

Bando di gara per progetti di ricerca di cui all'art. 10, comma 2, lettera b) del decreto 26 gennaio 2000
Decreto direttoriale 30 giugno 2014 - Ministero dello sviluppo economico

RELAZIONE FINALE del PROGETTO SYNBIOSE

Codice Proposta	CCSEB_00171		
Titolo completo	Gassificazione di biomasse lignocellulosiche in sistemi di cogenerazione di piccola taglia (< 200 kW) per applicazioni nel settore terziario		
Tema di ricerca	B.1.1 - Energia elettrica da biomasse		
Capofila	SIRAM S.p.A.		
Proponente 2	Università degli Studi di Ferrara - Dipartimento di Ingegneria		
Proponente 3	Università degli Studi di Parma - Centro Interdipartimentale per l'Energia e l'Ambiente		
Data inizio progetto	23/02/2017	Data fine progetto	15/05/2021

COSTI E CONTRIBUTI

COSTO FINALE DEL PROGETTO APPROVATO		1.405.564,86 €
di cui: Ricerca Industriale	909.985,75 €	Sviluppo sperimentale 495.579,10 €
CONTRIBUTO AMMESSO SENZA MAGGIORAZIONI		679.107,42 €
CONTRIBUTO AMMESSO COMPLESSIVO (incluse maggiorazioni)		785.169,88 €

SINTESI DEL PROGETTO

ITALIANO

Il progetto si è proposto, attraverso l'installazione di un impianto complesso costituito da un sistema di cogenerazione syngas (con reattore downdraft o equicorrente a letto fisso con ciclo autotermico) principale di potenzialità di circa 125 kWe e da un parallelo sistema sperimentale di gassificazione di potenzialità di circa 30 kWe, di costituire una piattaforma che possa fungere da volano per la diffusione di questa tecnologia, attraverso il monitoraggio dei parametri di esercizio e la sperimentazione di una molteplicità di tipologie di biomasse. Tale scelta progettuale ha permesso attraverso il sistema principale da circa 125 kWe di effettuare prove di durata soddisfacendo anche le richieste dell'utenza, mentre la taglia minore del sistema sperimentale opera in parallelo con maggiore flessibilità per i test sulle varie tipologie di miscele di biomasse, in modo tale da compilare in modo efficace il catalogo nel quale classificare le biomasse in base alle prestazioni ottenute. Il progetto, attraverso l'utilizzo di un approccio metodologico rigoroso nella pianificazione e nell'esecuzione della campagna sperimentale e di tecniche di modellizzazione termodinamica e simulazione termofluidodinamica, ha avuto la finalità di fornire strumenti e linee guida sia per l'esercizio ottimale e la manutenzione efficiente di questa tipologia di sistema di produzione dell'energia da biomasse, sia per la riprogettazione ottimizzata dei suoi componenti. Sono stati sviluppati modelli termodinamici del gassificatore e del sistema nel suo complesso ed effettuate simulazioni termofluidodinamiche sul gassificatore e sul circuito del syngas, oltre che progettato ed installato un sistema di acquisizione necessario alle sperimentazioni. I principali output del progetto sono stati: (i) un studio che ha indagato la correlazione tra le prestazioni del sistema di gassificazione e le

caratteristiche delle biomasse utilizzate, (ii) un modello del processo di gassificazione che determini la composizione del gas di sintesi al variare della tipologia della biomassa utilizzata e dei parametri operativi d'impianto, (iii) una metodologia basata su un approccio integrato OD-3D per la simulazione del sistema complessivo e (iv) la definizione di linee guida per l'esercizio ottimale dell'impianto, la sua efficiente manutenzione e il suo upgrade tecnologico.

INGLESE

Through the installation of a complex plant made up of a main syngas cogeneration system (with downdraft reactor or fixed-bed equicurrent reactor with autothermal cycle) with a capacity of about 125 kWe and a parallel experimental gasification system with a capacity of about 30 kWe, the project aimed to create a platform that could act as a driving force for the dissemination of this technology, by monitoring the operating parameters and experimenting with a variety of biomass types. This design choice has made it possible, through the main system of about 125 kWe, to carry out tests of duration that also meet the demands of the user, while the smaller size of the experimental system operates in parallel with greater flexibility for testing the various types of biomass blends, so as to effectively compile the catalogue in which to classify the biomasses according to the performance obtained. The project, through the use of a rigorous methodological approach in the planning and execution of the experimental campaign and of thermodynamic modelling and thermo-fluid dynamics simulation techniques, aimed to provide tools and guidelines both for the optimal operation and efficient maintenance of this type of biomass energy production system, and for the optimised redesign of its components. Thermodynamic models of the gasifier and of the system as a whole were developed, and thermofluidodynamic simulations were carried out on the gasifier and the syngas circuit, and an acquisition system necessary for the experiments was designed and installed. The main outputs of the project were: (i) a study that investigated the correlation between the performance of the gasification system and the characteristics of the biomasses used, (ii) a model of the gasification process that determines the composition of the synthesis gas as the type of biomass used and the plant operating parameters change, (iii) a methodology based on an integrated OD-3D approach for the simulation of the overall system, and (iv) the definition of guidelines for the optimal operation of the plant, efficient maintenance and technological upgrade.

1. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO E OBIETTIVI

Lo stato dell'arte dell'utilizzo di biomasse in produzione di energia elettrica era fundamentalmente limitato all'impiego di biomasse legnose in impianti a vapore di taglia medio-grande e biomasse fermentescibili per la produzione di biogas da utilizzare in motori a combustione interna. La dimensione di questi impianti (sia in termini di potenza, sia in termini di spazio) limita la loro integrazione in contesti antropizzati e il conseguente impiego in assetto cogenerativo del calore scaricato. Sulle piccole taglie sono state proposte alcune soluzioni basate sulla combustione di biomassa lignocellulosica e l'impiego del calore in cicli termodinamici in impianti ORC e microturbine, o anche, in via più prototipale, in motori Stirling. Tali tecnologie a combustione esterna aggiungono al rendimento intrinseco del ciclo termodinamico quello dovuto alla combustione e allo scambio termico, limitando il rendimento elettrico complessivo a valori decisamente inferiori al 20 %. L'utilizzo di sistemi per il contenimento delle emissioni, necessario in contesti a elevata antropizzazione, porta ad un ulteriore diminuzione delle performance di questi sistemi. Una possibile soluzione poteva essere rappresentata dall'utilizzo di sistemi a combustione interna alimentati con gas di sintesi derivato dalla gassificazione di biomasse legnose in quanto questi sistemi evitano l'intermedio dello scambio termico e impiegano il gas in sistemi quali i motori endotermici alternativi che, per le piccole taglie caratteristiche della generazione distribuita, garantiscono rendimenti sufficientemente elevati e consolidate tecnologie per il contenimento delle emissioni. Benché venissero proposte soluzioni impiantistiche commerciali, l'impiego di tali sistemi comportava ancora alcune criticità (quali la sensibilità alle caratteristiche delle biomasse e le problematiche di manutenzione della linea di pulizia del gas di sintesi) che ne limitavano la diffusione: in Italia vi erano alcune installazioni sperimentali effettuate all'interno delle attività di progetti di ricerca, quali il progetto Agrogas con un impianto con motore a combustione interna da 70 kW e il progetto CISA con un impianto con motore Stirling. Alla data di presentazione della proposta progettuale, quindi, non erano presenti in Italia impianti di medio-piccola taglia cogenerativi alimentati da gas di sintesi che avessero operato per un sufficiente numero di ore per fornire informazioni attendibili riguardo l'affidabilità di questa tecnologia. Anche in Europa vi erano alcuni esempi di impianti dimostrativi di gassificatori, tra i quali si possono citare quelli del DTU a Roskilde e Lyngby in Danimarca o il VIPP-VORTEX a Piteå in Svezia. In Germania si stimava che tra il 2000 e il 2010 fossero stati installati 50 impianti di gassificazione. Nel 2008 risultavano operative 25 installazioni di potenza compresa tra 10 e 270 kW. Analizzando le cinque installazioni che avevano raggiunto 4000 ore di funzionamento si è arrivati alla conclusione che la tecnologia ancora non è affidabile e che la profittabilità la si può raggiungere con l'utilizzo efficiente del calore e la riduzione della manutenzione. Il panorama internazionale offriva invece una molteplicità di soluzioni impiantistiche in particolar modo in India e Sri Lanka, ma il differente contesto economico, normativo e tecnologico rendeva difficilmente esportabili queste esperienze in Italia. Il progetto si è proposto, attraverso l'installazione presso la centrale termica del Campus Scienze e Tecnologie dell'Università degli Studi di Parma di un impianto complesso costituito da un sistema commerciale di cogenerazione syngas e di un parallelo sistema sperimentale di gassificazione, di monitorare l'esercizio dell'impianto stesso e la sperimentazione di una molteplicità di tipologie di biomasse e di costituire una piattaforma che potesse fungere da volano per la diffusione di questa tecnologia. Tale configurazione ha permesso di effettuare le prove di durata garantendo il soddisfacimento delle richieste dell'utenza attraverso il sistema commerciale di cogenerazione syngas di progetto alimentato con biomassa, mentre il sistema sperimentale di gassificazione ha operato in parallelo ed è stato utilizzato per i test sulle varie tipologie e miscele di biomasse. Il syngas prodotto da quest'ultimo è stato analizzato in laboratorio. In primo luogo, l'impianto è stato dimensionato sulle richieste di base e integrato nelle reti elettriche e di teleriscaldamento/raffrescamento e quindi il suo esercizio non ha avuto natura esclusivamente dimostrativa, ma è stato finalizzato al soddisfacimento dei fabbisogni del campus in ausilio ai sistemi attualmente presenti. Questo ha consentito di accumulare un numero consistente di ore di funzionamento che hanno permesso di valutare oggettivamente l'affidabilità di questo tipo di sistemi. In secondo luogo, la sperimentazione sistematica di cippato di diverse essenze arboree, dell'utilizzo di diverse tipologie di pretrattamento e dell'utilizzo di biomasse residue in miscela con il cippato ha consentito di compilare un catalogo nel quale classificare queste biomasse in funzione delle prestazioni ottenute (composizione e portata gas e rendimenti) non in condizioni di laboratorio (es. termogrammi), ma in opera.

