Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza

Ottimizzazione filiera CCS

Il progetto sviluppa un modello di ottimizzazione basato su Mixed-Integer Linear Programming (MILP) per pianificare le catene CCS (Carbon Capture and Storage), essenziale per ridurre le emissioni dei settori industriali hard-to-abate in Italia. Il modello ottimizza costi di implementazione e operatività per cattura, trasporto e stoccaggio di CO₂, includendo variabili come tecnologie di cattura (post-combustione, ossicombustione), modalità di trasporto (pipeline, treni, camion, navi) e un sito di stoccaggio offshore nell'Adriatico. Applicato su 61 impianti industriali (cementifici, acciaierie, raffinerie e WtE), consente di pianificare infrastrutture per decarbonizzare fino a 22 MtCO₂/anno entro il 2050. Il modello offre uno strumento flessibile e scalabile per policy maker e investitori, supportando decisioni strategiche e valutazioni economiche a lungo termine per infrastrutture CCS efficienti e sostenibili.

Laboratorio	LEAP
Area di specializzazione	Energia e Sostenibilità
Referenti	Matteo Zatti
Keyword	Cattura e Stoccaggio CO2, Ottimizzazione filiera, Settori hard-to-abate, Programmazione MILP

"Modello di ottimizzazione MILP per la pianificazione della catena Carbon Capture and Storage"

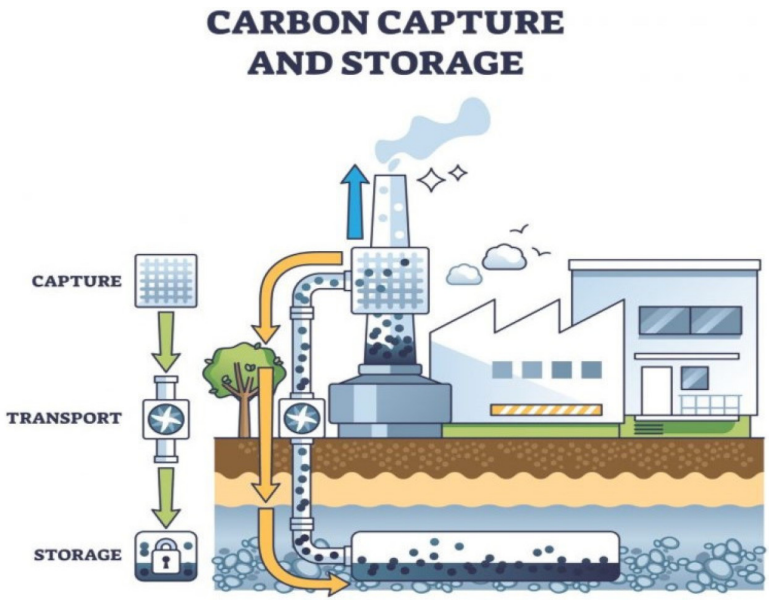


Fig. 1: Filiera Carbon Capture and Storage (fonte: iStock)

