



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

## *Carbon footprint* di processi per la cattura della CO<sub>2</sub> in settori *hard-to-abate*: applicazione ad acciaierie e cementifici

Claudio Carbone, Alessandro Agostini, Stefano Stendardo

Report RdS/PTR2020/085

CARBON FOOTPRINT DI PROCESSI PER LA CATTURA DELLA CO<sub>2</sub> IN SETTORI HARD-TO-ABATE: APPLICAZIONE AD ACCIAIERIE E CEMENTIFICI

Claudio Carbone, Alessandro Agostini, Stefano Stendardo  
(ENEA)

Con il contributo di: S. Cassani, R. Chierchia, N. Lisi, I. Luisetto  
(ENEA)

Aprile 2021

## Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II 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: LA3.29 - Carbon footprint di processi per la cattura della CO<sub>2</sub> in processi industriali hard-to-abate (e.g. acciaierie e cementifici)

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti

Responsabile del Work package (LA3.8-3.17, LA3.29): Stefano Stendardo

## Indice

|  |    |
|--|----|
| SOMMARIO ESECUTIVO.....  | 4  |
| 1 INTRODUZIONE.....  | 6  |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....                          | 6  |
| 2.1 APPROCCIO METODOLOGICO .....   | 6  |
| 2.2 DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI.....   | 7  |
| 2.3 PROCESSI DI DECARBONIZZAZIONE: CASI STUDIO E ANALISI DI INVENTARIO.....    | 8  |
| 2.3.1 <i>Cementificio</i> .....  | 8  |
| 2.3.2 <i>Acciaieria con altoforno tradizionale e fornace ad ossigeno</i> ..... | 17 |
| 2.3.3 <i>Acciaieria a riduzione diretta e processo ad arco elettrico</i> ..... | 27 |
| 2.4 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI (CARBON FOOTPRINT).....                          | 35 |
| 2.5 RISULTATI (CARBON FOOTPRINT) .....   | 36 |
| 2.5.1 <i>Cementificio</i> .....  | 36 |
| 2.5.2 <i>Acciaieria con altoforno tradizionale e fornace ad ossigeno</i> ..... | 38 |
| 2.5.3 <i>Acciaieria a riduzione diretta e processo ad arco elettrico</i> ..... | 40 |
| 3 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI.....   | 42 |
| 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....  | 43 |

## Sommario esecutivo

La decarbonizzazione dei settori industriali più impattanti e difficili da abbattere (*hard-to-abate*) in termini di emissioni climalteranti, 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. In questa linea di attività si propone di esaminare, definire e ottimizzare diversi sistemi basati sulla cattura della CO<sub>2</sub> mediante sorbenti a base di calcio, **Calcium Looping (CaL) process**, per la decarbonizzazione dell'industria di processo per la produzione di acciaio e cemento. Tali settori industriali sono tra i maggiori responsabili delle emissioni di CO<sub>2</sub> a livello globale e impattano ognuno per circa il 7% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub>. La scelta di decarbonizzare mediante processo CaL è stata dettata dalla natura del materiale impiegato in questo processo. Il CaL utilizza infatti, un materiale granulare a base di calcio che è ampiamente utilizzato nei due settori industriali di cui sopra. Un'altra peculiarità di tale processo è la possibilità di recuperare i cascami termici provenienti dalla rigenerazione del sorbente. In questo modo è possibile prevedere nei settori decarbonizzati l'installazione di un ciclo termodinamico convenzionale (e.g. ciclo Rankine) per il recupero di energia termica e, quindi, produzione in situ dell'energia elettrica. Tale opzione, ha consentito, in taluni di case di produrre più energia di quanto richiesta per il ciclo produttivo e quindi di esportarla in rete con impatti positivi nel bilancio delle emissioni.

