



## Ricerca di Sistema elettrico

# Definizione delle metodologie di analisi e raccolta dati finalizzate all'analisi di sostenibilità economica, ambientale e sociale

Claudio Carbone, Alessandro Agostini, Stefano Stendardo

Report RdS/PTR2019/069

DEFINIZIONE DELLE METODOLOGIE DI ANALISI E RACCOLTA DATI FINALIZZATE ALL'ANALISI DI SOSTENIBILITÀ ECONOMICA,  
AMBIENTALE E SOCIALE

Claudio Carbone, Alessandro Agostini, Stefano Stendardo

Con il contributo di: A. Assettati, F. Bozza, G. Calchetti, S. Cassani, A. Di Nardo, A. Grasso, M.L. Grilli, G.  
Guidarelli, G. Guidi, N. Lisi, C. Mungiguerra, S. Scaccia, E. Serra, A.C. Violante, F. Zaza

Dicembre 2019

## Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 – Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 3 - Sviluppo di tecniche e soluzioni impiantistiche per l'efficientamento di processi industriali ad alta e bassa temperatura

Linea di attività: LA 3.8 - Confronto delle tecnologie proposte con lo stato dell'arte

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti

Responsabile del Work package: Miriam Benedetti

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 APPROCCIO METODOLOGICO.....	5
2.2 PROCESSI DI DECARBONIZZAZIONE/CASI STUDIO.....	9
3 CONCLUSIONI.....	12
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	12

## Sommario

La decarbonizzazione dei settori industriali rappresenta un obiettivo prioritario delle politiche energetiche europee. In quest'ottica, lo sviluppo di sistemi per la cattura, stoccaggio e riutilizzo della CO<sub>2</sub> (*Carbon Capture and Storage, CCS*, o *Carbon Capture and Use, CCU*) in impianti ad alte emissioni di carbonio si configura come tra le soluzioni tecnologiche più promettenti. Il progetto SFERO (Sistemi per la Flessibilità Energetica attraverso il Riutilizzo del carbonio) si propone di esaminare, definire e ottimizzare diversi sistemi basati su **Calcium Looping (CaL)** per la decarbonizzazione dell'industria di processo. In particolare verranno presi in esame come caso studio la cattura della CO<sub>2</sub> dai fumi di combustione emessi dalle industrie siderurgica e del cemento, tra le più impattanti a livello europeo e nazionale in termini di consumi energetici e di emissioni climalteranti. Il presente lavoro riporta la descrizione della metodologia che verrà utilizzata al fine di valutare le prestazioni ambientali, economiche e sociali delle tecnologie sviluppate al fine di identificare, in modo quantitativo, vantaggi e svantaggi dei diversi *pathways* di processo e poterli comparare con tecnologie alternative o a quelle più convenzionali che forniscono la stessa funzione.

L'approccio metodologico prevede di investigare tutti i tre principali punti di vista della sostenibilità (approccio di eco-design): **analisi ambientale Life Cycle Assessment (E-LCA); analisi economica (LCC); l'analisi degli aspetti sociali e socio economici - Social Life Cycle Assessment (S-LCA).**

I risultati permetteranno di contribuire a definire possibili azioni di intervento, finalizzate all'ottimizzazione delle prestazioni delle tecnologie SFERO, per aumentarne la competitività economica, ridurre gli impatti ambientali, e nel contempo ridurre le opposizioni locali alla realizzazione degli impianti.

## 1 Introduzione

La decarbonizzazione dei processi industriali rappresenta un aspetto chiave nell'ottica di raggiungere gli obiettivi ambiziosi più generali che ha fissato l'Unione Europea per la lotta ai cambiamenti climatici, la promozione dell'uso efficiente delle risorse e il rafforzamento della sicurezza energetica e della competitività economica. A livello europeo, l'industria determina circa un quarto delle emissioni climalteranti e del consumo energetico e serve, dalle fondamenta, diverse filiere produttive, contribuendo al 15% del PIL. Nello specifico, le industrie siderurgica e del cemento, tra le più impattanti a livello europeo in termini di consumi energetici e di emissioni climalteranti, sono di particolare rilievo per l'Italia, che si posiziona quale secondo produttore europeo di acciaio e cemento dopo la Germania.

La presente attività è volta alla definizione delle metodologie di analisi e raccolta dati per lo studio modellistico di processi di decarbonizzazione, da integrare in questi due settori industriali (cemento e acciaio) ad alte emissioni di carbonio. L'obiettivo è quello di studiare processi innovativi che siano in grado di poter stoccare eccessi di energia e materia (e.g. CO<sub>2</sub>, scorie) per una loro successiva valorizzazione, al fine di definire i parametri di ottimizzazione dei consumi energetici e le configurazioni più vantaggiose che garantiscano una riduzione delle emissioni climalteranti.

