

## CENTRALI A POLVERINO DI CARBONE - RENDIMENTI

Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone. Sviluppo di un sistema di combustione di tipo "flameless" per impianti di produzione di elettricità con ridottissimi livelli di emissione di inquinanti e CO<sub>2</sub>

### Scenario di riferimento

Il carbone rappresenta oggi 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 un insieme di 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 di impiego prevedono la combustione diretta del polverino di carbone in una caldaia per la produzione di vapore (impianti SuperCritici e UltraSuperCritici) oppure la gassificazione e combustione in turbogas del syngas prodotto in impianti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycles). In entrambe i casi, per ridurre fortemente le emissioni di CO<sub>2</sub> occorre far ricorso a tecnologie CCS (Carbon Capture and Storage).

### Obiettivi

Obiettivo finale dell'attività è lo sviluppo di un sistema per la combustione diretta del polverino di carbone due volte innovativo, in quanto realizza una combustione altamente controllabile, efficiente e a basse emissioni, di tipo "flameless", e si basa sulla ossi-combustione, che agevola la separazione e cattura della CO<sub>2</sub> per il successivo confinamento geologico.

Il nuovo sistema di combustione opera in pressione (5-10 bar) e offre una serie di vantaggi, che costituiscono gli obiettivi tecnologici e ingegneristici che si intende verificare e dimostrare:

- forte riduzione nei fumi di agenti inquinanti quali polveri, NO<sub>x</sub>, 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 CO<sub>2</sub> e vapor d'acqua, con facilità di cattura e separazione della CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>;
- dimensioni contenute dell'impianto;
- alimentazione del carbone con granulometrie grossolane.

Obiettivi a breve termine sono la messa a punto di metodologie di progettazione che consentano di applicare i risultati ottenuti su di un impianto pilota al dimensionamento di impianti di potenza con taglie di interesse industriale (criteri di scalatura), e lo sviluppo di strumenti, numerici e sperimentali, per l'analisi e il controllo di processo. L'attività ha durata complessiva di tre anni e prende a riferimento il reattore ISOTHERM-PWR di ITEA-SOFINTER, reattore pressurizzato operante una combustione di slurry di acqua e carbone in ossigeno.



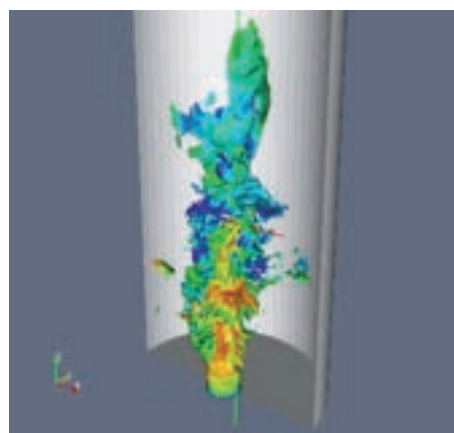
Reattore ISOTHERM-PWR di ITEA-SOFINTER

## Risultati

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

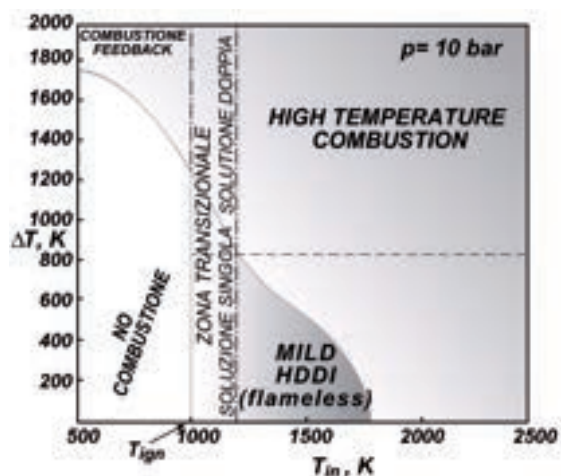
L'ENEA, in collaborazione con Sotacarbo, ha condotto simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamic) della termofluidodinamica e chimica del sistema di ossi-combustione, per valutare gli effetti delle principali variabili (granulometria, portata di ricircolo gas combusto, contenuto di acqua nello slurry, temperatura gas ricircolo). Lo studio è volto alla verifica delle condizioni che determinano l'instaurarsi del regime di combustione "flameless" sia per carboni commerciali che per carbone Sulcis, con tenore di zolfo pari al 6-7%. Per meglio cogliere gli aspetti dinamici connessi alla stabilità di combustione, è stata