Questo catalogo è stato utilizzato per orientare verso la massima efficienza la produzione ad hoc di cippato per gassificazione. Infine la modellazione del processo di gassificazione, del sistema nel suo complesso e dei suoi componenti ha portato, oltre ad una maggiore conoscenza dei fenomeni alla base del funzionamento dell'impianto, alla definizione ottimale dei parametri operativi in funzione delle caratteristiche della biomassa utilizzata e a linee guida per l'ottimale esercizio e manutenzione (anche predittiva) dell'impianto. Tali risultati hanno rappresentato anche una solida base per un eventuale spunto di riprogettazione di componenti da parte dei produttori. Il corpo di conoscenze derivanti dall'esecuzione di questo progetto può consentire a Siram di proporre questa tecnologia ai propri clienti (in particolare, plessi scolastici, ospedali e centri direzionali) aumentando la penetrazione della piccola cogenerazione da biomasse e consentendo al sistema elettrico di implementare una fonte rinnovabile efficiente e che non presenta le criticità dovute alla non programmabilità di altre fonti quali quella eolica e solare. L'esecuzione di questo progetto ha consentito l'instaurazione di una piattaforma di sviluppo di sinergie tra università e azienda. A questo proposito, il sistema di generazione e le reti elettrica, di teleriscaldamento e teleraffrescamento interne del campus di Parma hanno rappresentato un laboratorio permanente in scala reale. Va inoltre evidenziato come ai fini della promozione della soluzione tecnologica, la collocazione dell'impianto all'interno di un campus universitario abbia svolto un ruolo fondamentale di moltiplicatore dei risultati del progetto. Il presente progetto di ricerca ha rappresentato inoltre per Siram un'importante occasione per incrementare il proprio know-how nell'ambito della progettazione, installazione e gestione di impianti di piccola e microcogenerazione a gassificazione, con particolare riferimento alla ottimizzazione delle modalità di produzione del gas di sintesi e al miglioramento delle prestazioni complessive del sistema. Tali esperienze, opportunamente inserite all'interno di un processo di industrializzazione di prodotto, potranno trovare valida applicazione per pervenire alla riproducibilità dell'impianto in altri ambiti applicativi. L'esecuzione di questo progetto di ricerca e le specifiche esperienze maturate hanno consentito al proponente Siram di aumentare la propria competitività e la propria penetrazione di mercato nell'ambito della realizzazione di impianti di cogenerazione a biomassa. L'esperienza acquisita nel corso del progetto di ricerca potrà essere proficuamente applicata nell'ambito dei processi di ottimizzazione dei costi di approvvigionamento del combustibile, di installazione e di manutenzione della specifica tecnologia in esame, e tali risultati possono portare a ricadute positive sulla competitività aziendale sul mercato, con incremento della capacità di azione all'interno di esso rispetto alla concorrenza.

2. RISULTATI RAGGIUNTI

2.1 Caratterizzazione sperimentale di diverse tipologie di biomassa

Durante l'attività sperimentale è stata effettuata la caratterizzazione chimico-fisica di diverse essenze legnose, servendosi dell'impianto sperimentale di taglia minore da circa 25 kW elettrici, sfruttando la sua maggiore flessibilità che ha permesso di sperimentare varie essenze in tempi brevi.

Per quanto riguarda i pretrattamenti sulla biomassa si è scelto di orientarsi sulla semplice essiccazione per quanto riguarda il cippato di legna vergine: sono dunque state testate essenze legnose sia essiccate naturalmente che artificialmente. Sono state scelte 8 differenti essenze legnose di seguito riportate: I. Pino, II. Faggio, III. Rovere, IV. Castagno, V. Robinia, VI. Noce, VII. Ciliegio, VIII. Pioppo.

Tutte le essenze sopra citate sono state scelte in accordo con il principio della filiera corta e provengono principalmente dalla zona dell'appennino parmense, approvvigionate presso un fornitore locale.

Tali essenze sono state testate all'interno del sistema sperimentale di gassificazione, della potenzialità di circa 25 kW elettrici. Non è stato possibile effettuare questa tipologia di studio sull'impianto da 125 kW elettrici in quanto le inerzie dovute alla maggiore dimensione dell'impianto, i tempi necessari per la pulizia e il ripristino delle condizioni iniziali prima di iniziare una nuova sessione di sperimentazione con altra essenza, etc. si sono rivelati un ostacolo rilevante che ha messo un freno a questo tipo di sperimentazione. Un altro ostacolo è stato rappresentato dal fatto che il fornitore di cippato non sarebbe stato in grado di approvvigionare un quantitativo sufficiente di biomassa di una singola essenza per alimentare il sistema da 125 kW. Tale sistema infatti, per portarsi a regime e permettere di collezionare un quantitativo congruo di dati attendibili, avrebbe richiesto un paio di giorni di lavoro per ogni essenza, richiedendo circa 24 mc di cippato accuratamente selezionato. Per effettuare lo stesso tipo di sperimentazione sull'impianto da 25 kW si è invece rivelato sufficiente un singolo big bag da 1 mc.