Nel contesto della transizione energetica in atto, l'UE riconosce un elevato potenziale allo sviluppo di nuove tecnologie di cattura a valorizzazione della CO<sub>2</sub> (CCS/CCU) favorendone la ricerca ed il trasferimento tecnologico identificando le tecnologie e le soluzioni che offriranno i maggiori benefici, in modo da poterle poi inserire in opportune politiche europee di sviluppo [1,2].

In quest'ottica, particolare attenzione viene posta al consolidamento e all'armonizzazione di strumenti finalizzati all'analisi degli impatti ambientali, economici e sociali. Per l'ulteriore sviluppo delle tecnologie CCS/CCU, oltre alla valutazione delle prestazioni di carattere ambientale ed economico, sono infatti determinanti anche le implicazioni sociali: in molti casi un prodotto/servizio/tecnologia assume un valore maggiore rispetto ai *competitors* grazie all'attenzione agli aspetti socio economici del territorio di produzione, alle comunità locali, ai lavoratori, ecc. che possono influenzare, ed in particolare ostacolare (vedi sindrome NIMBY), in modo determinante, il grado di sostegno politico. Risulta pertanto strategico applicare strumenti metodologici per quantificare questa qualità, in modo da restituire un quadro sintetico, d'insieme e quanto più possibile oggettivo che possa fornire indicazioni circa il posizionamento di una tecnologia rispetto alle altre esaminate.

Di particolare interesse risulta pertanto la misura quantitativa di tutti questi aspetti, in modo da evidenziare vantaggi e svantaggi di ciascuna tecnologia CCS/CCU rispetto a tecnologie alternative o a quelle convenzionali; riducendo così il rischio associato agli investimenti, e allo stesso tempo rafforzando la sicurezza e la lungimiranza della pianificazione industriale.

**Con questa finalità, la metodologia proposta prevede tre linee di attività che corrispondono ai tre pilastri della sostenibilità: l'analisi ambientale Life Cycle Assessment (E-LCA); analisi economica (LCC); l'analisi degli aspetti sociali e socio economici - Social Life Cycle Assessment (S-LCA).**

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Approccio metodologico

**L'analisi ambientale** - Life Cycle Assessment (LCA) - viene definita come un metodo scientifico, strutturato e standardizzato secondo quanto dettato dalle linee guida internazionali definite dalle norme ISO 14040 e 14044. L'approccio LCA si pone come obiettivo quello di analizzare, in modo quantitativo, gli impatti ambientali di prodotti, servizi e tecnologie, considerando tutte le fasi del ciclo di vita (estrazione delle materie prime, produzione, uso, distribuzione e fine vita). L'analisi della totalità delle fasi del ciclo di vita è uno dei principi fondanti dell'LCA che mira ad evitare lo spostamento degli impatti ambientali da una fase all'altra, piuttosto che la loro riduzione. LCA è ritenuto uno strumento chiave per perseguire una produzione sostenibile e modelli di consumo che sono sempre più integrati nel processo decisionale, o nelle fasi di progettazione delle strategie politiche e valutazione dei relativi impatti, oppure direttamente nei

documenti legislativi [3]. Un ruolo chiave viene anche riconosciuto per la valutazione delle tecnologie energetiche e nello specifico in quelle CCU/CCS per la valorizzazione e stoccaggio della CO<sub>2</sub> nei processi industriali [1].

Le norme standard ISO 14040 (ISO 2006a, b) disciplinano i principi e le linee guida per effettuare uno studio LCA che comprende quattro fasi fondamentali: (1) definizione degli obiettivi e dello scopo, (2) analisi di inventario, (3) analisi degli impatti ed (4) interpretazione dei risultati.

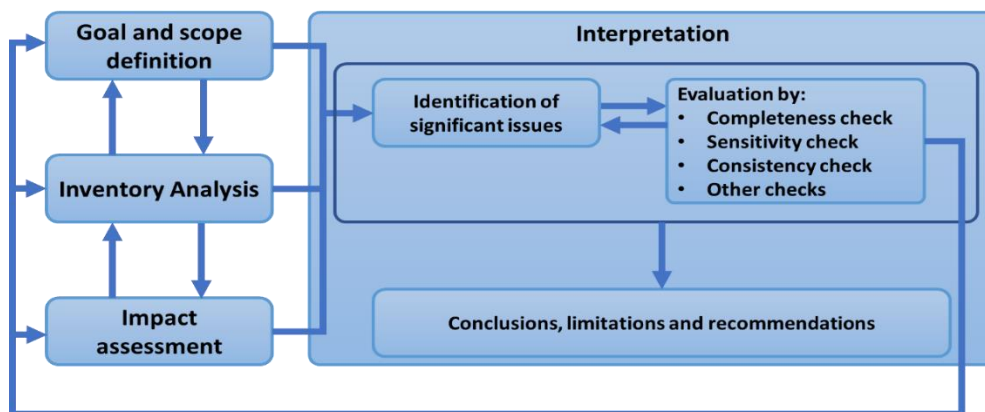


Figura 1 - Fasi dell'analisi del ciclo di vita [4].

Le prime tre fasi sono strettamente interconnesse e si pongono l'obiettivo di valutare in modo quantitativo il potenziale impatto che il sistema analizzato esercita sull'ambiente, o più precisamente sui comparti ambientali d'interesse, denominati "Areas Of Protection (AOPs)" (Salute pubblica, Ecosistemi, e risorse naturali), in relazione alle peculiarità del sistema analizzato e alle motivazioni e domande a cui lo studio si prefigge di rispondere. Tale operazione avviene associando i risultati dell'analisi di inventario (dati validati del consumo di risorse e delle emissioni) a specifiche categorie di impatto significative per le AOPs, quali, e.g. cambiamento climatico, eutrofizzazione, qualità dell'aria, acidificazione, effetti sulla salute, ecotossicità nelle acque, consumo di risorse, occupazione di suolo. L'inclusione di tutte le categorie di impatto ambientale significative per la specifica tecnologia analizzata, un ulteriore principio fondante della metodologia LCA, garantisce una visione olistica degli impatti che permette di identificare strategie cosiddette *win-win*, evitando di ridurre gli impatti in una categoria ambientale aumentandoli in un'altra ( per es. ridurre le emissioni di sostanze climalteranti ed aumentare le emissioni di microinquinanti con effetto dannoso sulla salute pubblica).

La quarta fase rappresenta il passaggio chiave in cui l'intero studio LCA viene esaminato per quella che è la sua capacità di soddisfare la domanda posta nella fase di definizione degli obiettivi e del contesto applicativo, dando così qualità e significato al lavoro svolto. Secondo la norma ISO 14044 (ISO 2006b), la fase d'interpretazione dovrebbe fornire infatti risultati coerenti con gli obiettivi e l'ambito di applicazione, che siano in grado di chiarire le limitazioni dello studio, di trarre le conclusioni e di fornire le opportune raccomandazioni [4]. Nell'ambito di SFERO, l'analisi LCA verrà effettuata rispettando questi principi, in accordo con le linee guida ISO 14040 e 14044, utilizzando il software GaBi 6.3 - PE International (Gabi Professional Database, Thinkstep, www.thinkstep.com, 2015).

L'unità funzionale su cui verrà dimensionata l'analisi sarà definita in relazione alla funzione principale del processo. Per i processi destinati alla sola cattura di CO<sub>2</sub>, sarà il kg di CO<sub>2</sub> catturata, mentre nei processi che producono un combustibile, l'analisi verrà effettuata anche in termini di energia di combustibile prodotto.

Lo scopo geografico di questo studio è quello del territorio italiano, mentre l'orizzonte temporale è definito come l'aspettativa di vita degli impianti, che corrisponde tipicamente a 20 anni.

Le categorie di impatto analizzate includeranno sicuramente il cambiamento climatico, le emissioni di particolato (PM<sub>2,5</sub>), sostanze acidificanti, precursori dell'ozono troposferico (*summer smog*), ed il consumo di risorse minerarie e fossili. Altre categorie di impatto ambientale verranno analizzate solo se ritenute

rilevanti (eutrofizzazione marina e di corsi d'acqua, composti dannosi per l'ozono stratosferico, consumo d'acqua, suolo, biodiversità, emissione di radionuclidi).

I metodi utilizzati per valutare gli impatti ambientali saranno scelti in accordo con le raccomandazioni Europee per il calcolo dell'impronta ambientale di prodotto (PEF).

**L'analisi economica (LCC)** dei sistemi in esame viene effettuata prendendo in considerazione alcuni indicatori chiave che permettono un confronto delle prestazioni e la comprensione dell'attrazione finanziaria delle tecnologie proposte. La cronologia e l'intensità di un investimento viene rappresentata su un *cash flow diagram* (CFD); sull'asse x viene rappresentato il tempo e sull'asse y l'intensità. Di solito viene rappresentato un CFD cumulativo in cui l'intensità dell'anno  $j$  viene sommata alle intensità degli anni precedenti  $j - 1$ . Per confrontare investimenti che hanno luogo in corrispondenza di periodi temporali diversi, è necessario tener conto del valore del denaro nel tempo. Ciascun flusso di cassa deve essere traslato all'indietro sino al medesimo periodo temporale (solitamente al tempo zero) per far sì che siano confrontabili tra di loro. Il cash flow traslato viene detto scontato o attualizzato e viene calcolato nel seguente modo:

$$dCF = \frac{CF}{(1 + i)^j}$$

dove  $dCF$  è il *discounted cash flow*,  $CF$  è il *cash flow* dell'anno  $j$ -esimo ed  $i$  è il tasso di interesse scelto. Un 5% di tasso di sconto viene utilizzato come indicato dalla Commissione Europea per la valutazione dei progetti [5]. Per stimare quanto un investimento può essere redditivo sono disponibili diversi criteri: di liquidità, temporale e del tasso di interesse. Il criterio di liquidità è legato al valore del *net present value* (NPV), cioè la situazione del *cash flow* cumulativo e scontato alla fine del progetto, per esempio alla fine della vita utile dell'impianto su cui si è investito. Il NPV è calcolato con la seguente equazione:

$$NPV = \sum_{j=1}^n dCF - I_0$$

dove  $I_0$  è l'investimento iniziale ed  $n$  è la vita utile dell'impianto. Si definisce *annuity factor* (AF), la seguente sommatoria:

$$AF = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1 + i)^j}$$

Il criterio temporale è legato alla determinazione del *payback period* (PBP), ovvero il tempo richiesto per recuperare l'investimento iniziale. Nel CFD cumulativo è l'anno in cui il  $dCF$  è zero. Il criterio del tasso di interesse è legato al calcolo del *rate of return on investment* (ROROI) o *internal rate of return* (IRR), cioè il tasso di interesse per cui il NPV del progetto è pari a zero. Un ulteriore criterio di redditività è rappresentato dal ritorno di investimento, calcolato dividendo il CF annuale per l'investimento iniziale.

La raccolta dei dati per l'analisi ambientale ed economica viene condotta scomponendo il processo e valutando tutte le componenti in relazione all'unità del sistema analizzato (e.g. kWh di energia prodotta, kg di CO<sub>2</sub> stoccata) e all'orizzonte temporale di riferimento, tipicamente di 10 o 20 anni. Figura 2 ne riporta uno schema esemplificativo. La tipologia dei dati principali richiesti da un'analisi LCA/LCC che verranno raccolti nella seconda annualità del progetto è riportata in Tabella 1.

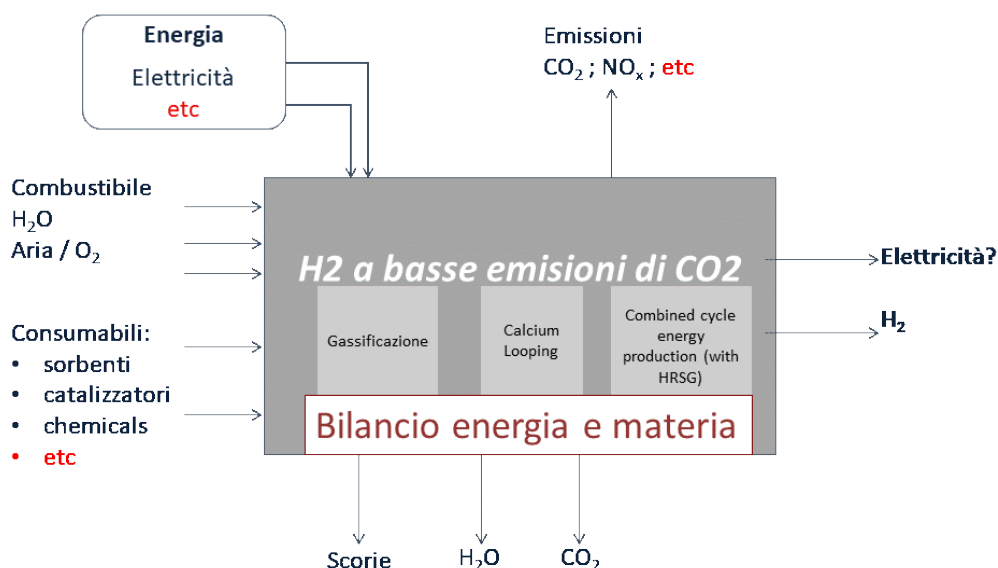


Figura 2 - Dati richiesti per LCA/LCC: esempio di decarbonizzazione di un impianto industriale.

Tabella 1 - Schema esemplificativo dei dati di input necessari per l'analisi ambientale ed economica.

ENERGIA	
INPUT	OUTPUT
...	...

Materiali	
INPUT (inclusi ausiliari replacement e manutenzione)	OUTPUT (incluse emissioni)
....	...

COSTI	
CAPEX (investimento iniziale)	OPEX (costi operativi)
...	...

Tossicità
Eventuali impatti sulla salute e l'ambiente

Sebbene in continuo sviluppo e lungi dall'essere applicata in tutti i casi in modo coerente e consistente, l'analisi LCA affiancata a quella economica può essere considerato un metodo consolidato e standardizzato. Viceversa, l'analisi sociale e socioeconomica S-LCA non ha ancora raggiunto la sua completa definizione e maturazione, nel campo scientifico deve ancora affrontare una serie di sfide metodologiche. In particolare in relazione alla disponibilità di dati, alle metodologie di calcolo degli impatti e alla definizione degli indicatori, compreso l'adattamento del metodo scelto ai risultati dell'LCA (e.g. collegamento con unità funzionale del sistema utilizzato).

L'analisi dei diversi aspetti socio economici verrà condotta in accordo con lo stato dell'arte dei diversi tentativi di armonizzazione e standardizzazione dei diversi frameworks di analisi [6,7]. Figura 3 riporta gli steps principali che verranno valutati ed eventualmente adottati e riadattati in relazione ai sistemi e alle tecnologie prese in esame.

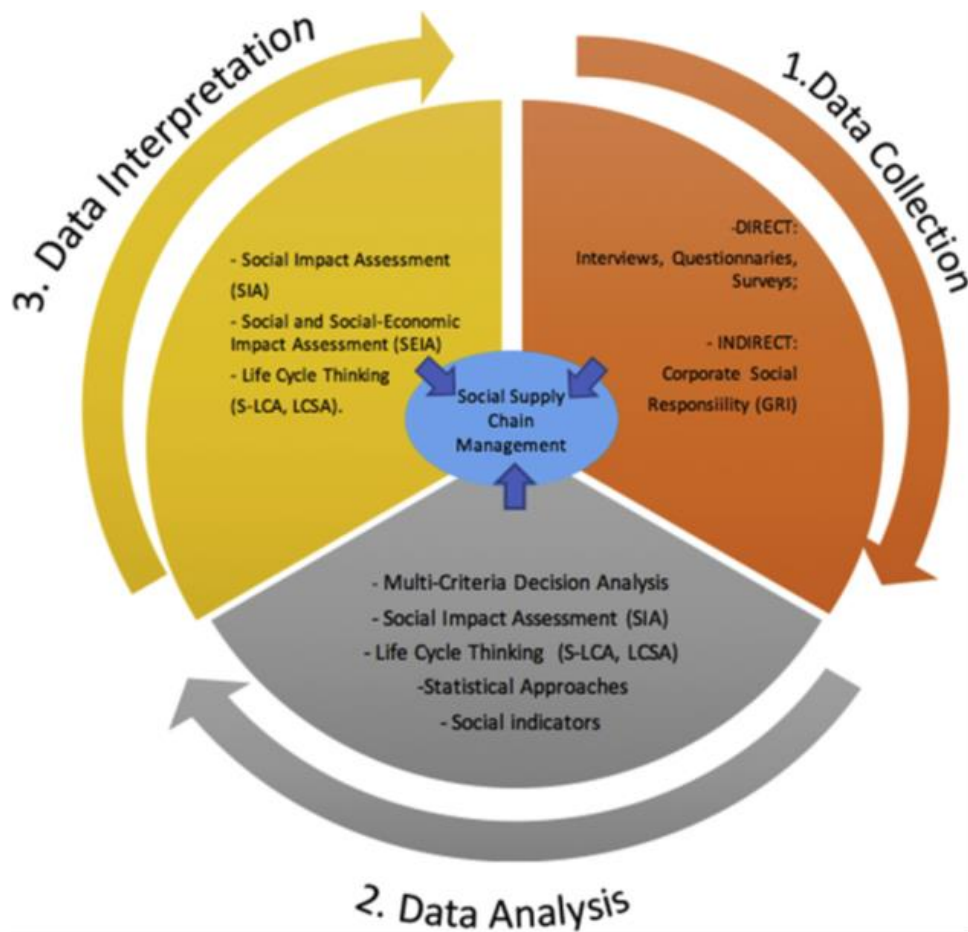
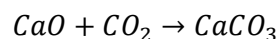


Figura 3 – Framework dei metodi e strumenti per il supporto alla valutazione degli aspetti sociali [da 6].

## 2.2 Processi di decarbonizzazione/casi studio

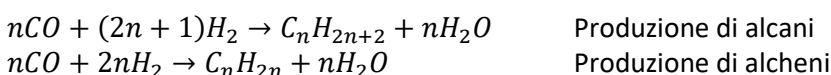
Nel progetto SFERO si propone **il processo Calcium Looping (CaL)** per la decarbonizzazione dei fumi di combustione emessi da un'industria di processo (e.g. cemento, acciaio), come mostrato in Figura 4. Il CaL è un processo chimico che permette di separare l'anidride carbonica all'interno di una miscela di gas, solitamente prodotti di combustione, utilizzando due reattori generalmente a letto fluido integrati in un unico circuito DBFB (*Dual Bubbling Fluidized Beds*), uno operante a 600-700°C in cui avviene la cattura della CO<sub>2</sub> (carbonatore), l'altro a temperature comprese tra 850-950°C dedicato alla rigenerazione del sorbente (calcinatore).

Nel carbonatore viene utilizzato come sorbente il calcare calcinato (CaO), in fase granulare così da massimizzare la superficie di contatto con i gas, per catturare la CO<sub>2</sub> tramite la reazione chimica che porta alla formazione del carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>) come mostrato dalla seguente reazione



Come risultato viene prodotto un gas povero di CO<sub>2</sub> che può essere rilasciato in atmosfera. Il carbonato formato viene mandato al rigeneratore in cui avviene la reazione inversa che porta alla decomposizione del CaCO<sub>3</sub> in CaO e CO<sub>2</sub> a temperature intorno a 900°C. Per riscaldare il sorbente esausto (CaCO<sub>3</sub>) fino alla temperatura di rigenerazione viene richiesta una certa quantità di energia (E) come mostrato in Figura 4.

La produzione di idrocarburi avviene attraverso un processo Fischer-Tropsch (FT) secondo le reazioni qui di seguito riportate:



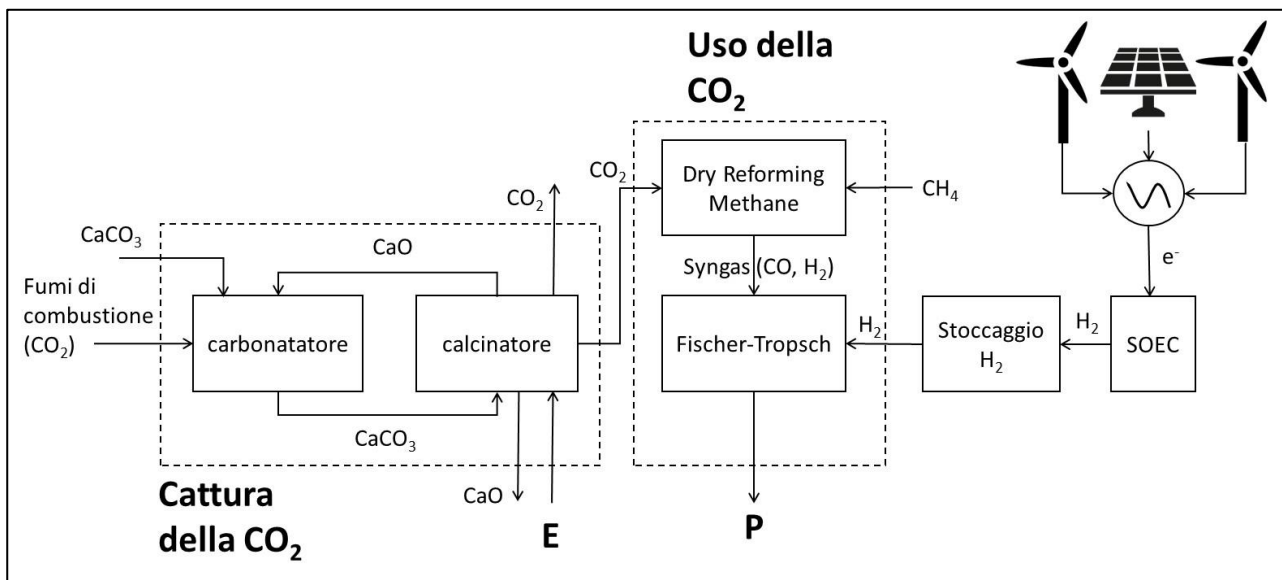
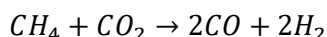


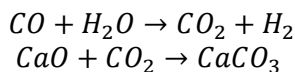
Figura 4 - Impianto di cattura e uso del carbonio (CCU) basato su un processo di elettrolisi.

In particolare, la Figura 4 mostra un impianto CCU in cui il monossido di carbonio che alimenta un'unità Fischer-Tropsch (FT) viene prodotto da un processo di reforming a secco del metano (*Dry Reforming Methane*, DRM). Nel processo DRM il CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> reagiscono secondo la reazione:



In questo *pathway* si ottiene un syngas composto da CO e H<sub>2</sub> secondo un rapporto CO/H<sub>2</sub>=1. Per avere un rapporto H<sub>2</sub>/CO per la produzione di alcani e alcheni attraverso processo FT (vedi sopra) il syngas prodotto da DRM deve essere arricchito di H<sub>2</sub> prodotto da fonte rinnovabile.

Un'alternativa a questo *pathway* è lo schema riportato in Figura 5. In questo *pathway* l'energia elettrica da fonte rinnovabile viene utilizzata direttamente nella rottura dei legami chimici della CO<sub>2</sub>, per la produzione di O<sub>2</sub> e CO, attraverso l'azione di un plasma (processo di plasmolisi della CO<sub>2</sub>). L'ossigeno prodotto viene separato attraverso una membrana a base di perovskiti mentre il CO viene avviato ad un reattore di sorption enhanced water gas shift (SE-WGS) in cui (i) parte del CO viene convertito in H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>; l'anidride carbonica viene catturata e concentrata attraverso CaL (non mostrato in Figura 5). Le reazioni principali che avvengono simultaneamente sono riportate di seguito:



Il syngas (CO e H<sub>2</sub>), così prodotto, con il giusto rapporto H<sub>2</sub>/CO viene, quindi, avviato all'unità FT per la produzione di idrocarburi.

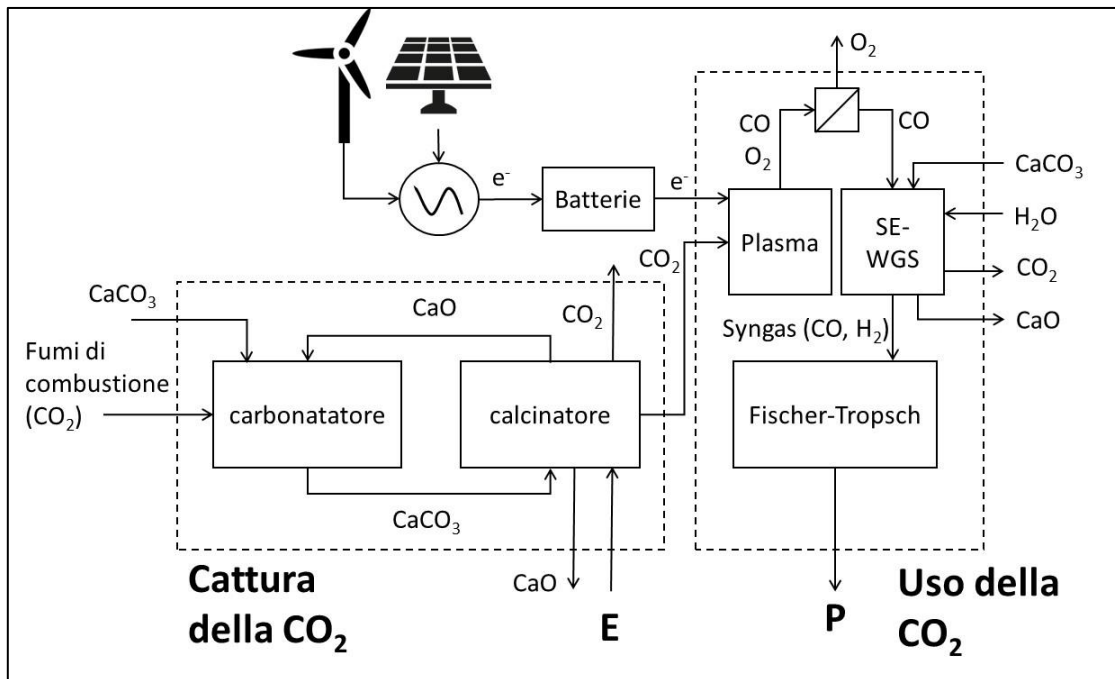


Figura 5 - Impianto di cattura e uso del carbonio (CCU) basato su un processo di plasmolisi.

Al fine di ottenere un ciclo chiuso del carbonio si propone un terzo *pathway*: l'impianto CCU viene integrato ad una sezione di rimozione della CO<sub>2</sub> dall'aria.

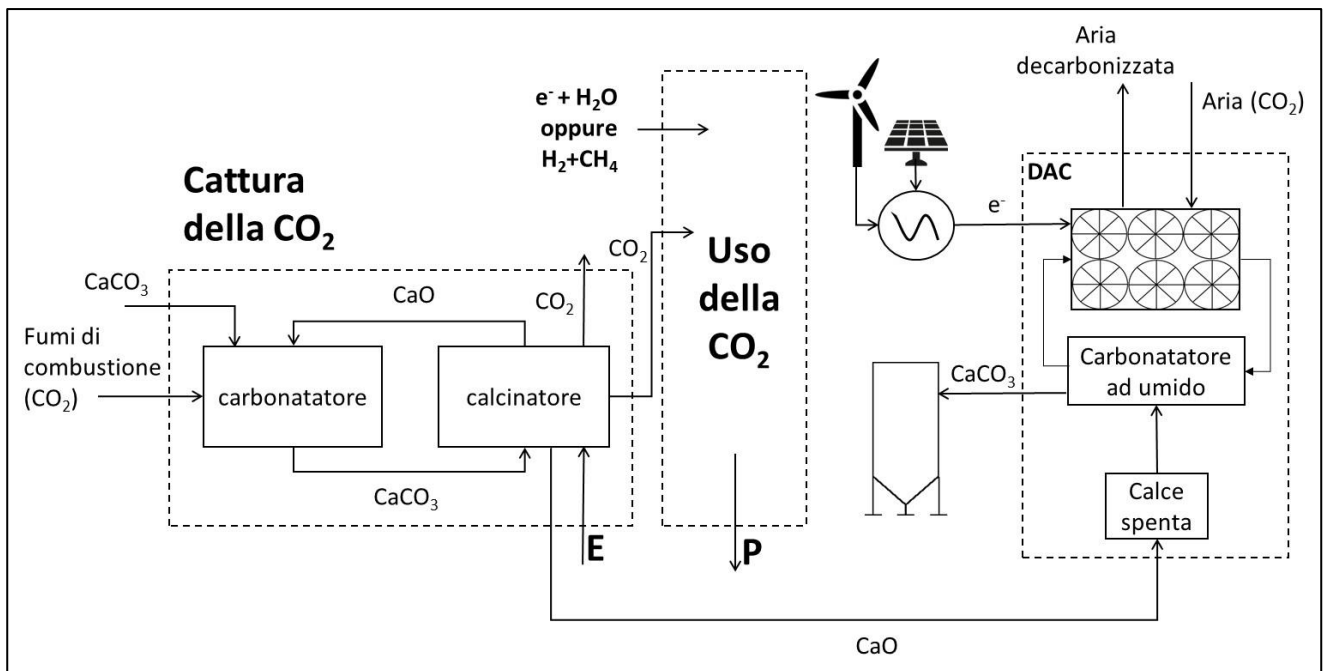


Figura 6 - Impianto di cattura e uso del carbonio (CCU) basato su elettrolisi o plasmolisi integrato ad un processo di rimozione della CO<sub>2</sub> dall'aria.

In Figura 6 è riportato genericamente l'impianto CCU basato su DRM ed elettrolisi (CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>) oppure plasmolisi e SE-WGS (e<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>O). Questo viene integrato ad un'unità di rimozione della CO<sub>2</sub> dall'aria (DAC; *Direct Air Capture*) attraverso una soluzione alcalina a base di potassio o sodio. La cattura della CO<sub>2</sub> attraverso sorbenti in soluzione acquosa offre il vantaggio che il carbonatore ad umido può essere costruito secondo una tecnologia basata sulle torri di raffreddamento. Gli svantaggi dei sistemi acquosi comprendono il costo e complessità del sistema di rigenerazione e perdita di acqua in ambienti asciutti.

I *pathways* delineati in Figura 4 e Figura 5 sono relativi alla produzione di idrocarburi: lo schema di processo potrebbe essere esteso anche alla produzione di metanolo cambiando opportunamente le condizioni operative ed il rapporto CO/H<sub>2</sub>.

### 3 Conclusioni

La metodologia che verrà utilizzata al fine di valutare le prestazioni ambientali, economiche e sociali di tecnologie CCU/CCS, permetterà di analizzare, con gli strumenti più comprensivi e aggiornati, la sostenibilità sociale, ambientale ed economica delle tecnologie di SFERO confrontandole con tecnologie alternative che forniscono la stessa funzione. Inoltre lo studio contribuirà a definire possibili azioni di intervento finalizzate al miglioramento delle prestazioni delle tecnologie SFERO sotto tutti i punti di vista della sostenibilità (approccio di eco-design), con una visione olistica, al fine di aumentarne la competitività economica, ridurre gli impatti ambientali, e nel contempo ridurre le opposizioni locali alla potenziale realizzazione degli impianti.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. Bardow, A. & Green, D. "Low-Carbon Process Industries Through Energy Efficiency and Carbon Dioxide Utilisation". (2017). doi:10.2777/175882.
2. Von Der Assen, N., Voll, P., Peters, M. & Bardow, A. "Life cycle assessment of CO<sub>2</sub> capture and utilization: A tutorial review". *Chem. Soc. Rev.* **43**, 7982–7994 (2014).
3. Cristóbal, J. "Life cycle assessment for the impact assessment of policies Environmental impact of different areas of EU consumption: food, mobility, housing, household goods View project Environmental Footprint Pilot-survey for weighting environmental impact categories". (2016). doi:10.2788/318544.
4. Agostini, A., Giuntoli, J., Marelli, L. & Amaducci, S. "Flaws in the interpretation phase of bioenergy LCA fuel the debate and mislead policymakers". *Int. J. Life Cycle Assess.* (2019) doi:10.1007/s11367-019-01654-2.
5. Agostini, A. *et al.* "Economics of GHG emissions mitigation via biogas production from Sorghum, maize and dairy farm manure digestion in the Po valley". *Biomass and Bioenergy* **89**, 58–66 (2015).
6. D'Eusanio, M., Zamagni, A. & Petti, L. "Social sustainability and supply chain management: Methods and tools". *J. Clean. Prod.* **235**, 178–189 (2019).
7. Sala, S., Vasta, A., Mancini, L., Dewulf, J. & Rosenbaum, E. "Social life cycle assessment : state of the art and challenges for product policy support". (2015).