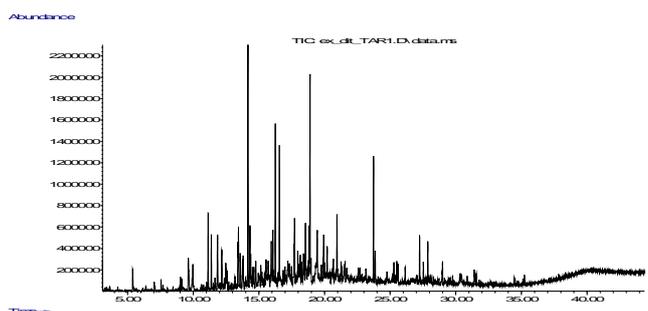


Figura 15: Cromatogramma GCMS di acqua prelevata dal circuito di purificazione del gas al termine della prova

Dall'analisi degli spettri di massa delle numerose molecole presenti nel cromatogramma effettuata sempre con l'ausilio della libreria Wiley emerge che contrariamente ai precedenti campioni la quasi totalità delle molecole appartiene a:

- alcoli e fenoli (fenolo, cresolo);
- Guaiacoli (Guaiacolo, creosolo);
- Furani
- altri composti ossigenati.

In questo campione il naftalene rappresenta solo lo 0,5 % del totale.

Determinato il residuo totale delle molecole presenti nel campione acquoso si è stimata la concentrazione totale di queste molecole presenti nel gas all'uscita del gassificatore. Il valore stimato è di circa 15-18 g/Nm³.

Nella tabella seguente vengono invece presentati i valori di portata di gas umido misurata con tubo Darcy a valle del sistema di purificazione sulla linea di alimentazione motore a 50-60 °C nello stesso punto di campionamento del tar.

Tabella 10: Valori di portata di gas umido misurata con tubo Darcy

| Potenza motore [kW] | Portata [Nm ³ /h] | |
|---------------------|------------------------------|------|
| | 0°C | 25°C |
| 0 | 168 | 171 |
| 50 | 260 | 265 |
| 75 | 360 | 367 |

Il relativo consumo stimato di biomassa in 30 min della prova a 80 kW è stato di 300-350 kg/h.

La tabella sottostante esprime invece il rendimento del motore in funzione delle portate e potenze rilevate sfruttando i valori del potere calorifico precedentemente calcolati.

Tabella 11: Rendimento del motore in funzione delle portate e potenze rilevate

| Portata gas@0°C [Nm ³ /h] | Portata gas@25°C [Nm ³ /h] | P _u [kW] | H _i [MJ/Nm ³] | η ₁ | η ₂ |
|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|
| 168 | 171 | 0 | 4,36 | 0 | 0 |
| 260 | 265 | 50 | 4,22 | 0,16416 | 0,16106 |
| 360 | 367 | 75 | 4,04 | 0,18553 | 0,18199 |

Sono inoltre stati condotti a valle del motore due diversi prelievi di gas di scarico con l'obiettivo di analizzare il contenuto in inquinanti, in particolar modo delle concentrazioni di NO_x, CO₂, CO, HC. L'analisi è stata condotta tramite un misuratore AVL DiCom 4000, la cui linea di misurazione è stata montata in corrispondenza dello scarico del motore.

La tabella di seguito raccoglie i risultati ottenuti.

Tabella 12: Composizione gas di scarico per due rilevazioni

| | Rilevazione 1 | Rilevazione 2 |
|---------------------------|---------------|---------------|
| CO[%vol] | 2,15 | 0,40 |
| CO ₂ [%vol] | 9,40 | 12,90 |
| NO _x [ppm vol] | 64,00 | 69,00 |
| HC[ppmHEX] | 324,00 | 59,00 |

Dai dati emerge come il contenuto degli NO_x e degli HC risulta essere piuttosto basso rispetto ai valori standard dei combustibili convenzionali. I primi sono sintomo di una temperatura di combustione piuttosto bassa, dovuta al basso potere calorifico del *syngas*, mentre i secondi indicano valori del picco di pressione minori, che comportano un minor forzamento degli idrocarburi negli interstizi del cilindro non interessati dalla combustione e un conseguente livello più basso di HC. Per quanto riguarda la percentuale di CO, essa risulta essere più alta del normale nella prima rilevazione, indice di una combustione incompleta, mentre è abbastanza bassa nella seconda.