Unitamente alle essenze legnose precedentemente citate, testate nella forma di cippato di legno vergine scortecciato, essiccato artificialmente ed essiccato naturalmente, sono stati testati i gusci di nocciola, con l'intenzione di analizzare uno scarto dell'industria agricola-alimentare, così come previsto inizialmente dal progetto. Tutte le essenze legnose delle specie arboree sopra citate sono state testate in forma di cippato essiccato sia naturalmente che artificialmente.

Le analisi per la caratterizzazione chimico-fisica della biomassa e del syngas da essa ottenuto hanno previsto: (i) composizione elementale, (ii) contenuto in ceneri, (iii) umidità, (iv) potere calorifico e (v) profilo termogravimetrico, e sul syngas: (i) composizione, (ii) umidità, (iii) potere calorifico e (iv) sostanze organiche volatili.

La fase di test è stata condotta alimentando la biomassa al gassificatore sperimentale da 25 kW elettrici a servizio del motore a combustione interna alimentato a syngas ad esso accoppiato. Una volta raggiunte le condizioni di regime il syngas è stato campionato dal tecnico del laboratorio certificato che ha effettuato le analisi. Il punto di campionamento è stato scelto, all'interno della linea di impianto, a valle degli stadi di filtrazione principale, rappresentati da un ciclone, uno scambiatore di calore che comporta la condensazione di una quota parte di tar, e di un filtro a maniche di tessuto.

Il gas così campionato è stato raccolto in sacche di tedlar per essere inviato al laboratorio. Contestualmente si è proceduto alla raccolta di un campione di biomassa finalizzata all'analisi di laboratorio.

I risultati delle analisi sono stati poi elaborati al fine di indagare l'eventuale sussistenza di rapporti di correlazione tra la natura della biomassa alimentata e le caratteristiche del syngas prodotto e conseguentemente delle prestazioni del sistema cogenerativo. I report delle analisi effettuate in concomitanza delle prove di gassificazione delle essenze arboree sono stati raccolti e le informazioni contenute sono state riorganizzate in *Tabella 1*.

Nella parte sinistra (biomassa) è riportato il resoconto delle analisi effettuate sul cippato in termini di analisi elementale, contenuto in ceneri, umidità e potere calorifico su base secca.

Nella parte destra (syngas) è invece riassunto l'esito delle analisi effettuate sul syngas in termini di composizione, potere calorifico e contenuto in tar (valutato come somma delle sostanze organiche rilevate dalle analisi) e umidità su base anidra.

Tabella 1: Risultati delle analisi su biomassa e syngas

Essenza	Essiccazione	BIOMASSA								SYNGAS									
		C	H	O	N	S	Ceneri	Umidità	PCI	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	O ₂	N ₂	H ₂ O	TAR	PCI
		%	%	%	%	%	%	%	kJ/kg s.s	%	%	%	%	%	%	%	g/Nm ³	mg/Nm ³	MJ/Sm ³
Castagno	Naturale	46,5	2,6	49,7	0,4	0,4	0,5	22,0	17350	18,6	27,5	2,8	12,8	0,6	1,1	36,4	19,6	4457	6,41
Ciliegio	Naturale	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Faggio	Naturale	45,8	5,7	46,9	0,7	0,1	0,8	8,7	17740	14,6	24,1	3,3	10,7	0,7	2,7	42,8	42,9	37717	7,13
Noce	Naturale	45,0	0,6	53,0	0,3	0,1	1,1	31,0	18100	15,3	29,6	2,9	15,0	0,3	0,5	36,4	53,5	1793,1	6,23
Pino	Naturale	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Pioppo	Naturale	44,7	5,7	48,3	0,1	0,1	1,0	16,0	17730	15,0	25,4	2,6	11,7	0,1	3,1	41,8	31,5	17310	5,83
Robinia	Naturale	48,0	3,6	46,9	0,2	0,1	1,2	18,0	11080	20,6	21,4	3,0	14,2	0,1	0,8	39,8	35,3	5678	6,55
Rovere	Naturale	43,9	5,0	48,0	0,4	0,1	2,7	18,0	N.D.	17,5	23,8	3,1	11,8	0,3	2,3	41,2	28,2	2271	5,58
Castagno	Artificiale	47,8	5,9	45,2	0,4	0,1	0,7	2,5	16370	17,8	29,3	3,5	14,2	0,4	1,8	33,0	63,8	841	6,31
Ciliegio	Artificiale	47,1	6,1	46,0	0,1	0,1	0,6	1,1	15473	18,6	24,1	2,7	17,3	0,6	1,0	35,7	29,9	2713	5,61
Faggio	Artificiale	39,2	5,0	54,7	0,2	0,1	0,8	5,1	16710	19,7	27,4	3,6	16,1	0,8	1,4	31,0	62,9	9922	6,52
Noce	Artificiale	42,6	5,4	50,7	0,1	0,2	1,1	7,5	16128	19,7	22,2	2,8	11,4	0,3	2,6	41,1	36,8	2241	5,57
Pino	Artificiale	44,3	5,3	50,3	0,0	0,1	< 0,5	6,5	18290	20,1	24,0	4,0	16,9	0,7	1,5	32,8	66	11524	6,21
Pioppo	Artificiale	47,5	5,6	45,0	0,2	0,2	1,5	0,9	N.D.	24,3	24,0	3,1	8,0	0,1	1,8	38,7	37,4	5447	6,41
Robinia	Artificiale	46,4	5,8	46,2	0,7	0,1	0,7	< 1,0	N.D.	18,0	26,4	3,5	17,6	0,9	1,1	32,3	61,6	7151	6,45
Rovere	Artificiale	44,6	5,8	46,7	0,6	0,1	2,2	< 1,0	16570	18,6	28,2	3,4	14,4	0,4	1,6	32,5	64,5	37298	7,67