inoltre analizzata l'interazione dinamica fase solida-fase gassosa nella zona di reazione mediante modelli di simulazione avanzata LES (Large Eddy Simulation) integrati nel codice proprietario HearT®-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®.



Superfici isolivello di velocità delle fase solida

I fenomeni turbolenti hanno influenza sui processi reattivi; per cogliere tali aspetti, è in fase di sviluppo, in collaborazione con il Politecnico di Milano, un modello in grado di riprodurre la dispersione di un getto di particelle dovuta all'interazione con il flusso del fluido circostante. Lo studio delle condizioni di combustione determinate dal forte ricircolo di gas esausti ha richiesto l'individuazione di diversi regimi ossidativi. Tale attività è stata svolta dall'Università di Napoli. In presenza di elevati livelli di ricircolo, il sistema risulta caratterizzato da una distribuzione di temperatura e di specie differente da quelle che si verificano in condizioni di combustione standard. L'analisi delle strutture ossidative di interesse è stata effettuata al variare della temperatura, della concentrazione di ossigeno, della velocità del flusso e della pressione. Nel diagramma seguente è possibile individuare la regione di combustione "flameless" alla pressione di esercizio di 10 bar. Altro aspetto fondamentale riguarda lo sviluppo di una modellistica più avanzata della cinetica di



*Regimi di combustione al variare della temperatura di ingresso dell'ossidante ( $T_{in}$ ) e del massimo incremento di temperatura ottenibile ( $\Delta T$ , funzione della frazione ossidante)*

volatilizzazione e ossidazione del carbone, che tenga conto della particolare natura del carbone Sulcis, ricco di zolfo. Il Politecnico di Milano ha sviluppato un modello predittivo basato sulla sola analisi elementare del carbone. Nota la composizione dettagliata in termini di composti dello zolfo, sono state sviluppate delle semplici correlazioni per individuare la percentuale delle varie componenti solforate. Sulla scorta di questa composizione iniziale è stato proposto un modello di sei reazioni, che descrive il rilascio di zolfo sotto forma di  $H_2S$ , zolfo nel tar e infine zolfo residuo nel char. Il modello sviluppato richiede affinamento e convalida su dati sperimentali che saranno ricavati da Sotacarbo. È previsto lo studio del processo di ossidazione dello zolfo da  $H_2S$  in  $SO_2$  per analizzare l'insorgenza di potenziali fenomeni corrosivi.

Al fine di determinare i dati sperimentali indispensabili all'attività di modellazione condotta da ENEA e Politecnico di Milano, Sotacarbo ha realizzato un laboratorio per la caratterizzazione chimico-fisica dei carboni.

Riguardo la pulizia dei prodotti di combustione, sono stati considerati sistemi per la rimozione del particolato (cicloni e multicicloni, precipitatori elettrostatici, filtri ceramici a candela, filtri

ceramici "cross-flow", filtri a letto granulare) e sistemi di desolforazione (processi a umido, semi-secco e rigenerabili). Particolare menzione merita il processo SNOX sviluppato dalla Haldor Topsoe. Tale sistema rimuove i composti dello zolfo sotto forma di acido solforico, e la sua applicazione è favorita dalla temperatura dei gas (circa 400 °C) e dalla pressione di esercizio del loop dimostrativo.