RECUPERO DEL CALORE

L'impianto a biomasse oggetto di studio in questa memoria prevede un assetto cogenerativo per utenze organiche ed esterne. Il sistema di recupero termico (in Figura 16) prevede l'utilizzo del calore proveniente da:

- gas esausti del motore a combustione interna;
- intercooler;
- acqua di raffreddamento del motore;
- acqua di raffreddamento di gassificatore e sistema di pulizia del *syngas*.

La potenza termica recuperabile non è disponibile ad

un'unica temperatura e ciò determina maggiore complessità di impianto. Bisogna, infatti, porre nella giusta sequenza gli scambiatori dedicati al recupero per consentire un efficiente scambio termico in grado di soddisfare le esigenze delle utenze interne ed esterne interfacciate all'impianto.

Gli utilizzi interni previsti e dedicati all'innalzamento del rendimento complessivo di impianto sono quelli che riguardano l'essiccazione a monte del sistema di alimentazione e la condensazione dei residui carboniosi in uscita dalle sezioni filtranti. Per questi due utilizzi sono necessari due diversi dispositivi: il primo, posizionato a monte della tramoggia di carico della biomassa lignocellulosica; il secondo in linea a fine trattamento dei gas.

Alla prima esigenza è previsto fare fronte con un essiccatore a nastro e alla seconda con un assorbitore ad acqua e bromuro di litio.

Il dimensionamento dei dispositivi appena indicati prevede un loro utilizzo in differenti condizioni di carico, in dipendenza della natura e dei contenuti di umidità della biomassa legnosa.

Analogo approccio progettuale è mantenuto per la sezione di scambio per l'utenza termica esterna. Per il sistema è prevista una configurazione tale per cui è possibile ovviare alle diverse e mutanti esigenze dell'utenza in dipendenza delle stagioni o di regimi di utilizzo della potenza termica, nonché della temperatura e della portata del fluido vettore, nei limiti delle potenzialità termiche dell'impianto.

Un complicato sistema idraulico, dotato di elettrovalvole sensibili alle richieste dell'utenza (nell'impianto in questione simulata, data la sua natura prototipale), devia i flussi per soddisfare le esigenze momentanee e per alimentare di volta in volta lo scambiatore per la potenza termica o l'assorbitore (o entrambi) per la generazione di potenza frigorifera. Esso garantisce la stabilità delle condizioni di ritorno del flusso all'impianto a biomasse per non alterarne il funzionamento.

Il sistema di backup per il rilascio della potenza termica in eccesso verso l'aria esterna è sostituito da un radiatore dimensionato per la somma delle potenze termiche uscenti dal sistema a biomasse.

La quantificazione della potenza termica disponibile e proveniente dai fluidi di processo nei vari punti di impianto è

stata effettuata con il ricorso a modelli progettuali e previsionali tradizionali. Le misure in campo di temperature e portate sui fluidi di raffreddamento hanno poi consentito una migliore approssimazione del calcolo di progetto.

CONCLUSIONI

Sono stati condotti studi complessi aventi natura diversa sull'impianto di produzione di energia a biomasse del Consorzio GI_Innovazione di Monopoli. Al progetto dell'impianto nel suo insieme sono seguite analisi e attività di ottimizzazione per tutti i dispositivi coinvolti con approccio teorico e sperimentale.

Per la camera di reazione per la produzione del *syngas*, oggetto di simulazione numerica con l'utilizzo di CHEMKIN e poi di FLUENT, tutti gli studi hanno consentito di predire e verificare con sufficiente approssimazione le prestazioni dell'impianto nel suo insieme e di operare scelte e cambiamenti per la massimizzazione delle prestazioni sia elettriche sia termiche. Il lavoro costituisce una buona base di partenza per la progettazione e l'ottimizzazione di sistemi di gassificazione a letto fisso, per i quali finora non si erano condotti su larga scala studi basati su simulazioni numeriche.

Il motore alternativo a combustione interna è stato oggetto di una progettazione della sua camera di combustione adattata alle necessità del *syngas* e di studi riguardo l'uniformità dell'alimentazione e l'ottimizzazione della combustione, al regime di rotazione di interesse dell'impianto al variare del carico. I risultati in termini di prestazioni hanno premiato le scelte progettuali e consentiranno di tradurre le conoscenze raccolte in efficienti modifiche a propulsori di taglia anche superiore.

