

Ricerca di Sistema elettrico



Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluidico bollente (LA 1.11)

G. Calì, A. Chirigu, D. Marotto, S. Meloni, A. Orsini



SPERIMENTAZIONE A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DELLE MODIFICHE IMPIANTISTICHE DEL
GASSIFICATORE A LETTO FLUIDO BOLLENTE (LA 1.11)

G. Calì, A. Chirigu, D. Marotto, S. Meloni, A. Orsini – Sotacarbo SPA

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno*

Linea di attività: 1.11 Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del
gassificatore a letto fluido bollente

Responsabile del Progetto: Luca Turchetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Gabriele Calì, SOTACARBO

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 1

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione
"Sviluppo e ottimizzazione di un processo per la gassificazione in letto bollente di rifiuti plastici non
riciclabili e di biomasse"

Responsabile scientifico ENEA: Luca Turchetti

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Alessandro Orsini

Si ringraziano per la collaborazione alle attività svolte (ricercatori, tecnici di laboratorio e tecnici di impianto): ing. M. Fadda, ing. E. Maggio, ing. A. Pettinau, ing. E. Loria, ing. A. Madeddu, ing. D. Multineddu, ing. P. Miraglia, ing. F. Tedde, dott. A. Plaisant, dott. R. Cara, dott.ssa A. Masili, sig. D. Porcedda, sig. A. Argiolas, sig. C. Manca, sig. S. Muntoni, sig. I. Puddu, sig. A. Vacca.

Indice

1	RISULTATI ATTESI	4
2	RISULTATI OTTENUTI.....	5
3	PRODOTTI ATTESI.....	7
4	PRODOTTI SVILUPPATI	8
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	9
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	11
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	12
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	18
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	19
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	20

1 Risultati attesi

Le attività svolte nell'ambito della linea LA 1.11 - Produzione di idrogeno: "Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente" sono relative ai primi 18 mesi del piano triennale 2022-2024 (gennaio 2022-giugno 2023). L'attività di ricerca è inserita nel più ampio contesto della decarbonizzazione del sistema elettrico tramite lo sviluppo innovativo del processo termochimico di gassificazione a letto fluido bollente per la produzione di idrogeno a partire da materiali di scarto quali rifiuti plastici e biomasse. La sperimentazione è stata eseguita sull'impianto di gassificazione a letto fluido bollente FABER (Fluidized Air-Blown Experimental gasification Reactor) presente nella piattaforma pilota Sotacarbo.

L'obiettivo della LA 1.11 è costituito da un'attività sperimentale sull'impianto FABER per supportare la progettazione e la realizzazione delle modifiche all'impianto stesso così da renderlo utilizzabile con soli ossigeno e vapore come agenti gassificanti in sostituzione all'aria. Tali modifiche, oggetto della LA 1.12 ("Progettazione esecutiva, realizzazione e test delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente") determineranno la riduzione della concentrazione di azoto e conseguentemente l'aumento della concentrazione di idrogeno e del potere calorifico nel syngas.

Nello specifico i risultati attesi dalla presente linea di attività, come da capitolato tecnico, sono:

1. sperimentazione sulla gassificazione a letto fluido con vapore e aria arricchita (almeno 16 test);
2. individuazione dei principali parametri di processo da utilizzare per la progettazione della nuova configurazione impiantistica per la sperimentazione da effettuarsi nella LA 1.12;
3. ottimizzazione e modifica della linea di adduzione del vapore al gassificatore per l'esercizio dell'impianto di gassificazione nelle nuove condizioni operative;
4. ottimizzazione e modifica del sistema di regolazione e controllo per l'esercizio dell'impianto di gassificazione nelle nuove condizioni operative.

Il deliverable relativo alla presente attività è costituito, oltre che dal presente documento di sintesi, dal rapporto tecnico R1.11-1 "Sperimentazione a supporto della progettazione di una nuova configurazione di impianto per la produzione di idrogeno dalla gassificazione di materiali di scarto, quali plastiche e biomasse".

2 Risultati ottenuti

L'attività svolta nell'ambito della LA 1.11 ha permesso il raggiungimento dei risultati programmati a inizio progetto.

Di seguito sono riportati i principali risultati ottenuti, secondo lo schema riportato nel paragrafo precedente.