I risultati consistono in:

- Analisi chimico-fisiche della biomassa
- Analisi chimico-fisiche del syngas
- Relazioni e schede di campionamento
- Analisi dei risultati della sperimentazione
- Database contenente caratteristiche delle biomasse e del gas di sintesi

2.2 Modellazione termodinamica

Le attività di modellazione termodinamica del processo di gassificazione e dell'impianto di gassificazione e cogenerazione sono eseguite in parallelo, mentre nella parte finale del progetto, una volta resi disponibili le rilevazioni sperimentali, si è effettuata la calibrazione dei modelli. In particolare, riguardo la modellazione del processo di gassificazione è stata effettuata una ricerca bibliografica per individuare i principali approcci utilizzati ed analizzarne punti di forza, di debolezza, opportunità e minacce. Gli approcci individuati sono stati classificati nei modelli all'equilibrio termodinamico, modelli cinetici e modelli tipo rete neurale artificiale. Date le finalità per le quali si sarebbe sviluppato il modello nel progetto, cioè la valutazione dell'influenza della tipologia di biomassa e delle condizioni operative sulla quantità di gas di sintesi prodotta e sulla sua composizione, si è deciso di scegliere un approccio di tipo fisico combinando gli approcci di simulazione all'equilibrio (in particolare, quello di tipo stechiometrico) per le zone di essiccazione, pirolisi e ossidazione e quello cinetico per la zona di riduzione. È stata inoltre effettuata una ricerca nella letteratura scientifica dei modelli per la previsione della produzione di tar nel syngas e sono state ricavate delle correlazioni al fine di includerle nel modello di calcolo. Il modello è stato implementato nell'ambiente di calcolo Matlab, che grazie alle sue potenzialità ne ha permesso lo sviluppo e il debugging, e infine nell'ambiente di calcolo Scilab, che essendo freeware permette l'utilizzo libero del modello senza la necessità di acquisire licenze. Riguardo la modellazione dell'impianto di gassificazione e cogenerazione è stato in primo luogo analizzato l'impianto oggetto di modellazione individuandone i componenti principali, classificandoli come componenti algebrici e dinamici e definendo uno schema complessivo del modello in modo da coordinare la causalità (input/output) dei modelli dei singoli componenti.

Si è poi proceduto allo sviluppo dei modelli dei singoli componenti partendo dall'elemento che mostrava maggiore specificità rispetto all'impianto oggetto di studio, cioè il filtro a candele ceramiche. Si è quindi effettuata una ricerca nella letteratura scientifica con particolare focalizzazione sui meccanismi di filtrazione e sull'accrescimento del deposito di polvere sull'elemento filtrante e sulla conseguente

aumentata perdita di carico nell'attraversamento del filtro. Il modello è stato implementato in ambiente Matlab Simulink e l'attività è stata oggetto di una pubblicazione scientifica al congresso ATI 2018. Si è quindi proceduto analogamente con gli altri elementi dell'impianto: filtro sentinella, scambiatore di calore e condotti. L'approccio utilizzato è stato fisico a parametri concentrati, implementando per i vari elementi le equazioni di bilancio della massa e dell'energia. Particolare riguardo è stato dedicato al calcolo delle proprietà del syngas che in quanto miscela di gas ha richiesto l'implementazione di specifiche relazioni. Anche questa attività è stata oggetto di una pubblicazione scientifica al congresso ATI 2019. Infine, si è provveduto alla calibrazione dei modelli sviluppati. La disponibilità delle misure effettuate sull'impianto di gassificazione e cogenerazione ha permesso di effettuare una procedura di calibrazione basata sulla minimizzazione dello scarto tra la previsione del modello e le rilevazioni sperimentali effettuate. In primo

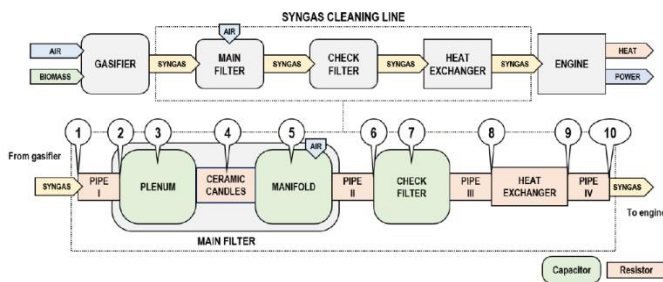


Figura 1: Schema a blocchi dei componenti della linea asservita all'impianto da 125 kWe e dei flussi di massa ed energia

luogo, non essendo stata possibile una misura diretta della portata del syngas, è stata necessaria una sua stima mediante il bilancio termico allo scambiatore di calore aria/syngas a ridosso del gassificatore. Con questo dato, combinandolo con le altre grandezze rilevate a monte e a valle di ogni elemento è stato possibile calibrare singolarmente i modelli dei vari elementi ricavando i parametri (es. coefficienti di scambio termico o di perdita di carico) per i quali non era possibile rilevarne direttamente il valore. Riguardo