La sezione di recupero termico è stata progettata in delle esigenze esterne, sia di quelle di tipo organico, con un approccio legato alle finalità sperimentali del prototipo di impianto. L'integrazione con le richieste delle utenze termiche effettive necessita, tuttavia, sempre di adattamento alle reali condizioni di esercizio dell'impianto.

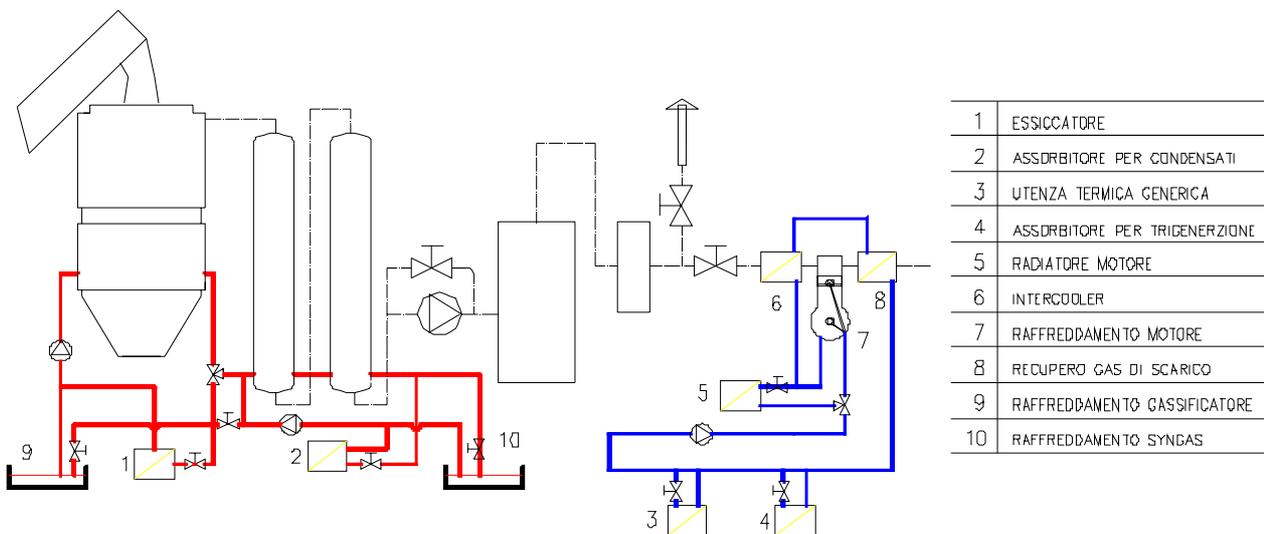


Figura 16: Layout di recupero termico. In figura non vengono riportati i collegamenti per la logica di funzionamento

RINGRAZIAMENTI

Questi studi sono stati resi possibili anche dalla fattiva e costante azione di Luigi ed Enzo Galanto, rispettivamente Presidente e Amministratore del Consorzio GI_INNOVAZIONE di Monopoli (BA) beneficiario di un progetto di ricerca e sviluppo a valere su fondi della Regione Puglia (POR Puglia 2000-2006 Ricerca e sviluppo tecnologico) e del gruppo diretto dall'ing. Giacobbe Braccio attivo presso il Centro Ricerche ENEA Trisaia (MT). A tutti coloro che hanno contribuito alla riuscita di queste attività, gli autori di questa memoria rivolgono i più vivi ringraziamenti.

BIBLIOGRAFIA

1. SR. Tewfik Biomass utilization facilities and biomass processing technologies. Energy Edu Sci Technol 2004;14: 1–19.
2. D. H. Lee , H. Yang , R. Yan, D. T. Liang. Prediction of gaseous products from biomass pyrolysis through combined kinetic and thermodynamic simulations. Fuel 86 (2007) 410–417.
3. R. Scharler, I. Obernberger, G. Langle, J. Heinzle. CFD analysis of air staging and fuel gas recirculation in biomass grate furnaces. Proceedings of the first World Conference on Biomass for Energy and Industry, June 2000, Sevilla, Spain.
4. H. Watanabe , M. Otaka: Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier. Fuel 85 (2006) 1935–1943
5. N. Gaoa, A. Li: Modeling and simulation of combined pyrolysis and reduction zone for a downdraft biomass gasifier. Energy Conversion and Management Volume 49, Issue 12, December 2008
6. P. G. Tewari, J. P. Subrahmanyam and M. K. Gajendra Babu “Experimental investigations on the performance characteristics of a producer gas-fueled spark ignition engine”. Sae Technical Paper 2001