Sperimentazione sulla gassificazione a letto fluido con vapore e aria arricchita (almeno 16 test)

Durante i 18 mesi (gennaio 2022-giugno 2023) di durata delle attività della linea LA 1.11 è stata svolta un'attività sperimentale suddivisa in due fasi. La prima, preliminare, nella quale l'impianto è stato esercito con sola aria come agente gassificante per valutare la risposta e il comportamento di tutte le apparecchiature utilizzando come combustibile uno scarto plastico non riciclabile. Nella seconda fase sono stati svolti 16 test sperimentali (12 con plastiche, Blupolymer L e 4 di co-gassificazione plastiche-biomasse) nei quali è stato gradualmente incrementato il tenore di ossigeno nell'aria (fino a una percentuale di ossigeno pari al 39%), al variare del rapporto di equivalenza e della portata di vapore (poi attestata a 35 kg/h). Questa attività è stata realizzata a seguito della programmazione della campagna sperimentale da parte di UVAN (Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli") nell'ambito della LA 1.14 e condivisa da Sotacarbo. I test eseguiti hanno permesso di ricavare informazioni sul comportamento del reattore e sulle prestazioni del processo di gassificazione al fine di individuare le modifiche impiantistiche necessarie in vista dell'impiego dell'impianto FABER con ossigeno e vapore come soli agenti gassificanti (attività prevista nella successiva LA 1.12).

Individuazione dei principali parametri di processo da utilizzare per la progettazione della nuova configurazione impiantistica per la sperimentazione da effettuarsi nella LA 1.12

Durante l'attività sperimentale condotta sono stati considerati alcuni parametri operativi ritenuti fondamentali per la gestione del processo. Il controllo e il monitoraggio di questi parametri sono necessari anche per l'attività sperimentale prevista nella LA 1.12. Nello specifico sono stati presi in considerazione i seguenti:

- rapporto di equivalenza ER: nei test sperimentali è stato fissato a 0,22 ma nelle ultime prove sperimentali è stato portato anche a valori superiori: il suo incremento determina l'aumento della temperatura del letto e quindi una maggiore difficoltà nel controllare il processo dal punto di vista termico;
- tenore di O₂ (arricchimento dell'aria in ossigeno): favorisce l'incremento del potere calorifico inferiore del syngas per il ridotto contenuto di azoto ma comporta l'innalzarsi delle temperature nel letto del reattore a valori vicini al limite massimo consentito circa 900 °C. Per tale motivazione è stato necessario fermarsi ad una concentrazione di ossigeno nell'aria pari al 39%;
- portata di vapore: favorisce la moderazione della temperatura del letto e l'incremento della concentrazione di H₂; nelle condizioni di esercizio della LA 1.11 è stato possibile utilizzare nell'impianto una concentrazione massima di ossigeno nell'aria pari al 39% grazie ad una la portata massima di vapore di 35 kg/h che ha consentito di non superare i valori limite di temperatura previsti.

È stata inoltre monitorata costantemente la temperatura del letto del gassificatore: il suo incremento limita l'operatività del processo a causa del limite massimo di esercizio. Questo è dovuto anche all'elevato potere calorifico inferiore dello scarto plastico utilizzato (Blupolymer L) e al limite attuale della portata di vapore utilizzabile.

Ottimizzazione e modifica della linea di adduzione del vapore al gassificatore per l'esercizio dell'impianto di gassificazione nelle nuove condizioni operative

L'attività sperimentale condotta ha suggerito, sulla base delle indicazioni proposte da UVAN, l'esigenza di acquisire una nuova caldaia (in aggiunta a quella esistente) che possa permettere di accrescere l'alimentazione del vapore dagli attuali 35 kg/h ad un valore di circa 100 kg/h. L'ordine per la nuova caldaia

è stato emesso nel mese di giugno 2023: installazione e collaudo avverranno nell'ambito delle attività previste per la linea LA 1.12. Contestualmente, anche in previsione dell'installazione suddetta, nell'ambito della attività LA 1.11 sono state eseguite sulla linea di adduzione del vapore due modifiche impiantistiche: (i) implementazione di una prima linea a bassa temperatura (già esistente) in cui il vapore prodotto dalla caldaia attraversa un rotametro per la misurazione della portata, regolata attraverso la valvola regolatrice FCV-100 e alimentata al gassificatore, necessaria per quei test che non hanno necessità di elevate quantità di vapore; (ii) realizzazione di una seconda linea ad alta temperatura in cui il vapore prodotto in caldaia viene inviato ad un riscaldatore di tipo elettrico al fine di produrre vapore surriscaldato che eviti la formazione di condensa lungo la linea di adduzione. Questi interventi hanno richiesto l'installazione di alcuni nuovi componenti quali *meter run*, termocoppia, misuratore di pressione e misuratore differenziale di pressione. Inoltre, è stata integrata, al reattore di gassificazione, una nuova linea di adduzione CO₂ al fine di utilizzare l'anidride carbonica nei processi di inertizzazione di alcune parti dell'impianto (ad esempio linea di caricamento combustibile) con il conseguente vantaggio di ridurre ulteriormente la quantità di azoto inviato nel gassificatore.