all'identificazione dei parametri del modello di gassificazione non è stato possibile procedere con la stessa modalità a causa della limitata disponibilità di misure (una per ogni essenza) che impediva ogni approccio di tipo statistico. Si è quindi proceduto a un *design of experiment* variando le grandezze non note che avevano dimostrato di aver una maggiore influenza sui risultati della simulazione, cioè il rapporto aria-combustibile e la lunghezza della zona di riduzione. I risultati delle simulazioni sono stati poi confrontati con quelli delle sperimentazioni. I risultati sono pienamente congruenti a quanto previsto nel capitolato tecnico e consistono in:

- un modello di simulazione del processo di gassificazione implementato in ambiente di calcolo e dotato di interfaccia amichevole e calibrato sul processo;
- la definizione dello stato dell'arte dei modelli di simulazione del processo di gassificazione;
- un modello di simulazione del sistema di cogenerazione a biomasse che permetta di calcolare le prestazioni globali del sistema e quelle dei suoi componenti, nonché caratterizzare i flussi di massa ed energia all'interno del sistema tra i componenti e verso l'ambiente.

2.3 Modellazione termofluidodinamica e analisi CFD

L'attività intendeva eseguire, a partire dal rilievo delle geometrie reali di alcuni componenti del sistema di gassificazione da 125 kW, simulazioni termofluidodinamiche (CFD) dei componenti stessi. Dopo aver analizzato il sistema, sono state individuate e sottoposti ad analisi tre componenti critici: il gassificatore downdraft, lo scambiatore di calore acqua-syngas per raffreddamento del syngas proveniente dal gassificatore e il condotto del circuito che trasporta il syngas al motore.

Lo scopo dell'analisi è stato

- nel caso del gassificatore, valutare i processi fluidodinamici e di scambio termico interni (dovuti alle reazioni di gassificazione) ed esterni (conseguenti all'accoppiamento con l'ambiente);
- nel caso del condotto, approfondire le possibili problematiche di sporcamento dovute al tar residuo presente nel syngas;
- nel caso dello scambiatore, entrambi gli ambiti visti precedentemente, e cioè gli scambi termici interni ed esterni, e le problematiche di sporcamento dovute al raffreddamento del syngas.

La prima attività ha riguardato il rilievo delle geometrie attraverso disegni, misure dimensionali e osservazioni sul campo. Sono quindi state eseguite delle tavole costruttive e queste sono state tradotte in

un disegno tridimensionale (CAD) dei componenti. Come modellatore solido, è stato scelto il software SolidWorks. Le geometrie costruite sono state opportunamente semplificate per omettere dalla simulazione tutti quei componenti non necessari per la simulazione (bulloni, irrigidimenti, ecc.) oppure ritenuti avere un effetto trascurabile sulla fluidodinamica (come piccole cavità, rilievi di saldatura, ecc.). La successiva fase è poi consistita nel trasferimento della geometria CAD al generatore di griglie di calcolo e alla discretizzazione del dominio, necessaria per la simulazione CFD dei componenti.

L'attività riguardante la modellazione termofluidodinamica del gassificatore è iniziata con un'analisi di letteratura incentrata sullo stato dell'arte della simulazione CFD di gassificatori di tipo downdraft. Eseguito lo studio di letteratura, si è deciso di utilizzare il codice di calcolo Fluent (modulo fluidodinamico del pacchetto ANSYS CFX). Il software è stato utilizzato inizialmente sull'unico test case reperito in letteratura all'interno del quale vi fossero sufficienti informazioni per validare le simulazioni. Successivamente sono state eseguite analisi sul gassificatore reale che hanno permesso di indagare gli effetti di alcune modifiche che sono state individuate come possibili alternative alla geometria originaria e alle condizioni di alimentazione del gassificatore. In particolare sono state analizzate: (i) l'influenza del rapporto aria/combustibile; (ii) influenza della presenza della grata metallica situata sul fondo del gassificatore (vedi Figura); (iii) influenza della coibentazione delle pareti esterne; (iv) influenza del numero di ugelli di iniezione dell'aria comburente. Dalle attività svolte sul test case è scaturito un articolo presentato ad un convegno internazionale. Una ulteriore attività ha riguardato simulazioni fluidodinamiche CFD del condotto di

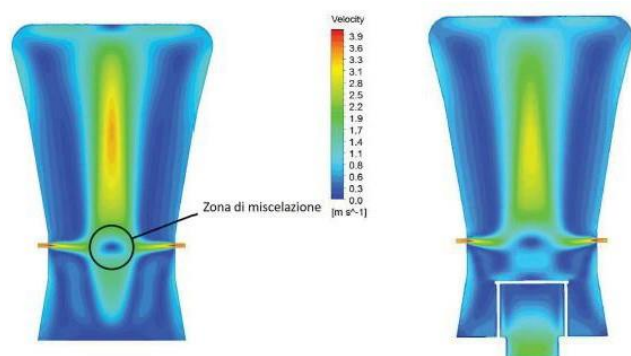


Figura 2: Immagine CFD del campo di velocità all'interno del reattore di gassificazione. A sinistra senza campana grigliata e a destra con campana grigliata