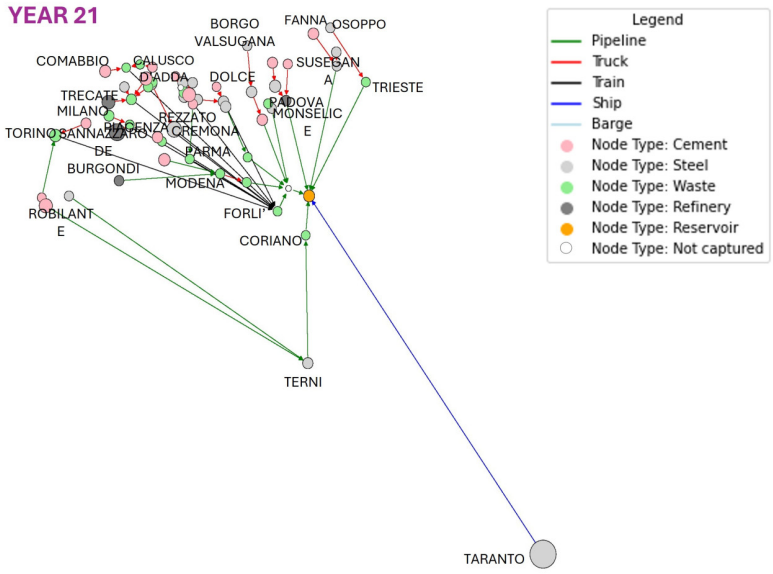


Fig. 2: Progetti di infrastrutture previsti con il modello MILP

Descrizione

Il progetto propone un modello di ottimizzazione basato su Mixed-Integer Linear Programming (MILP) per la pianificazione delle catene di Carbon Capture and Storage (CCS), una tecnologia chiave per la decarbonizzazione dei settori industriali hard-to-abate. Questi settori, tra cui cementifici, acciaierie, raffinerie e impianti di Waste-to-Energy (WtE), sono caratterizzati da elevate emissioni di CO₂ e da limitate alternative tecnologiche per una riduzione significativa.

Il modello è progettato per supportare decisori politici, investitori e pianificatori industriali nella definizione di strategie di implementazione di infrastrutture CCS. Attraverso la minimizzazione dei costi totali annualizzati (TAC), considera tutte le fasi della catena CCS: cattura della CO₂ nei siti emissivi, trasporto tramite modalità multimodali (pipeline, treni, camion, navi) e stoccaggio finale offshore nell'Adriatico. Il funzionamento si basa su input dettagliati, tra cui emissioni dei siti, costi e performance delle tecnologie di cattura e trasporto, e obiettivi di decarbonizzazione.

Il modello offre uno strumento flessibile e scalabile, consentendo simulazioni per differenti scenari e target, fino a 22 MtCO₂/anno sequestrate entro il 2050. Garantisce inoltre un approccio ottimizzato che bilancia esigenze economiche e ambientali, facilitando decisioni strategiche per infrastrutture CCS sostenibili a lungo termine.

Aspetti innovativi

Il progetto introduce un modello di ottimizzazione MILP innovativo che combina un livello di dettaglio geografico con un approccio modulare per la pianificazione di catene CCS. Rispetto allo stato dell'arte, il modello integra variabili settoriali e tecnologiche (ad esempio, tecnologie di cattura specifiche per cemento, acciaio e WtE) con modalità di trasporto multimodali, permettendo una pianificazione flessibile e scalabile.

Un aspetto distintivo è l'ottimizzazione simultanea di cattura, trasporto e stoccaggio, che bilancia costi, performance e vincoli ambientali su un orizzonte temporale di 20 anni. L'uso di input ad alta risoluzione, come emissioni localizzate e specifici costi CAPEX/OPEX, consente simulazioni personalizzate, superando la rigidità dei modelli tradizionali su scala continentale.

Innovativa è anche l'applicazione al contesto italiano, con un focus su infrastrutture multimodali e lo stoccaggio offshore. Questo approccio genera strategie economicamente vantaggiose, accelerando la transizione verso la decarbonizzazione dei settori hard-to-abate.

Applicazioni

Il modello trova applicazione nei settori hard-to-abate come cemento, acciaio, raffinerie e Waste-to-Energy (WtE), ottimizzando catene CCS su misura per ridurre le emissioni di CO₂. Può supportare policy maker e investitori nella pianificazione di infrastrutture per la decarbonizzazione, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi climatici. Applicabile anche a contesti geografici e temporali diversi, il modello facilita decisioni strategiche per transizioni sostenibili in settori industriali ad alta intensità emissiva.

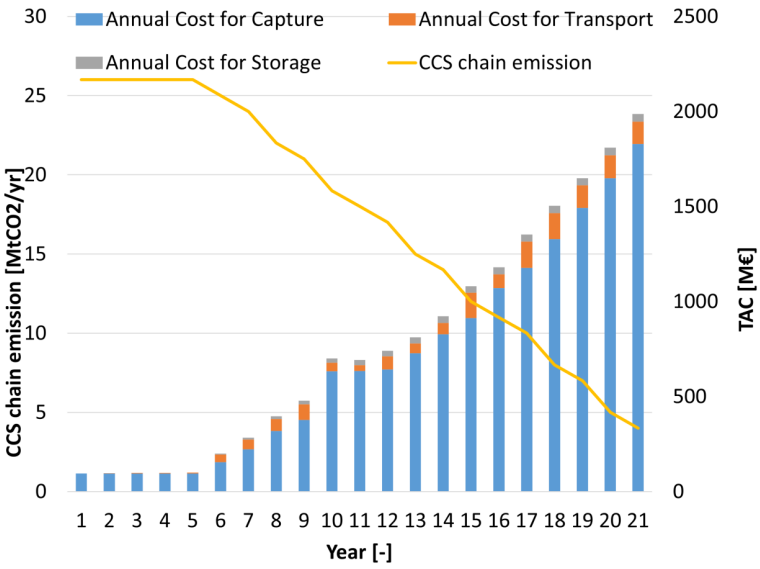


Fig. 3: Ripartizione dei costi annuali per la cattura, il trasporto e lo stoccaggio (asse primario) rispetto alla catena di emissioni CCS (asse secondario)

Partner coinvolti

LEAP, Politecnico di Milano

Tempi di realizzazione

6 mesi uomo

Livello di maturità tecnologica

TRL 5 - tecnologia validata in ambiente rilevante

Valorizzazione applicazione

Il modello può essere valorizzato attraverso collaborazioni con imprese nei settori hard-to-abate per adattare e applicare il tool alle specifiche esigenze. Si prevede di sviluppare partnership con operatori industriali e istituzioni pubbliche per implementare infrastrutture CCS su scala regionale e nazionale, con la possibilità di creare spin-off dedicati alla consulenza e sviluppo tecnologico.

Esempio di applicazione

Applicazione del modello MILP per la pianificazione della catena CCS nei settori industriali hard-to-abate in Italia: cattura, trasporto e stoccaggio di CO₂ fino a 22 MtCO₂/anno

Il modello MILP è stato applicato alla pianificazione della catena CCS in Italia, considerando 61 impianti industriali nei settori cemento, acciaio, raffinerie e WtE. L'obiettivo era ottimizzare i costi di cattura, trasporto e stoccaggio di CO₂, bilanciando vincoli economici e ambientali su un orizzonte di 20 anni.
I risultati mostrano che, entro il 21° anno, l'infrastruttura cattura 25 MtCO₂/anno, con una rete di circa 2000 km di pipeline. Il costo annualizzato totale (TAC) è pari a 6775 M€, con l'89% associato alla cattura, l'8% al trasporto e il 3% allo stoccaggio. L'uso di pipeline è preferito per connessioni medio-lunghe, mentre camion e treni risultano ottimali per tratte brevi e distanze superiori a 150 km.
Il modello ha individuato strategie ottimali per l'installazione progressiva delle infrastrutture, privilegiando inizialmente i cementifici (più economici), seguiti da WtE, acciaierie e raffinerie. L'Annualized Cost of Stored Carbon (ACSC) minimo, pari a 29,2 €/tCO₂, si registra al 18° anno. L'applicazione ha dimostrato la fattibilità di un'infrastruttura CCS scalabile e sostenibile, utile per il raggiungimento degli obiettivi climatici nazionali.

Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza

LEAP

Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza



LEAP è stato costituito nel maggio 2005 a Piacenza su iniziativa della Sede di Piacenza del Politecnico di Milano ed è uno dei laboratori della Rete Alta Tecnologia della Regione Emilia-Romagna. Racchiude tra i suoi soci eccellenze dal mondo universitario ed industriale e le principali istituzioni territoriali piacentine.
Obiettivi di LEAP sono la ricerca, l'erogazione di consulenze e servizi, l'esercizio di azioni di trasferimento tecnologico per industria ed enti pubblici. Svolge attività sperimentali e prove su impianti e sull'ambiente, organizza corsi di formazione ed iniziative di divulgazione scientifica.
Le attività LEAP sono distribuite su 4 aree di competenza: (i) Waste to Value – Materia ed Energia da rifiuti, residui e biomasse, (ii) Low Carbon Technologies – Tecnologie Energetiche e processi industriali a basse emissioni di CO_2, (iii) Smart Energy Systems – Energie rinnovabili ed Efficienza Energetica e (iv) Emissions & Air Quality – Emissioni Gassose, polveri e qualità dell'aria.
LEAP offre soluzioni flessibili e adattabili alle esigenze del cliente, senza perdere il rigore scientifico che mantiene a tutti i livelli. È coinvolto in progetti di ricerca nazionali e internazionali di alto rigore scientifico, come partner e come coordinatore. Allo stesso tempo, offre consulenze industriali in cui dominano l'innovazione, l'attenzione al contesto normativo e la capacità di interfacciarsi con soggetti diversi per natura, dimensione, cultura e vocazione.

Sito web	http://www.leap.polimi.it
Direttore	Marco Sciarmella
Data pubblicazione	31/10/2025