Ottimizzazione e modifica del sistema di regolazione e controllo per l'esercizio dell'impianto di gassificazione nelle nuove condizioni operative

L'inserimento di nuova strumentazione (di cui al paragrafo precedente) ha motivato l'intervento di ottimizzazione e modifica del sistema di regolazione e controllo consistente in un nuovo nodo di acquisizione segnali e il conseguente potenziamento del sistema operativo al fine di consentire la registrazione delle misure delle nuove strumentazioni. Sono state inoltre realizzate le nuove pagine grafiche di acquisizione. Un maggiore dettaglio degli interventi eseguiti è riportato nel report esteso "Sperimentazione a supporto della progettazione di una nuova configurazione di impianto per la produzione di idrogeno dalla gassificazione di materiali di scarto, quali plastiche e biomasse" (Allegato 1).

Benefici per il sistema elettrico e per i suoi utenti

L'attività sperimentale condotta nell'ambito della LA 1.11 è orientata a suggerire le modifiche impiantistiche per l'esercizio dell'impianto con ossigeno e vapore e senza l'utilizzo di aria, orientato alla gassificazione di plastiche miste non riciclabili, con l'obiettivo di produrre idrogeno. Da un punto di vista tecnico, tale soluzione risulta essere particolarmente innovativa e consentirà di offrire alla comunità scientifica e più in generale alla collettività, un contributo tecnologicamente avanzato per la produzione di idrogeno da rifiuti plastici con alto valore aggiunto sia dal punto di vista economico che da quello della sostenibilità. Questo avviene andando a valorizzare da un punto di vista energetico un materiale altrimenti destinato alla discarica o allo smaltimento, andando a ridurre le emissioni globali dei sistemi energetici nella loro totalità, nell'ottica di un'economia circolare. Infine, la tecnologia oggetto dello studio promette di avere sviluppo su scala industriale.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi sono costituiti dal presente documento di sintesi e dal rapporto tecnico allegato “R1.11-1: Sperimentazione a supporto della progettazione di una nuova configurazione di impianto per la produzione di idrogeno dalla gassificazione di materiali di scarto, quali plastiche e biomasse”, nel quale sono riportate nel dettaglio le attività svolte nell’ambito della linea LA 1.11.

Non ci sono prodotti hardware/software attesi per la LA 1.11.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati sono costituiti dal presente documento di sintesi e dal rapporto tecnico allegato “R1.11-1: Sperimentazione a supporto della progettazione di una nuova configurazione di impianto per la produzione di idrogeno dalla gassificazione di materiali di scarto, quali plastiche e biomasse” nel quale sono riportate nel dettaglio le attività svolte nell’ambito della linea LA 1.11.

Non ci sono prodotti hardware/software sviluppati per la LA 1.11.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

5.1 Parte tecnica

Le attività realizzate nella LA 1.11 hanno rispettato la programmazione effettuata e riportata nel dettaglio nella sezione sui risultati attesi. L'attività sperimentale realizzata ha permesso di individuare e apportare le modifiche impiantistiche necessarie in vista dei test previsti nella LA 1.12 con ossigeno e vapore come agenti gassificanti.

5.2 Parte economica

Per quanto concerne i costi del I SAL del progetto, relativo alla linea LA 1.11, le spese registrate a consuntivo sono riepilogate nella tab. 5.1 dove, tra parentesi, si confrontano i valori di preventivo.

Tabella 5.1 – Riepilogo costi relativi alla linea LA 1.11.

Sigla	Denominazione Linee attività	Periodo Riferimento	Ore di personale SOTACARBO	Personale (A) (k€)	Strumenti e attrezzature (B) (k€)	Costi di esercizio (C) (k€)	Acquisizione di competenze (D)	Collaborazioni di cobeneficiari (U)	TOTALE (k€)
LA 1.11	<i>Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente</i>	(18 mesi)	14500 (14500)	477,760 (500,00)	7,200 (7,200)	191,71 (220,30)	0 (0)	0 (0)	676,667 (727,500)

in base al documento "Criteri di valutazione dei Piani triennali di realizzazione"

(A) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente

(B) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili, ad esclusivo uso del progetto e/o in quota di ammortamento

(C) include materiali e forniture, spese per informazione, pubblicità e diffusione

(D) include le attività con contenuto di ricerca commissionate a terzi, i.e. consulenze, acquisizioni di competenze tecniche, brevetti

(E) include le spese di trasporto, vitto e alloggio del personale in missione

(U) include le collaborazioni con istituzioni universitarie

Si riporta di seguito un dettaglio degli scostamenti rilevati, rispetto al progetto approvato.