adduzione del syngas al motore cogenerativo e dello scambiatore di calore dove è stata effettuata l'analisi delle problematiche di sporcamento lungo il condotto. Per la simulazione è stato scelto un codice OpenSource (OpenFOAM) appositamente programmato per prevedere le zone di sporcamento dovute alla condensazione del tar. Sono state quindi simulate configurazioni coibentate e non coibentate del condotto che hanno dimostrato l'efficacia della coibentazione nel prevenire la condensa del tar. Attraverso una metodologia semplificata, è stato inoltre possibile ottenere le curve resistenti del condotto in funzione della portata e del tempo di funzionamento dell'impianto, potendo tenere in

conto l'andamento della deposizione e della conseguente ostruzione del condotto con il passare del tempo. Successivamente è stata effettuata la simulazione dello scambiatore di calore acqua/syngas. La simulazione ha riguardato inizialmente lo scambiatore pulito in diverse configurazioni per valutarne le prestazioni termodinamiche. Successivamente, sono state iniettate particelle che hanno svolto il ruolo di sonde numeriche per visualizzare le zone all'interno dello scambiatore dove è più probabile avvenga la condensazione del tar. Infine, sono stati innestati nelle geometrie CAD dei guasti simulati che mimano gli effetti dello sporcamento. Le attività svolte sul condotto del syngas e sullo scambiatore hanno portato alla pubblicazione di due articoli su rivista internazionale.

Si è poi proceduto allo sviluppo concettuale di una metodologia di simulazione integrata 0D-3D. In questa metodologia, il modello 0D termodinamico dell'impianto utilizza i risultati delle simulazioni 3D termofluidodinamiche per la caratterizzazione e l'identificazione delle prestazioni di componenti.

I risultati di queste attività sono stati:

- metodologie numeriche per la simulazione di gassificatori downdraft attraverso codici commerciali;
- una metodologia numerica implementata in un codice OpenSource per la determinazione della modifica del dominio computazionale a seguito di deposizione di tar sulle pareti del condotto di adduzione del syngas al motore cogenerativo;
- sviluppo di un modello numerico dello scambiatore acqua/syngas per la determinazione delle sue prestazioni termodinamiche e di un modello numerico modificato attraverso l'implementazione di guasti simulati che mimano gli effetti sulla geometria dello sporcamento dovuto al tar;

- sviluppo concettuale di una metodologia OD-3D per la simulazione integrata di impianti di gassificazione.

2.4 Ulteriori risultati

Al fine di condurre gli impianti nella maniera ottimale, sono state analizzate varie criticità che hanno fornito lo spunto per introdurre soluzioni migliorative. Partendo dalle soluzioni più banali per la conduzione degli impianti, ossia la tipologia di operazioni da effettuare, la loro frequenza, le strumentazioni da utilizzare, si è giunti ad elaborare alcuni interventi sostanziali che hanno modificato il layout impiantistico iniziale. A seguito di questi accorgimenti, successivi ad un primo periodo in cui l'impianto è stato esercito senza alcun accorgimento migliorativo così come fornito dalla casa costruttrice, si è potuto constatare l'effettivo effetto migliorativo che tali accortezze hanno avuto sulla funzionalità generale degli impianti. È stato dunque redatto un manuale di utilizzo per l'impianto da 125 kWe dove sono state riassunte le modalità e le procedure di gestione, conduzione e manutenzione dell'impianto. In tale manuale sono state riassunte le procedure di sicurezza da adottare per operare sugli impianti, le modalità di esercizio, le specifiche di manutenzione e le possibili soluzioni da introdurre per far fronte ad alcune tipologie di guasto, in una apposita sezione *troubleshooting*. È stato redatto un breve manuale di uso e manutenzione anche per il gassificatore pilota da circa 25 kWe, sul quale non sono stati però effettuati interventi migliorativi poiché lo scopo dello stesso è unicamente stato quello di analizzare varie essenze di biomassa per ottenerne una caratterizzazione, unitamente al syngas da esse generato. I risultati principali sono stati:

- Redazione di linee guida per la conduzione e manutenzione degli impianti
- Studio e implementazione di soluzioni per il miglioramento tecnologico degli impianti



Figura 3: Impianto di gassificazione sperimentale da 25 kWe (in basso a sinistra) e linea produttiva impianto da 125 kWe

È stato anche creato un sito web (www.synbiose.it) in italiano e inglese relativo al progetto dove in tempo reale è rimasto attivo un contatore di energia e potenza termiche ed elettriche dell'impianto da 125 kWe, di modo da poter permettere a qualsiasi utente di conoscere istantaneamente la situazione produttiva dell'impianto. Sul sito è stato caricato materiale liberamente consultabile dagli utenti, riguardo la gassificazione in generale e il layout impiantistico degli impianti in questione, approfondendo gli aspetti generali del progetto e le attività in corso. In una apposita sezione sono state regolarmente aggiornate le principali notizie relative al progetto, dallo stato di avanzamento dei lavori, fino alle comunicazioni relative agli eventi organizzati nel tempo e agli articoli pubblicati su riviste scientifiche e non. Nella sezione "download" sono liberamente consultabili e scaricabili le presentazioni utilizzate durante gli eventi divulgativi, alcune relazioni tecnico-scientifiche ed è possibile visionare contenuti multimediali relativi al progetto, comprese le registrazioni dei webinar. Sono stati affissi dei pannelli informativi sia all'interno che all'esterno della centrale, per spiegare in sintesi scopo e finalità del progetto, al fine di rendere la centrale un laboratorio visitabile dal pubblico.