In particolare tre linee di processo (una linea per la produzione del cemento e due linee di produzione per l'acciaio) tra quelle più utilizzate in un'ottica di sviluppo, sono state esaminate e modellate ipotizzando diverse configurazioni di integrazione del processo di CaL, per analizzare, in modo quantitativo e dettagliato, i flussi di materia ed energia in relazione alle diverse fasi del ciclo produttivo. In particolare nel caso della produzione dell'acciaio sono state prese in esame: (i) il ciclo integrale composto da un altoforno (*Blast Furnace, BF*) per la produzione di ferro fuso integrato ad una acciaieria ad ossigeno (*Basic Oxygen Furnace, BOF*); (ii) il ciclo produttivo per la produzione di preridotto o riduzione diretta (*Direct Iron Reduced, DRI*) con acciaieria elettrica ad arco (*Electric Arc Furnace, EAF*).

Nel caso del ciclo integrale BF-BOF sono state individuate oltre al caso case di riferimento (**S1 BF-BOF**) tre diverse configurazioni in cui il CaL è stato integrato queste sono:

- **S2 (BF+CaL)+BOF**: Rispetto a S1, si aggiunge l'unità CaL, dove vengono riciccolati i fumi provenienti da BF (BFG), per essere decarbonizzati invece di andare direttamente al *pre-heater*;
- **S3 (BF+BOF)+CaL**: Nel CaL sono riciccolati, oltre ai fumi BFG, anche i BOFG, provenienti dal BOF;
- **S4 (BF+BOF+HS)+CaL**: Infine in S4, si ipotizza di riciccolare nel CaL, anche i fumi in uscita dal *pre-heater*, e di utilizzare nel *pre-heater* i gas decarbonizzati fino ad annullare la richiesta di CH<sub>4</sub> esterno, così da ridurre il consumo di combustibile e le emissioni indirette di CO<sub>2</sub>.

Nel caso del ciclo DRI-EAF sono state individuate oltre al caso di riferimento (**SDR1**) due diverse configurazioni in cui il CaL è stato integrato:

- **SDR2**: Rispetto al caso di riferimento SDR1, è dotato di sistema CaL, alimentato a O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Per il trattamento dei fumi proveniente dal *pre-heater* richiede come materiale in ingresso carbonato di calcio (*limestone*) e permette il riutilizzo del sorbente spento esausto per il processo EAF;
- **SDR3**: in questo caso si ipotizza il ricircolo in CaL e trattamento dei gas di scarico provenienti anche da EAF (per massimizzare il processo di cattura della CO<sub>2</sub>). Si prevede anche il riuso dei sorbenti esausti come scoricante nell'EAF.

I sistemi SDR2 e SDR3, dotati di CaL, permettono il recupero del calore a cascata mediante ciclo di Rankine, portando a un ulteriore risparmio energetico nel bilancio complessivo della linea di processo.

Infine Per quanto riguarda la linea di processo per la produzione del cemento, la configurazione base (benchmark) è stata quella di una linea convenzionale in cui i minerali vengono avviati ad un processo di calcinazione in un forno a tamburo rotante (*rotary kiln*) per la produzione del componente principale del cemento (*clinker*) a cui segue un processo di miscelazione di altri additivi (e.g. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gesso) per la produzione finale del cemento.

Pel il ciclo produttivo del cemento sono state individuate oltre al caso di riferimento/benchmark (**C1 Conventional**) due diverse configurazioni in cui il CaL è stato integrato a due diversi livelli:

- *C2 tail-end*: il CaL consiste in un'unità a sé stante posta a valle della produzione del cemento per la decarbonizzazione dei fumi provenienti dal forno per la produzione del clinker;
- *C3 integrated*: il processo CaL viene totalmente integrato nel ciclo produttivo ed il carbonatore sostituisce il preriscaldatore del forno e cattura la CO<sub>2</sub> dai fumi provenienti solamente dal forno rotante, mentre il calcinatore del CaL, sostituisce il calcinatore del clinker. In questo caso, nei bilanci di materia ed energia, il sottosistema clinker comprende anche il CaL.