### **Prove sperimentali**

Sono state condotte campagne di prova sull'impianto pilota da 5 MWt ISOTHERM, presso SOFINTER (Gioia del Colle), per la caratterizzazione delle emissioni (ENEA) e del particolato solido (ENEA e Università di Napoli). Tali prove risultano preliminari perché condotte con carboni convenzionali, non Sulcis. I risultati ottenuti in termini di inquinanti sono lusinghieri (valori di un ordine di grandezza inferiori ai limiti imposti).

Riguardo il particolato solido, l'Università di Napoli, in collaborazione con ENEA, ha messo in opera un sistema integrato per la caratterizzazione dimensionale (da 1 nm a 10  $\mu m$ ) e la successiva speciazione chimica. La caratterizzazione è stata effettuata in diverse condizioni operative nel reattore ISOTHERM, utilizzando carboni di differenti caratteristiche chimico-fisiche. L'analisi ai raggi X del materiale raccolto mostra una forte dipendenza dalla composizione chimica del combustibile alimentato, oltre alla presenza di elementi tipici del materiale costruttivo dell'impianto. Bassa è la concentrazione di carbonio nel particolato con dimensioni superiori a 0,4  $\mu m$ .

### **Sviluppo e test di sistemi diagnostici avanzati**

È stato messo a punto e brevettato da ENEA un dispositivo di misura non invasivo, basato su tecnologia ODC (Optical Diagnostic of Combustion) che consente misure di stabilità di combustione, velocità (medie e dinamiche), fluttuazioni di

temperatura. Il dispositivo è stato ingegnerizzato per applicazioni industriali, quali quelle del reattore ISOTHERM, 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.

La prima campagna di misure ha avuto come obiettivo l'individuazione di "indicatori sintetici" utili alla caratterizzazione dinamica del processo, all'ottimizzazione e al controllo. Dai riscontri ottenuti si evince la sostanziale stazionarietà del processo (andamento tipico della combustione flameless). Le variazioni di contenuto di ossigeno, portata combustibile e quantità di prodotti di combustione ricircolanti, mostrano andamenti coerenti degli indicatori suddetti, anche in transitori operazionali.

### **Analisi preliminare di cicli termodinamici e configurazione di impianto**

Sono state effettuate simulazioni utili alla progettazione del circuito dimostrativo finale, con collegamento ad una caldaia di tipo UltraSuper-Critico ad elevato rendimento, e successiva sottrazione della CO<sub>2</sub>. Sono state valutate possibili alternative di ciclo, attraverso simulazioni con codici Ipse PRO e CHEMCAD. 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 vapore surriscaldato fino a temperature di 1.500 K espande in una macchina simile ad un turbogas. Il ciclo comporta un notevole aumento di rendimento, che l'estrazione della CO<sub>2</sub> prodotta dopo condensazione riduce solo di alcuni punti;

tecnologie avanzate di raffreddamento delle palette della macchina consentono una Turbine Inlet Temperature superiore allo standard attuale delle turbine a gas (1.800 K contro i 1.500 K classici). Il sistema è idoneo al retrofit di impianti esistenti senza implicare produzione aggiuntiva di inquinanti.

Riguardo apparati specifici del sistema, critico è il pompaggio stabile dello slurry. L'ENEA ha sviluppato una pompa volumetrica a pistoncini ad alto rendimento, con pulsatilità contenuta (entro il 3% del valore della portata) che non richiede ulteriori componenti smorzatori, e può trattare fluidi particolari quali slurry di carbone con granulometria grossolana. È stata realizzata una pompa prototipo da 700 l/h, prevalenza 25 bar, caratterizzata da un particolare profilo di moto dei pistoncini. La pompa è stata testata con successo, con slurry, presso i laboratori ENEA, e se ne prevede il prossimo trasferimento sull'impianto ISOTHERM, per prove di caratterizzazione finali.

### **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).