3. IMPATTO SUL SISTEMA ELETTRICO E BENEFICI ATTESI

La tecnologia della gassificazione, pur evidenziando potenzialità, sconta una mancanza di fiducia. La piattaforma dimostrativa realizzata nel progetto, che rappresenta un *field testing* di lunga durata finalizzato alla validazione dell'affidabilità del sistema, permette una maggiore diffusione della tecnologia a gassificazione e quindi una progressione sulla curva di esperienza con la riduzione dei costi di produzione, esercizio e manutenzione che ne consegue. Inoltre, il progetto ha promosso la penetrazione di una tecnologia a fonte rinnovabile, efficiente in quanto cogenerativa, in una porzione di mercato (il settore terziario) attualmente a quasi esclusivo appannaggio della tecnologia fotovoltaica. L'utilizzo di questa tecnologia permette lo sfruttamento delle biomasse in cogenerazione (dato l'impiego nel settore terziario caratterizzato dalla contestuale domanda di energia elettrica e termica) con un incremento nel coefficiente di utilizzo dell'energia primaria. Un altro impatto sul sistema elettrico nazionale è rappresentato dalle riduzioni delle emissioni sia climalteranti (riduzione delle emissioni di anidride carbonica poiché tecnologia a fonte rinnovabile e cogenerativa) sia inquinanti (utilizzando combustibili ricavati da biomasse in motori a combustione interna vi è una riduzione delle emissioni inquinanti rispetto alla combustione diretta delle biomasse). Il programma di ricerca, sperimentando la potenziale estensione dell'utilizzo della tecnologia a blend di biomasse vergini e residuali, ha consentito l'allargamento della tecnologia all'utilizzo di biomasse residuali con la conseguente maggiore sostenibilità della filiera coerentemente con quanto previsto dalla normativa attuale. Infine, va sottolineato che la diffusione di una tecnologia quale quella oggetto di sperimentazione consente un incremento della quota di produzione elettrica da fonti rinnovabili senza creare criticità alla stabilità della rete elettrica in quanto la tecnologia è caratterizzata da programmabilità. Tali benefici per la rete sono amplificati dal fatto che si tratta di una tecnologia di produzione distribuita con contestuale autoconsumo e quindi mancato vettoriamiento della potenza e conseguente decongestionamento delle reti.

In primo luogo, i risultati del programma di ricerca determinano una riduzione dei costi di esercizio e manutenzione del sistema di gassificazione in oggetto attraverso un incremento di efficienza mediante la scelta ottimale della biomassa e una programmazione intelligente degli interventi di ripristino della linea di pulizia del gas di sintesi. Questi benefici non possono essere percepiti direttamente dall'utente elettrico generico in termini di risparmio, in quanto questa tipologia di impianti accede agli incentivi tramite tariffa omnicomprensiva come dal DM 6 luglio 2012. Comunque, nel caso in cui il sistema fosse esercito all'interno di un servizio di gestione energia (come è nel caso oggetto del presente progetto) i risultati conseguiti alla conclusione del progetto consentono di ridurre i costi di tale servizio. In secondo luogo, promuovendo l'utilizzo di sistemi cogenerativi alimentati a biomasse questo progetto consente la penetrazione nel sistema terziario di un sistema di generazione efficiente e a fonte rinnovabile che, a differenza della tecnologia fotovoltaica (attualmente quella prevalentemente impiegata), può garantire anche la soddisfazione dei fabbisogni termici oltre ad una produzione dell'energia elettrica caratterizzata da programmabilità.

Sul medio termine il progetto può rendere possibile l'utilizzo di biomasse residuali all'interno di sistemi energetici di piccola taglia in blend con biomasse vergini. Ciò consentirà a utenti di servizi di gestione dell'energia di poter valorizzare le proprie biomasse residuali e scontare il costo del combustibile equivalente. Permettendo una maturazione della tecnologia di gassificazione i risultati del progetto permettono sul lungo termine una rideterminazione degli incentivi per la generazione di piccola taglia da biomasse e quindi una riduzione del costo dell'energia elettrica.

Questo beneficio è stato ulteriormente rinsaldato dalla progressione nella curva di esperienza dovuta alla maggiore diffusione determinata dalla potenziale riconosciuta affidabilità conseguente ai risultati del progetto.

Le principali ricadute applicative del progetto di ricerca sono riassumibili nei seguenti punti:

- ottimizzazione ed industrializzazione dei processi di produzione dei blend di combustibile;
- implementazione delle migliorie costruttive ed impiantistiche, individuate dalle linee guida di ottimizzazione, all'interno dei processi di costruzione dei sistemi di gassificazione;
- risparmi economici correlati miglioramento dei processi di trasformazione dell'energia;
- risparmi ottenibili a seguito dell'ottimizzazione delle attività di gestione e manutenzione.