- **Ore di Personale:**

Nessuna variazione.

- **Costi Personale (A):**

Nella tab. 5.2 si riportano gli scostamenti dei costi del personale impegnato nel progetto.

Tabella 5.2 – Scostamento dei costi del personale impegnato nel progetto.

Sigla	DENOMINAZIONE OGGETTIVI	Personale (A) PREVENTIVO (k€)	Personale (A) CONSUNTIVO (k€)	Variazione (k€)	GIUSTIFICAZIONI
LA 1.11	Sperimentazione a supporto della progettazione delle modifiche impiantistiche del gassificatore a letto fluido bollente	500,000	477,760	-22,240	Lo scostamento è dovuto ad una differenza tra il calcolo del costo orario eseguito a preventivo e quello a consuntivo.

- **Strumenti e attrezzature (B):**

Nessuno scostamento

Tabella 5.3 – Scostamenti registrati alla voce strumenti e attrezzature (B)

Sigla	DESCRIZIONE COSTI STRUMENTAZIONI E ATTREZZATURE	Costo PREVENTIVO (€)	Costo CONSUNTIVO (€)	Variazione di costo	GIUSTIFICAZIONI
LA 1.11	Nolo serbatoio azoto 2022	5.400,00	5.400,00	0	Nessuno scostamento
LA 1.11	Nolo serbatoio azoto 2023	1.800,00	1.800,00	0	Nessuno scostamento
TOTALE LA 1.11		7.200,00	7.200,00	0	Nessuno scostamento

- **Costi di esercizio (C):**

Nella tab. 5.4 si riportano gli scostamenti registrati alla voce costi di esercizio (C).

Tabella 5.4 – Scostamenti registrati alla voce costi di esercizio (C)

Sigla	DESCRIZIONE COSTI ESERCIZIO	Costo PREVENTIVO (€)	Costo CONSUNTIVO (€)	Variazione di costo	GIUSTIFICAZIONI
LA 1.11	Totale LA 1.11	220.300,00	191.707,45	- 28.592,55	Lo scostamento è da imputare alle seguenti voci: - acquisti di consumabili (gas, azoto liquido, ecc.) e di componentistica da impianto (strumentazione linea CO₂) inferiori rispetto all'importo dei singoli ordini (ca. 10.000€); - saldo acquisto caldaia con installazione prevista nella LA 1.12 (ca. 8.000 €); - importi ordini inferiori rispetto al budget preventivato o a ribassi durante le fasi di affidamento gare (ca. 10.000 €).

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte nell'ambito della LA 1.11 hanno riguardato l'esecuzione di una campagna sperimentale sull'impianto di gassificazione Faber a partire da rifiuti quali plastiche non riciclabili e biomasse. Con l'obiettivo di accrescere la concentrazione di H_2 nel syngas, il processo è stato condotto utilizzando come agenti gassificanti aria arricchita in O_2 e vapore. La sperimentazione condotta (16 prove) è stata preceduta dalla verifica funzionale dell'impianto, da test preliminari, da alcune prime modifiche impiantistiche e dall'individuazione dei principali parametri di processo.

La sperimentazione condotta ha dato importanti indicazioni in vista dell'attività prevista nella LA 1.12 per la quale si prevede di arrivare all'utilizzo di solo vapore e O_2 come agenti gassificanti e ha suggerito le seguenti modifiche:

- linea adduzione vapore e nuova caldaia;
- nuova linea adduzione CO_2 ;
- sistema analisi syngas;
- modifiche elettriche e adeguamento sistema di regolazione e controllo.

7 Dettaglio delle attività svolte

Le attività sperimentali relative alla linea LA 1.11, sono state svolte in condizioni autotermiche (senza fornire energia al gassificatore dall'esterno) e impiegando vapore ed aria arricchita in ossigeno, con valori crescenti dello stesso nella corrente d'aria. Rispetto ai test condotti con sola aria, è stato possibile esaminare la risposta del processo al ridursi progressivo del tenore di azoto nel gas fluidizzante. Questo aspetto facilita le fasi di pulizia e condizionamento, necessarie e preliminari ad un eventuale produzione di idrogeno e dei suoi derivati. Le attività sperimentali hanno richiesto alcune prime modifiche impiantistiche sul gassificatore FABER (Fluidized Air-Blown Experimental gasification Reactor), necessarie all'esercizio dell'impianto stesso.

La sperimentazione è stata suddivisa in due fasi, una fase preliminare di pre-test e una fase di test effettiva (16 prove) da cui sono stati ottenuti una serie di dati necessari per l'ottimizzazione e la nuova definizione dell'impianto. Questa seconda attività sperimentale (terzo semestre della LA 1.11) è stata realizzata sulla base della programmazione proposta da UVAN e condivisa da Sotacarbo. Dei 16 test eseguiti, 12 sono stati condotti utilizzando come combustibile esclusivamente rifiuti plastici (Blupolymer L), mentre 4 sono stati svolti in co-gassificazione utilizzando rifiuti plastici e biomasse (cippato di eucaliptus). Nel caso delle prove di co-gassificazione è stato considerato un ulteriore parametro rappresentato dal rapporto *blending ratio*, consistente nel rapporto tra la portata di un combustibile e la portata totale dei combustibili presenti.

Per ogni test sperimentale effettuato sono presenti tre fasi principali che racchiudono le diverse attività strettamente collegate al suo svolgimento: una fase preliminare di preparazione, la fase di esecuzione del test vera e propria e la fase post-test.

La fase preliminare comprende le attività di preparazione e di verifica funzionale dell'impianto e delle apparecchiature ausiliarie di analisi, l'analisi di caratterizzazione dei combustibili e la preparazione delle cariche (plastiche e/o biomasse).

La fase di test comprende le attività di riscaldamento e raggiungimento della temperatura di esercizio (circa 800 °C) seguita dall'invio del combustibile. Al raggiungimento dello stazionario (sulla base dei dati della temperatura del letto di gassificazione e composizione del syngas), vengono effettuati i campionamenti (syngas tramite buste tedlar, ceneri e tar). Il test si considera concluso in corrispondenza dei dati che indicano il consumo completo del combustibile. Segue la fase di raffreddamento e di spegnimento dell'impianto.

La fase post-test è costituita essenzialmente dalle analisi sui campioni raccolti (condotte presso i laboratori Sotacarbo) di tar, ceneri e syngas e dalla fase di estrapolazione e elaborazione dei dati sperimentali. A impianto freddo vengono effettuate tutte le manutenzioni e le attività di pulizia dell'impianto affinché venga predisposto per il nuovo test sperimentale.

Le attività sperimentali sono state supportate dalle analisi effettuate in impianto (on-line) e nei laboratori Sotacarbo (off-line) quali:

- analisi elementare e immediata sul combustibile alimentato;
- analisi on-line del syngas con micro-gascromatografo e sistema real-time Siemens;
- analisi sul syngas con gas cromatografo off-line (campionamento con tedlar bag);
- analisi elementare ed immediata sulle polveri campionate in uscita dal ciclone;
- analisi quantitativa e qualitativa del tar nel syngas.

7.1 Programmazione ed esecuzione dei test sperimentali

Sulla base della programmazione proposta da UVAN, sono stati svolti un totale di 16 test, 12 dei quali utilizzando come combustibile esclusivamente rifiuti plastici (Blupolymer L) mentre altri quattro test (9, 10,

12 e 13) sono stati condotti in co-gassificazione utilizzando sempre Blupolymer L con biomassa legnosa (cippato di eucaliptus). Nei primi nove test, al fine di poter verificare gli effetti della portata del vapore e della percentuale di O₂ negli agenti gassificanti sul processo sulla gassificazione, è stato programmato di mantenere costante il rapporto di equivalenza (ER = 0,22), diminuendo gradualmente la portata d'aria e incrementando quella di ossigeno. La portata di vapore è stata fissata e successivamente mantenuta costante, al valore di 35 kg/h a partire dal test 6.

Successivamente, sono stati condotti quattro test di co-gassificazione al fine di verificare l'effetto dell'introduzione nel processo di un combustibile con potere calorifico minore (biomassa) rispetto alla plastica. Nel primo di questi test è stata utilizzata esclusivamente aria come agente gassificante al fine di acquisire i parametri di gassificazione necessari da utilizzare come riferimento per i test successivi (10, 12 e 13) per i quali, invece, è stata incrementata gradualmente la portata di ossigeno (da 5 fino a 6,6 kg/h).

Negli ultimi test condotti con solo Blupolymer L, (14, 15 e 16), è stato variato il rapporto di equivalenza tenendo costanti gli altri parametri al fine di valutare gli effetti di questo fattore sul processo di gassificazione.

Nella tabella 7.1 vengono esposti i parametri di processo preventivati per lo svolgimento delle prove.

Tabella 7.1. Parametri di processo impostati per i test sperimentali
(*valore di ER per il test 13 pari a 0,25)

Combustibile utilizzato, ER	Nr. Test	Q _{AIR} [Nm ³ /h]	Q _{VAP} [kg/h]	Q _{O2} [Nm ³ /h]	Q _{COMB} [kg/h]	% O ₂ in aria	Blending ratio PL
Plastica (Blupolymer L) ER=0,22	1	67	0	0	29	21	1
	2	67	28	0	29	21	1
	3	44,3	28	5	29	29	1
	4	34	28	7	29	34	1
	5	30	30	9	32	39	1
	6	38	35	7	31	33	1
	7	38	35	7	31	34	1
	8	34	35	8	31	36	1
	11	37	35	7	31	34	1
Plastica + Cippato Eucaliptus ER=0,22	9	50	35	0	35	21	0,4
	10	25	35	5	35	34	0,45
	12	30	35	6	41	34	0,46
	13*	36	35	6,6	41	33	0,44
Plastica (Blupolymer L) ER=0,25	14	42	35	5	25	29	1
	15	33,5	35	7	25	35	1
	16	33,5	35	7	25	35	1

7.2 Risultati ottenuti

Si riportano di seguito (tab. 7.2) i principali parametri riferiti alle performance di processo ottenute durante le 16 prove sperimentali.

Tabella 7.2. Parametri di processo registrati nei test sperimentali.

Combustibile Utilizzato	Test	ER reale	CCE	CGE	E _{SPEC} [kWh/kg _{comb}]	T _{letto} [°C]	T _{syngas} [°C]	PCI [kJ/Nm ³]
Plastica (Blupolymer L)	1	0,22	0,78	0,72	7,75	861	677	9.221
	2	0,22	0,74	0,66	7,1	762	667	8.482
	3	0,21	0,69	0,63	6,4	843	685	9.882
	4	0,20	0,63	0,55	5,92	869	702	11.112
	5	0,22	0,61	0,50	5,36	883	681	10.405
	6	0,23	0,63	0,50	5,40	860	709	9.041
	7	0,24	0,79	0,67	7,22	883	697	10.348
	8	0,23	0,73	0,63	6,83	867	702	11.436
	11	0,22	0,72	0,62	6,65	839	696	11.362
Plastica + Cippato Eucaliptus	9	0,20	0,80	0,73	4,82	765	706	8.502
	10	0,18	0,70	0,58	4,01	798	639	10.129
	12	0,23	0,88	0,78	5,44	826	567	11.175
	13	0,26	0,80	0,59	4,03	871	635	7.950
Plastica (Blupolymer L)	14	0,24	0,68	0,55	5,91	822	683	8.799
	15	0,28	0,69	0,49	5,26	884	630	7.785
	16	0,25	0,71	0,56	6,06	870	624	9.566

Composizione del syngas

Di seguito vengono presentati i dati ottenuti dell'analizzatore on-line Siemens e dal micro-GC per le composizioni del syngas. In tab. 7.3 sono riportate le composizioni medie misurate durante lo stazionario termo-chimico delle prove per le specie CH₄, CO, CO₂, H₂, N₂ ed etano.

Tabella 7.3. Concentrazioni di CH₄, CO, CO₂, H₂, N₂ e C₂H₆ in uscita dal gassificatore (P: plastica, B: biomassa).

Test	Combustibile	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	C ₂ H ₆
1	P	3,618	1,681	12,012	2,959	68,500	5,950
2	P	2,641	3,483	8,593	2,622	68,540	4,550
3	P	3,741	2,247	13,020	4,159	60,240	6,940
4	P	4,255	2,118	16,052	6,633	55,310	7,370

5	P	4,441	2,155	17,914	6,919	51,480	4,990
6	P	5,000	3,677	16,344	5,029	57,390	4,450
7	P	4,993	3,295	17,137	5,114	49,930	7,200
8	P	4,968	3,588	17,570	5,443	52,570	7,780
9	P+B	5,755	4,130	16,902	6,084	60,730	4,710
10	P+B	6,861	4,588	22,361	5,549	48,890	6,080
11	P	7,679	3,919	15,052	3,901	55,760	7,890
12	P+B	7,124	6,137	21,397	7,392	44,470	7,430
13	P+B	5,821	5,788	21,833	6,371	51,460	3,980
14	P	6,640	3,676	14,067	2,957	63,830	5,750
15	P	6,770	3,182	17,361	3,921	60,280	4,960
16	P	7,060	3,366	17,633	3,850	58,110	6,140

Per le prove con solo plastiche, i risultati più significativi si sono avuti nei test 5, 7 e 8, con una percentuale di idrogeno tra 5 e 7% e buoni valori anche di metano ed etano. Nel test 11, ripetizione del test 7, è stato raggiunto un elevato potere calorifico, ma dovuto maggiormente alla concentrazione di etano e metano piuttosto che di idrogeno. Rispetto a quanto preventivato in sede di programmazione delle attività sperimentali, si evidenzia come si sia ottenuta una concentrazione massima di idrogeno nel syngas tra il 6 e il 7,5%, inferiore al range ipotizzato (12-20%). Questa differenza potrebbe essere spiegata con la presenza di additivi addensanti nel materiale plastico Blupolymer L che aumentano le difficoltà della separazione dell'idrogeno dal combustibile di partenza. Per ciò che riguarda l'azoto, l'arricchimento in ossigeno ha portato a percentuali di azoto nel syngas tra il 48-50%. Questo valore potrà diminuire solo se contestualmente si potrà aumentare la percentuale di ossigeno nell'aria (oltre il 40%).

I campionamenti del TAR (miscela complessa di idrocarburi condensabili che include composti aromatici con anello singolo o multiplo assieme ad altri idrocarburi contenenti ossigeno e idrocarburi policiclici aromatici) sono stati svolti, analogamente a quelli dei fini, nel periodo di stazionario-termochimico di ciascuna prova, seguendo la metodologia specifica e standardizzata (CEN/TS 15439:2006) della durata di 20 minuti. Dalla tab. 4.8 si può notare come la concentrazione del tar ricavata è piuttosto variabile (valore massimo oltre gli 11 g/Nm³), ma che questi valori di concentrazione sono incompatibili con i processi a valle del reattore di gassificazione per la produzione di idrogeno. Dunque, si evidenzia la necessità di un sistema di pulizia a caldo Hot-gas Cleaning (scopo della LA 1.13) che possa far diminuire la concentrazione del tar nel syngas a valori compatibili con la produzione di idrogeno.

I test sperimentali condotti nell'ambito della presente LA 1.11 sono serviti per testare l'impianto con aria arricchita in ossigeno e vapore come agenti gassificanti e individuare le modifiche impiantistiche da effettuarsi per l'esercizio della gassificazione con soli vapore e ossigeno, oggetto della LA 1.12 e in parte descritte nel successivo paragrafo 7.4.

Dal set di prove effettuate, si può desumere che le condizioni operative ottimali, con la attuale configurazione impiantistica, si sono avute con una portata di vapore pari a 35 kg/h (valore massimo con la caldaia a disposizione), un arricchimento di ossigeno nell'aria tra il 32-33% e un valore di ER di 0,22. I test di co-gassificazione eseguiti, con un potere calorifico del combustibile (plastica più cippato) inferiore, hanno permesso di ottenere dei buoni risultati con temperature del letto più contenute.

Nonostante gli accorgimenti nelle condizioni sperimentali adottate, in più occasioni la temperatura massima del letto di gassificazione ha superato gli 850 °C, valore prossimo al limite di funzionamento del reattore (900 °C). Questo ha limitato la possibilità di incrementare ulteriormente l'arricchimento di ossigeno nell'aria non potendo, contestualmente, incrementare la portata di vapore che funge da moderatore termico. Ciò perché la caldaia di produzione di vapore attualmente installata può produrre una portata massima di 35-36 kg/h. Questo ha suggerito, su proposta di UVAN che contestualmente alla fase di chiusura della LA 1.14 ha avviato le attività inerenti la LA 1.15, l'acquisizione di una nuova caldaia per garantire una produzione globale di vapore di circa 100 kg/h.

Un'ulteriore modifica suggerita da UVAN, a seguito della campagna sperimentale, riguarda il prossimo utilizzo di un combustibile plastico avente un potere calorifico più basso di quello fin qui utilizzato. L'individuazione di tale materiale verrà effettuata con le ditte del settore. Questo accorgimento, assieme all'installazione della nuova caldaia, dovrebbe consentire un maggiore controllo della temperatura di esercizio nei test previsti nell'ambito della LA 1.12 con soli ossigeno e vapore.