**L'unità di misura utilizzata per il confronto delle diverse alternative è la CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq)** che permette di misurare le emissioni di diversi gas climalteranti mediante l'uso di un unico parametro, il cosiddetto potenziale di riscaldamento globale (*Global Warming Potential, GWP*). Questa è la metrica adottata dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), che identifica le proprietà climalteranti di riscaldamento della CO<sub>2</sub> come quelle di riferimento definendo il suo GWP pari ad 1. Le altre componenti climalteranti vengono quindi convertite in CO<sub>2</sub> eq in funzione del loro impatto sul riscaldamento globale rispetto a quello della CO<sub>2</sub>. Sulla base dei risultati delle simulazioni, sono stati valutati gli impatti ambientali, in termini di *carbon footprint* (emissioni dirette e indirette di CO<sub>2</sub> eq), delle tre linee di processo prese in esame. Il presente lavoro riporta i risultati di questa studio, condotto sulla base di un'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) secondo un approccio di eco-design, al fine di identificare, in modo quantitativo, vantaggi e svantaggi dei diversi *pathways* di processo e confrontarli tra di loro in termini di abbattimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> eq. Per la produzione del cemento sono stati individuate i seguenti sottosistemi (*subsystems*) da cui sono attese emissioni climalteranti: (i) CO<sub>2</sub> CU (*CO<sub>2</sub> Compressor Unit*), (ii) ASU: *Air separation Unit*), (iii) CaL (sezione di cattura mediante sorbenti solidi a base di calcio); (iv) *Raw meal* (trattamento materiale solido); (v) *clinker production*; (vi) *cement production*; (vii) Rankine. Per la produzione dell'acciaio mediante ciclo integrale BF-BOF i *subsystems* individuati sono: (i) CO<sub>2</sub> CU; (ii) ASU; (iii) CaL; (iv) BF; (v) BOF; (vi) *Preheater*; (vii) Rankine. Nel caso di ciclo DRI ed EAF i *subsystems* sono invece: (i) EAF; (ii) CaL; (iii) *Shaft Furnace*; (iv) *Steam reformer con preheater*; (v) Rankine.

Da notare come l'introduzione del CaL in tutte le tre linee di processo esaminate, oltre a ridurre le emissioni climalteranti, permetta la valorizzazione dell'energia termica di processo per la produzione di energia elettrica dal ciclo Rankine che riduce i consumi di energia dell'impianto prelevata dalla rete, producendo, in alcuni casi, energia elettrica in eccesso che può essere esportata in rete (crediti di carbonio).

## 1 Introduzione

La decarbonizzazione dei processi industriali *hard-to abate* 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.

Nel contesto della transizione energetica in atto, l'UE favorisce la ricerca ed il trasferimento tecnologico di tecnologie e soluzioni con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza di processi industriali attraverso il recupero degli eccessi di energia e materia. Questa linea di attività prende in esame queste due principali industrie ad alto consumo di energia (acciaio, ferro e cemento).

Tali processi produttivi hanno già raggiunto livelli di efficienza, nell'uso delle risorse, molto elevati e si valuta come ulteriori opzioni tecnologiche disponibili per un uso più efficiente dell'energia, porterebbero a riduzioni della CO<sub>2</sub> non molto significativi. Di conseguenza, la necessità di una riduzione significativa delle emissioni richiede l'implementazione di tecnologie per la cattura, uso e stoccaggio del carbonio (*Carbon Capture, Use and Storage*, CCUS), che permettono di rendere sostenibile l'utilizzo di combustibili convenzionali e ridurre il contributo all'emissione di gas serra (e.g. CO<sub>2</sub>)<sup>1,2</sup>.

Convenzionalmente la cattura della CO<sub>2</sub> avviene mediante solventi liquidi in cui l'anidride carbonica nella corrente gassosa da decarbonizzare viene trasferita selettivamente ad una fase liquida grazie all'assorbimento in uno specifico solvente (e.g. ammine). Quest'ultimo può poi essere rigenerato tramite energia termica contenuta da una corrente di vapore, rilasciando una corrente di CO<sub>2</sub> altamente concentrata. L'assorbimento può essere sia di tipo fisico - basato sulla differente solubilità dei gas nel solvente e sulla loro pressione parziale - che di tipo chimico, in cui la reazione del gas con il solvente permette di raggiungere performance elevate anche a basse pressioni. Il principale svantaggio di questo processo è la degradazione del solvente. Nel caso dell'assorbimento con ammine si ha un problema di degradazione del solvente (che ha comunque un costo elevato) qualora venga in contatto con O<sub>2</sub> o composti solforati. Inoltre la presenza di polveri nei gas da decarbonizzare potrebbe causare un aumento di viscosità del solvente aumentando l'energia per la sua movimentazione e nei peggiori dei casi all'occlusione degli ugelli per l'iniezione del solvente.

In quest'ottica, particolare attenzione viene posta alla cattura della CO<sub>2</sub> mediante sorbenti a base di calcio<sup>3,4,5</sup> (*Calcium Looping*, CaL) che si presta bene, in virtù del materiale utilizzato, ad essere integrato nel ciclo produttivo di acciaio e cemento. Inoltre questo processo fa uso di un materiale povero che non si avvelena nel caso di presenza di altro materiale particolato trascinato dai processi produttivi di cui sopra. Inoltre una volta esaurita la propria capacità sorbente, il materiale esausto può essere inviato al ciclo dell'acciaio e del cemento. In questo lavoro vengono presentati i risultati dell'analisi ambientale effettuata per valutare i benefici, in termini di emissioni climalteranti (carbon footprint), associati all'implementazione del CaL in linee produttive convenzionali di acciaierie e cementifici.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Approccio metodologico

**L'analisi ambientale** - Life Cycle Assessment (LCA) - è stata svolta in modo strutturato e standardizzato secondo quanto dettato dalle linee guida internazionali definite dalle norme ISO 14040 e 14044<sup>6</sup>, utilizzando il software GaBi TS 10 – PE International (GaBi Professional Database, Thinkstep, <https://sphaera.com/> 2021). 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 (infrastrutture impiegate, estrazione e trasporto 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<sup>7</sup>. 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<sup>8</sup>.

Le norme standard ISO 14040 - 14044 (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.

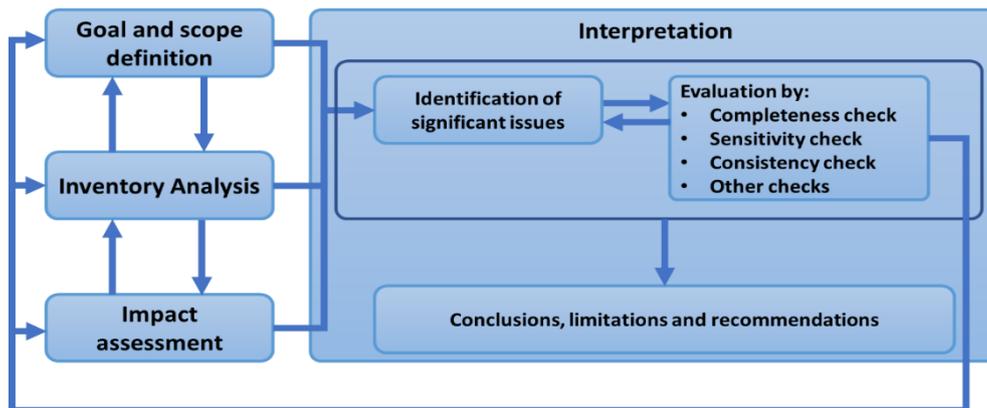


Figura 1 - Fasi dell'analisi del ciclo di vita <sup>[9]</sup>.

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.

In questo progetto è stato dato particolare risalto alla categoria di impatto ambientale cambiamento climatico (carbon footprint). Le valutazioni dei sistemi analizzati sono state fornite attraverso un processo di integrazione e ottimizzazione che tiene conto dei risultati di impatto ambientale, valutando i contributi dei vari *subsystem*. 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<sup>9</sup>. 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).

## 2.2 Definizione degli obiettivi

L'obiettivo generale di questo studio è quello di identificare il *carbon footprint* associato all'integrazione di processi per la cattura della CO<sub>2</sub> (tecnologie *Carbon, Capture and Storage* – CCS) in cementifici ed acciaierie. Col termine *carbon footprint* s'intendono le emissioni equivalenti di CO<sub>2</sub>, dirette e indirette, che hanno un impatto climalterante su una scala temporale medio-lunga. L'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) ha preso il CO<sub>2</sub> come unità di misura sull'impatto di riscaldamento globale (*Global Warming Potential, GWP*) ponendo il suo GWP pari ad 1. Gli altri gas climalteranti vengono quindi convertiti in CO<sub>2</sub>eq in funzione del loro impatto sul riscaldamento globale.

Nello specifico, l'analisi è orientata alla quantificazione dell'impatto ambientale del sistema tradizionale e di quelli integrati con il processo di *Calcium Looping* (CaL) per il trattamento dei fumi da combustione, e con sistemi di recupero dell'energia termica mediante ciclo di Rankine. Tre diverse tipologie di impianto sono presi in esame: un cementificio; un'acciaieria con altoforno (*Blast Furnace*) e fornace a ossigeno (*Basic Oxygen Furnace*); e un'acciaieria basata su processi di riduzione diretta con gas naturale (*Midrex*) e fornace ad arco elettrico (*Electric Arc Furnace*). L'unità funzionale su cui è stata dimensionata l'analisi è, per il cementificio, 1 kg di cemento prodotto, mentre, per le acciaierie, 1 t di acciaio liquido prodotto. Lo scopo geografico di questo studio è quello del territorio europeo, mentre l'orizzonte temporale è definito come l'aspettativa di vita degli impianti, che corrisponde tipicamente a 20 o 50 anni a seconda della tipologia, come specificato negli inventari.

### 2.3 Processi di decarbonizzazione: casi studio e analisi di inventario

L'analisi di inventario consiste nella costruzione, per ciascun sistema analizzato, di un dataset che contiene tutti i flussi di input e output di materia ed energia, durante l'intero ciclo di vita (*from cradle to grave*). La raccolta dei dati per l'analisi ambientale viene condotta scomponendo il processo nei diversi *subsystem* rilevanti e valutando tutte le componenti: processi, le materie prime, le infrastrutture, e la domanda di energia primaria, in relazione all'unità funzionale e all'orizzonte temporale di riferimento. I dati di inventario sono stati raccolti sulla base di simulazioni di processo<sup>10</sup> e, ad essi, sono stati accoppiati quelli più simili ai sistemi da modellare presenti nei database commerciali (Ecoinvent 7) o disponibili in letteratura.

#### 2.3.1 Cementificio

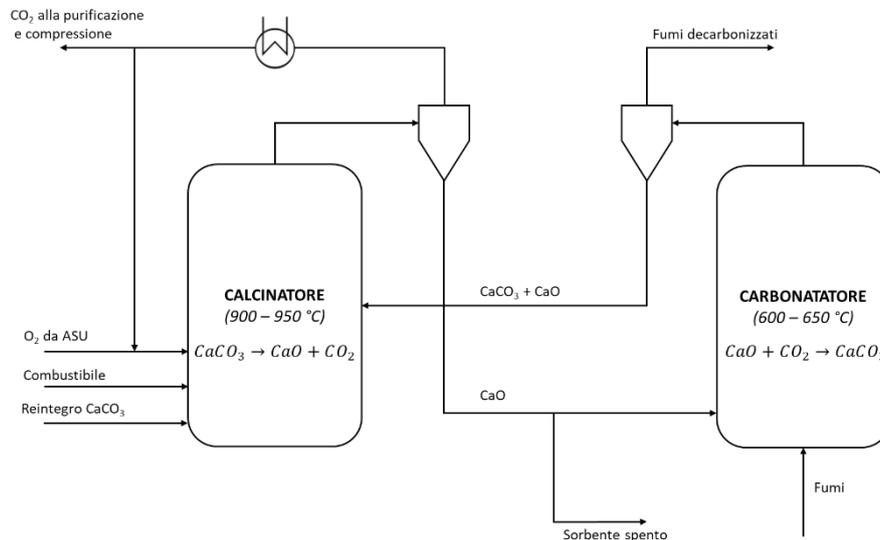
La produzione del cemento consiste in diversi processi che possono essere schematizzati in tre fasi principali:

- 1) *Raw meal*: una prima fase di preparazione dei materiali di base, denominati *raw meal* (materiali calcarei e argillosi addizionati con altri additivi);
- 2) Produzione del clinker: la preparazione dei *raw meal* è seguita da una fase di sinterizzazione e calcinazione in forni ad alta temperatura per la produzione di clinker, il costituente principale del cemento.
- 3) Produzione del cemento: Il clinker viene infine miscelato con ulteriori elementi in base al tipo di cemento da produrre.

La configurazione impiantistica ed emissiva di questo settore industriale si addice favorevolmente all'integrazione di tecnologie per la cattura della CO<sub>2</sub>, anche dette di *Carbon Capture – CC*<sup>11</sup>. Le tecnologie di CC che possono essere impiegate sono diverse, Il *Calcium Looping* (CaL) rappresenta una delle più promettenti che la comunità scientifica sta cercando di portare ad un maggiore grado di maturità tecnologica. 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).

Come esemplificato in Figura 2, 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 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 non inferiori 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). In questa fase viene richiesto combustibile per alimentare il processo. Altri studi<sup>12</sup> hanno evidenziato che l'utilizzo di combustibili alternativi al carbone (per es. NG, biomassa) non ha portato grossi benefici in termini di carbon footprint, pertanto in questo progetto si è scelto di alimentare anche il CaL con carbone, oltre che nelle fasi di combustione e calcinazione per la produzione di clinker che avvengono nel *rotary kiln*. L'elevato contenuto entalpico sia della CO<sub>2</sub> che dell'ossido di calcio rende favorevole un recupero del calore all'uscita del reattore di calcinazione. In questo modo è possibile

produrre vapore per la produzione di energia elettrica da utilizzare nel processo produttivo rendendo competitivo CaL. L'ossido di calcio che è il materiale sorbente utilizzato in processi CaL, è un minerale ampiamente utilizzato nei cementifici. Questo permette di sostituire in parte o interamente il materiale in ingresso al forno con il sorbente spento proveniente dal sistema di CaL.



**Figura 2 – Schema del CaL per cattura della CO<sub>2</sub> dai fumi.**

Al fine di valutare le performance ambientali dei sistemi di CaL integrati nei processi di produzione del cemento, sono stati modellati in Aspen Plus v.10.0<sup>10</sup> e analizzate tre diverse configurazioni:

**C1 conventional:** Come sistema di riferimento è stato scelto un cementificio convenzionale, conforme alle indicazioni sulle *Best Available Techniques* fornite dall' *European IPPC Bureau*, che si basano su un processo a secco composto da preriscaldatore a cicloni a 5 stadi, precalcinatore, forno rotante e refrigeratore a griglia<sup>13</sup>. Le capacità produttiva dell'impianto è di 2825 t di clinker al giorno, che è tipica per questa tipologia di impianti che prevedono generalmente una produzione annua di circa 1.000.000 t di clinker e 1.400.000 t di cemento<sup>13</sup>.

In Figura 3 si riporta uno schema semplificato del processo di produzione di clinker e come esso è stato modellato in GaBi per l'analisi LCA. A ciascun blocco di GaBi corrisponde un'unità di processo presa in esame per la determinazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> eq., sulla base dei dati di input (le categorie di input sono riportate a titolo esemplificativo in questo primo caso) e output dettagliati nell'analisi di inventario (Tabella 1) e dei fattori di caratterizzazione ad essi associati, definiti dal metodo applicato in GaBi, nel nostro caso IPCC AR5 GWP100. La materia prima in ingresso, consiste principalmente in *limestone* (CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), *clay* (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e *silica and iron sand* (SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), viene inizialmente macinato per formare "raw meal", ed essiccato dai fumi provenienti dal preriscaldatore. I fumi, dopo aver superato un filtro, vengono inviati al camino, mentre il *raw meal* viene inviato al preriscaldatore. Nel preriscaldatore il materiale solido viene riscaldato dai gas caldi provenienti dal calcinatore e dal forno rotante in più cicloni disposti in serie. Il *raw meal* riscaldato entra quindi nel calcinatore, mantenuto alla temperatura di circa 860 °C, dove avviene la conversione della maggior parte del carbonato di calcio in ossido di calcio (>95%). Il calore necessario per riscaldare il materiale e far avvenire la reazione endotermica di calcinazione è fornito dalla combustione di combustibile fossile (i.e. carbone). Il materiale calcinato entra quindi nel forno rotante dove, grazie alla combustione di altro combustibile, avviene la calcinazione del carbonato di calcio rimanente e le reazioni di formazione del clinker. Nel forno rotante il materiale solido raggiunge temperature di circa 1450°C, portando alla sinterizzazione e fusione del materiale (processo di clinkerizzazione), mentre la fase gassosa può raggiungere temperature di circa 2000°C. Il clinker così ottenuto viene infine raffreddato con aria ambiente

in un refrigeratore a griglia e poi combinato con ulteriore *limestone*, *gypsum* e additivi per la produzione del cemento.

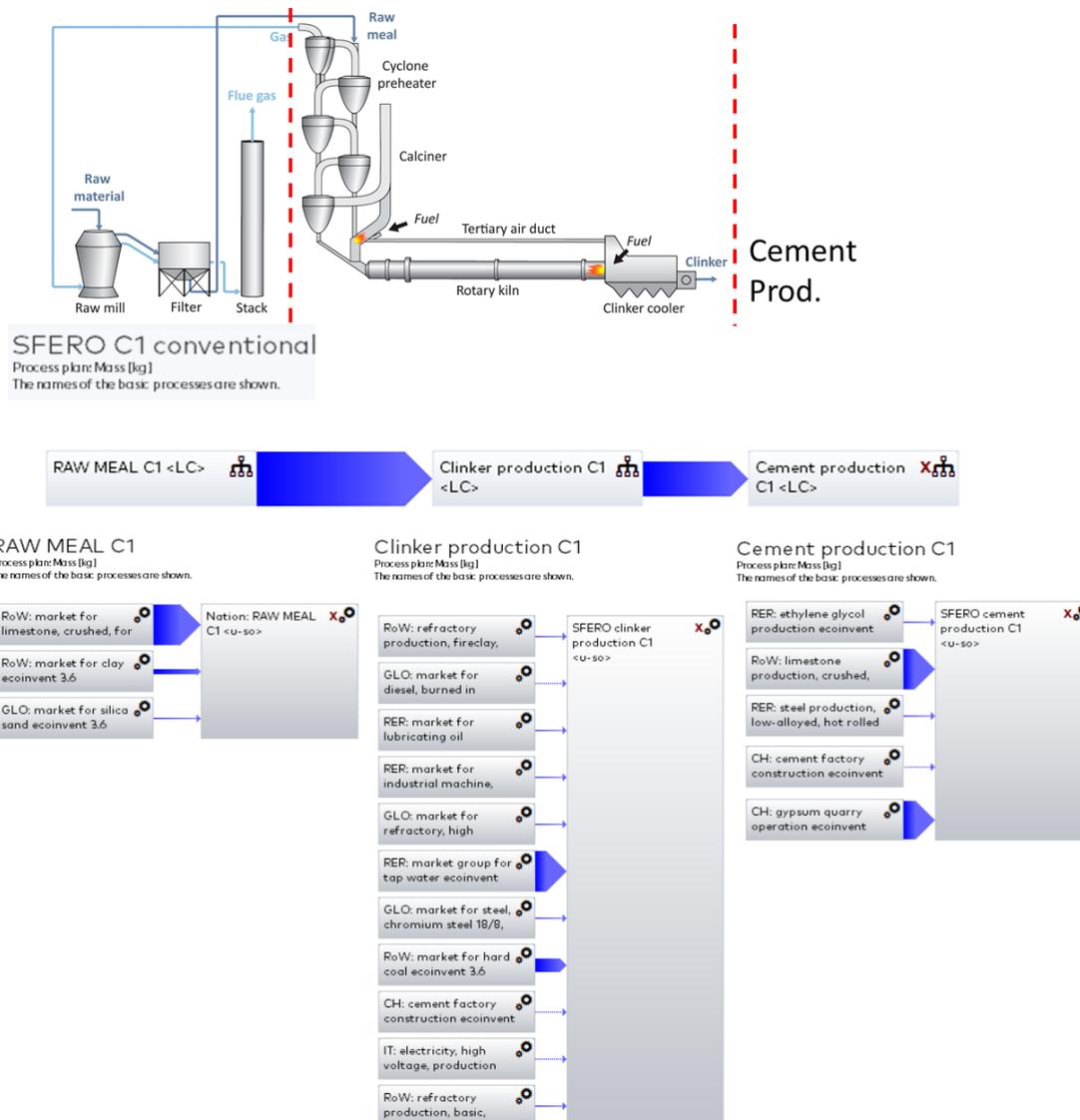


Figura 3 - Schema del sistema di riferimento di un cementificio convenzionale e corrispondente rappresentazione in GaBi.

In Tabella 1 viene riportata la sintesi dell'analisi di inventario e dei dati utilizzati. Con Aspen plus s'intendono i dati derivanti dai risultati modellistici, a cui si aggiungono quelli di Ecoinvent, suddivisi in quattro categorie principali: Infrastrutture, *raw meal/additives*, processi di combustione/calcinazione, fornitura di energia/combustibile (carbone). Ecoinvent (<https://www.ecoinvent.org/home.html>) è il principale database commerciale utilizzato per le fasi di Life Cycle Inventory. La combinazione dei dati modellistici, di quelli disponibili in letteratura su studi analoghi e dei dati commerciali si riesce a modellare il sistema di studio in modo esaustivo, tale da poter tenere conto di tutti gli aspetti rilevanti del ciclo produttivo. Da notare che il consumo di energia elettrica, che risulta necessaria per i processi che trattano meccanicamente le rocce dei *raw meal* per ridurne la grana, è stato modellato come input della fase di produzione del clinker, anche se, nella realtà, non viene utilizzato esclusivamente in questa fase, ma anche in quella di produzione del cemento (*cement production*) e di movimentazione delle materie prime di input (*raw meal*).

Tabella 1 – Inventario sistema di riferimento C1

| <b>SISTEMA C1: conventional</b>                      |           |          |      |  |
|--|-----------|----------|------|--|
| Key details:   |           |          |      |  |
| Functional unit 1 kg of cement                       |           |          |      |  |
| All flows are scaled to 1 kg/s of clinker production |           |          |      |  |
| RAW MEAL   |           |          |      |  |
| Input  | Type      |          | MU   | Comment  |
| Limestone  | Aspen+    | 1.27E+00 | Kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Clay   | Aspen+    | 2.17E-01 | Kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Silica Sand  | Aspen+    | 4.85E-02 | Kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Output   |           |          |      |  |
| Raw meal   | Aspen+    | 1.54E+00 | Kg/s | Valuable product                                     |
| Clinker production (calciner + rotary kiln)          |           |          |      |  |
| Input  | Type      |          | MU   | Comment  |
| Refractory production, fireclay                      | Ecoinvent | 8.21E-05 | Kg   | Infrastructure                                       |
| Diesel burned in building machine                    | Ecoinvent | 1.34E-02 | MJ   | Infrastructure                                       |
| Lubricating oil                                      | Ecoinvent | 4.71E-05 | Kg/s | Infrastructure                                       |
| Industrial machine                                   | Ecoinvent | 3.76E-05 | