

## CENTRALI A POLVERINO DI CARBONE. RIDUZIONE EMISSIONI

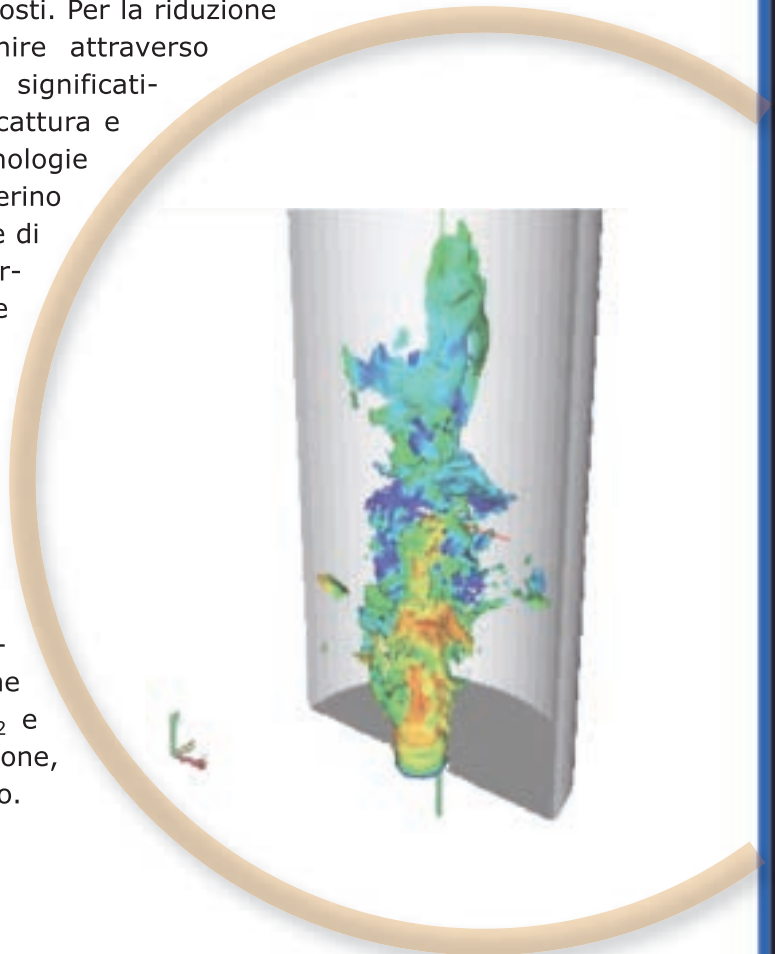
Tema di ricerca 5.2.2.2 - Sviluppo di un sistema innovativo di combustione, oxicombustione di tipo "flameless", per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione, predisposti per la cattura della CO<sub>2</sub>

### Scenario di riferimento

Il carbone rappresenta a livello internazionale un'alternativa concreta e sicura per la produzione di energia. Anche il nostro Paese si sta indirizzando verso un incremento nell'uso di tale fonte (oggi pari a un terzo della media europea) attraverso attività di ricerca e sviluppo di tecnologie pulite, in grado di aumentare l'efficienza di conversione e contenere i costi di investimento.

L'utilizzo tecnologicamente avanzato del carbone consente già oggi livelli di emissioni molto al di sotto dei limiti imposti. Per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> si può intervenire attraverso l'incremento dell'efficienza e, ancor più significativamente, attraverso la sua separazione, cattura e successivo sequestro. Le moderne tecnologie prevedono la combustione diretta del polverino di carbone in una caldaia per la produzione di vapore (impianti SuperCritici e UltraSuper-Critici) oppure la gassificazione e combustione in turbogas del syngas prodotto in impianti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycles). In entrambi i casi, per ridurre significativamente le emissioni di CO<sub>2</sub>, occorre far ricorso a tecnologie di "CCS" (Carbon Capture and Storage).

Un'alternativa promettente a queste tecnologie è rappresentata dalla combustione in ossigeno (ossicombustione), che produce una corrente concentrata di CO<sub>2</sub> e vapore facilmente separabili per condensazione, cui far seguire la fase di cattura e sequestro.



### Obiettivi

Obiettivo dell'attività è lo sviluppo di un sistema per la combustione diretta del polverino di carbone, due volte innovativo, in quanto realizza una combustione di tipo "flameless" (senza fronte di fiamma) altamente

controllabile, efficiente e a basse emissioni, e perché si basa sulla ossi-combustione.

L'ossicombustione "flameless" offre una serie di vantaggi:

- forte riduzione nei fumi di agenti inquinanti quali polveri,  $\text{NO}_x$ , metalli pesanti, e possibilità di impiegare combustibili "sporchi" come il carbone Sulcis;
- fusione massiva delle ceneri con produzione di scorie vetrificate inerti facilmente riciclabili;
- gas combusti costituiti prevalentemente da  $\text{CO}_2$  e vapor d'acqua, con facilità di cattura e separazione della  $\text{CO}_2$  e minori penalizzazioni economico-energetiche;
- rendimenti nella produzione di energia elettrica più elevati, dell'ordine del 37%, rispetto ai tradizionali cicli a vapore con sequestro della  $\text{CO}_2$ ;
- dimensioni contenute dell'impianto (nel caso del dispositivo in pressione).

Il programma intende sviluppare conoscenze di base e ingegneristiche per la progettazione di dispositivi innovativi, quelli operanti in pressione, o per il retrofit di sistemi convenzionali operanti a pressione atmosferica. Obiettivi a breve termine sono la messa a punto di metodi di progettazione per applicare i risultati ottenuti su impianti pilota al dimensionamento di impianti di potenza con taglie di interesse industriale, e lo sviluppo di strumenti, numerici e sperimentali, per l'analisi e il controllo di processo.

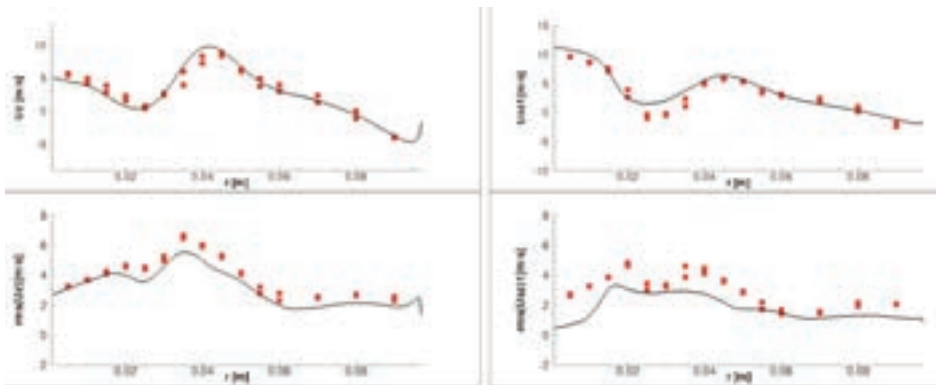
## Risultati

### **Sviluppo di criteri di scalatura tramite codici di simulazione termofluidodinamica**

La scalatura del combustore pressurizzato da 5  $\text{MW}_t$  a 50  $\text{MW}_t$  si basa sull'invarianza della velocità in ingresso del combustibile (in questo caso slurry e vapore) e del comburente (gas riciccolati arricchiti di ossigeno). Sono stati definiti diametri del bruciatore tali da garantire l'uguaglianza delle velocità per le nuove portate, ottenendo un reattore geometricamente "simile" a quello pilota reale. Sono state considerate diverse granulometrie per il carbone, differenti contenuti di acqua nello slurry, differenti rapporti di ricircolazione dei gas combusti e temperature degli stessi. L'attività ha messo in luce la sostanziale uniformità del campo termico, e della temperatura di uscita dal combustore, al variare della potenza per granulometrie fini. L'aumento di potenza ha un effetto positivo nel caso di granulometria grossolana (completa combustione

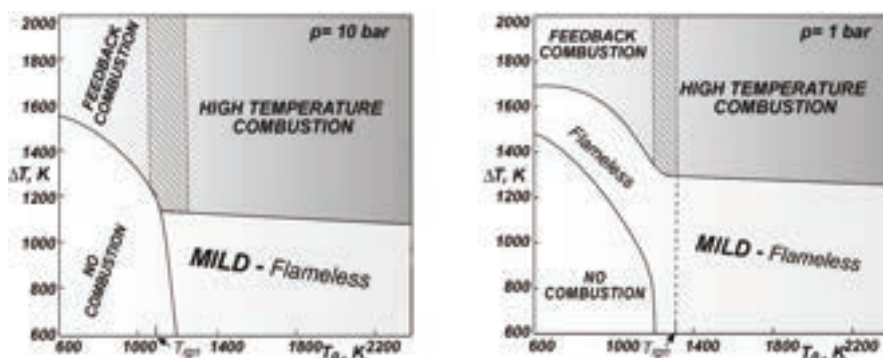
delle particelle e massimizzazione del ricircolo interno).

Per cogliere gli aspetti connessi alla stabilità di combustione, è stata analizzata l'interazione fase solida-fase gassosa nella zona di reazione, mediante modelli di simulazione avanzata LES (Large Eddy Simulation) integrati nel codice proprietario HeaRT® di ENEA. In particolare è stato individuato e analizzato un modello matematico adatto a descrivere processi di combustione di polverino di carbone, poi implementato all'interno del codice HeaRT®. È stato anche messo a punto e testato un modello radiativo per il caso di fluidodinamica multifase. Il codice si è dimostrato in grado di riprodurre la struttura del flusso sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. L'attività è stata condotta da ENEA in collaborazione con l'Università di Roma "La Sapienza" (Dipartimento di Meccanica ed Aeronautica).



*Validazione del codice HeaRT: confronto tra velocità assiale misurata (simboli) e simulata (linee), per la fase gas (sinistra) e per la fase dispersa (destra) a 52 mm dall'ingresso in camera test. In alto sono riportate le velocità medie mentre in basso sono mostrate le fluttuazioni rms*

Lo studio delle condizioni di combustione determinate dal forte ricircolo di gas esausti ha richiesto l'individuazione di diversi regimi ossidativi, in quanto le distribuzioni di temperatura e di specie sono differenti rispetto a quelle della combustione standard. L'analisi è stata effettuata al variare della temperatura, della concentrazione di ossigeno, della velocità del flusso e della pressione. Tale attività è stata svolta dall'Università di Napoli (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica).



*Mappa di comportamento ottenuta per la configurazione con preriscaldamento e diluizione a 10 e 1 bar. Nei diagrammi è indicata la regione di combustione "flameless"*

Altro aspetto fondamentale riguarda lo sviluppo di una modellistica della cinetica di volatilizzazione e ossidazione del carbone che tenga conto della particolare natura del carbone Sulcis, ricco di zolfo. Il Politecnico di Milano (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica) ha sviluppato un modello predittivo basato sulla sola analisi elementare del carbone. Nel primo anno di attività sono state sviluppate correlazioni per individuare la percentuale delle varie componenti solforate rilasciate. Nel secondo anno sono stati studiati il rilascio di composti azotati dal carbone e i meccanismi cinetici di ossidazione di composti solforati e azotati in fase gas, le interazioni reciproche e quelle con altri composti del sistema. I modelli sono in accordo con i dati sperimentali e soprattutto sembrano in grado di prevedere gli andamenti delle emissioni al variare delle condizioni operative.

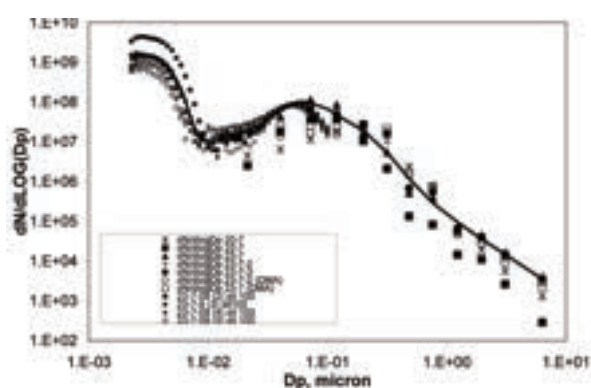
È stata inoltre studiata la devolatilizzazione in condizioni flameless, per la predizione, in relazione alle condizioni di esercizio (pressione e temperatura), delle specie combustibili che da tale fase originano per la successiva ottimale ossidazione. L'attività, svolta da ENEA in collaborazione con l'Università di Roma "La Sapienza" (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ambiente), ha riguardato lo sviluppo e l'utilizzo di modelli di predizione quantitativa dei composti che si sviluppano in questa prima fase della combustione e che ne condizionano gli stadi successivi, in fase gassosa. I risultati sono stati utilizzati per simulazioni numeriche con codice FLUET per un'analisi di sensibilità sul reattore pressurizzato al variare di parametri fondamentali (granulometria polverino, portata e temperatura dei gas esausti riciclati ecc.)

Per determinare i dati sperimentali indispensabili all'attività di modellazione condotta da ENEA, Politecnico di Milano, e Università di Roma "La Sapienza", Sotacarbo ed ENEA hanno realizzato facility sperimentali integrate per la caratterizzazione chimico-fisica dei carboni.

### Prove sperimentali

Sono state condotte campagne di prova sull'impianto pilota da 5 MW<sub>t</sub> ISOTHERM, di SOFINTER (Gioia del Colle), e sugli impianti FOSPER e IPFR di ENEL-IFRF (Pisa), in collaborazione con l'Università di Napoli (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica) per la caratterizzazione delle emissioni e del particolato solido. I risultati ottenuti in termini di inquinanti sono lusinghieri (un ordine di grandezza inferiori ai limiti imposti).

È stato messo in opera un sistema integrato per la caratterizzazione dimensionale del particolato (da 2 nm a 10 μm) e la successiva speciazione chimica. La caratterizzazione è stata effettuata in diverse condizioni operative sui reattori ISOTHERM e FOSPER, con carboni di differenti caratteristiche chimico-fisiche. L'analisi ai raggi x del materiale raccolto

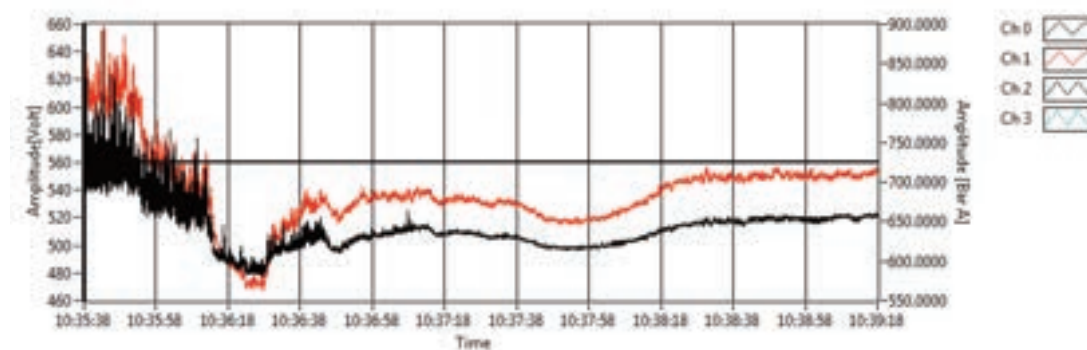


*Caratterizzazione del particolato solido. Distribuzione dimensionale delle polveri a valle del reattore ISOTHERM, nell'intervallo 2 nm - 10 μm*

mostra una forte dipendenza dalla composizione chimica del combustibile. Le polveri si distribuiscono secondo una funzione multimodale. In generale la combustione in ossigeno riduce la formazione di particelle con diametro elevato a favore di quelle microbiche (3 nm). Le polveri microbiche hanno un elevato contenuto di incombusti e derivano da polverino parzialmente bruciato. Quelle nanometriche hanno uno spettro di assorbimento simile a quello del carbonio organico prodotto nella combustione ricca degli idrocarburi. Particelle di ossidi metallici sono presenti in tutto l'intervallo dimensionale seppure in quantità limitata. Le polveri nanometriche hanno una grossa affinità in acqua e sono parzialmente rimosse dalla condensazione del vapore di combustione.

### Sviluppo e test di sistemi diagnostici avanzati

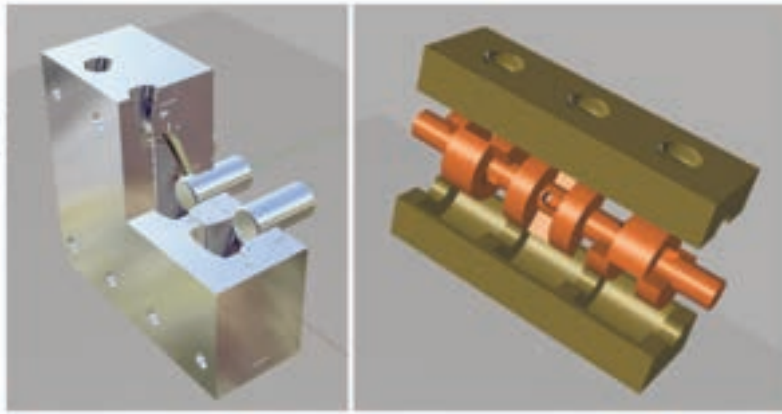
È stato messo a punto e brevettato da ENEA un dispositivo di misura non invasivo, basato sulla tecnologia ODC® (Optical Diagnostic of Combustion) per misure di stabilità di combustione, velocità, fluttuazioni di temperatura. L'attività è stata svolta in collaborazione con la società ENSYEN Srl e il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali dell'Università di Pisa. Il dispositivo è stato ingegnerizzato per applicazioni industriali, come i reattori ISOTHERM, FOSPER e IPFR, ove l'accesso alla zona reagente deve essere miniaturizzato e reso passivo alle alte temperature, grazie al ricorso a una sonda in monocristallo di zaffiro. Una prima campagna di misure ha avuto come obiettivo l'individuazione di "indicatori sintetici" utili alla caratterizzazione dinamica del processo, all'ottimizzazione e al controllo. Alle variazioni di ossigeno, portata combustibile e prodotti di combustione riciccolanti, corrispondono andamenti coerenti degli indicatori suddetti, anche in transitori operazionali.



*Transitorio da combustione standard a flameless. Trend dei segnali da sonde ODC variamente dislocate*

### Sviluppo di componenti ed analisi di sistema

È stata sviluppata e testata una tecnologia di pompaggio con un dispositivo volumetrico a pistoni che assicura la costanza della pressione di alimentazione e della portata del combustibile (slurry di carbone e acqua) con oscillazione massima del 3%. Il sistema ha un rendimento



*Rendering del corpo pompa assemblato con pistoni posizionati, ed esploso delle valvole ad otturatori rotativi*

energetico di circa il 30% superiore a quello dei normali sistemi in uso, e un rendimento volumetrico del 98%. La tecnologia è stata messa a punto con prove di laboratorio su facility ENEA in piccola scala prima della progettazione di un'unità modulare per l'alimentazione del reattore ISOTHERM.

Per l'analisi di sistema, sono state effettuate simulazioni utili alla progettazione del circuito dimostrativo finale, con collegamento ad una caldaia di tipo UltraSuperCritico a elevato rendimento, e sottrazione della CO<sub>2</sub>. Sono state valutate possibili alternative di ciclo, con simulazioni numeriche. Un'applicazione di particolare interesse riguarda l'utilizzo del sistema a ossi-combustione come sistema di "internal heating" in un ciclo operante sul vapore a bassa pressione di un ciclo UltraSuperCritico. Il sistema prevede l'integrazione di un ciclo Rankine classico con un surriscaldatore aggiuntivo del vapore di bassa pressione, ove l'apporto entalpico avviene attraverso la combustione all'interno del flusso di vapore. Il ciclo comporta un notevole aumento di rendimento, che l'estrazione della CO, prodotta dopo condensazione, riduce solo di alcuni punti. Il sistema è idoneo al retrofit di impianti esistenti, senza produzione aggiuntiva di inquinanti.

### Documentazione disponibile

I documenti tecnici che riportano i risultati delle attività e delle ricerche sono consultabili sul sito [www.enea.it](http://www.enea.it).