7.3 Modifiche impiantistiche

Si riportano le principali modifiche impiantistiche realizzate nell'ambito della LA 1.11. Alcune di queste sono state realizzate prima dell'attività sperimentale condotta, altre sono state suggerite da questa, al fine di procedere con i test con ossigeno e vapore, previsti dalla LA 1.12.

Nuova caldaia e linea di adduzione vapore

È stato emesso l'ordine per l'acquisizione di una nuova caldaia a vapore per consentire l'utilizzo complessivo di una portata di vapore di circa 100 kg/h, sulla base delle proposte di UVAN. La caldaia sarà installata in aggiunta a quella già esistente che permette di lavorare fino ai 35-40 kg/h. Sono poi state eseguite due modifiche alla linea di adduzione vapore:

- nuova linea ad alta temperatura con maggiore portata, in cui il vapore prodotto in caldaia viene inviato ad un riscaldatore elettrico dalla potenza di 7,5 kW, dotato di regolatore, al fine di produrre vapore surriscaldato a circa 115 °C di temperatura e 0,4 bar relativi di pressione;
- spostamento della linea a bassa temperatura (già esistente) in cui il vapore prodotto dalla caldaia passa attraverso un rotametro per la misurazione della portata e viene alimentato al gassificatore.

Linea di inertizzazione con CO₂

Al fine di alimentare una minor quantità di azoto di sbarramento all'interno del gassificatore è stata realizzata una nuova linea di adduzione CO₂. Tale linea verrà utilizzata per l'alimentazione della CO₂ come fluido di inertizzazione dei condotti di caricamento del combustibile. La linea CO₂ così realizzata è composta da una centrale di riduzione pressione, un misuratore di pressione e uno di portata.

Sistema di analisi online del syngas

Il sistema di analisi on-line del syngas installato sull'impianto FABER è stato inizialmente progettato per l'analisi del syngas proveniente dalla gassificazione di biomasse. Ora è stato modificato in quanto a seguito dei pre-test effettuati prima di iniziare la campagna sperimentale si è osservato che con l'utilizzo dei rifiuti plastici, è aumentata la quantità di tar e condense presenti nel gas campionato. Al fine di evitare lo sporco delle apparecchiature interne al sistema di analisi (come le elettrovalvole e gli analizzatori) sono stati installati nuovi componenti di filtraggio e condensazione.

Modifiche elettriche

L'introduzione della nuova strumentazione ha richiesto delle attività elettriche per il cablaggio dal campo al sistema di regolazione e controllo. Tra le strumentazioni interessate a tali interventi ci sono: misuratore di portata del vapore (flangia tarata); misuratore di pressione del vapore; misuratore di temperatura del vapore;

riscaldatore del vapore; inverter di regolazione per il riscaldatore di vapore controllato dal misuratore di temperatura montato sul secondo quadro di controllo; misuratore e controllore di portata di CO₂; misuratore di pressione di CO₂; misuratore di pressione di O₂.

Sistema di regolazione e controllo

Sono state effettuate delle modifiche sull'impianto che hanno necessitato dell'inserimento di nuove strumentazioni. Al fine di implementare tutti i segnali della nuova strumentazione installata, è stato necessario ampliare il quadro di controllo Q-02 con l'inserimento di nuovo hardware dedicato alla gestione dei nuovi segnali e la modifica al sinottico di controllo del processo. Sono stati trasferiti, inoltre, i segnali di controllo del dosatore delle plastiche Definitive Innovation verso il sistema di controllo generale Eurotherm al fine di renderlo gestibile dall'operatore in sala controllo.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nella presente linea LA 1.11 non è stata portata avanti alcuna attività di consulenza esterna.

9 Pubblicazioni scientifiche

È stato proposto ed accettato un contributo scientifico:

Performance characteristics of a pilot-scale plastics waste gasifier using oxygen-enriched air and steam, con autori: G. Calì¹, F. Parrillo², C. Boccia², F. Ardolino², A. Pettinau¹, U. Arena². (¹Sotacarbo S.p.A., Grande Miniera di Serbariu, 09013, Carbonia, CI, Italy; ²Department of Environmental, Biological, Pharmaceutical Sciences and Technologies – University of Campania “Luigi Vanvitelli”, Via Vivaldi 43-81100, Caserta, Italy) da presentare al Simposio Internazionale SARDINIA 2023-19th Int. Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling, in data 9-13 ottobre 2023.

10 Eventi di disseminazione

Nessun evento di disseminazione nel corso della LA 1.11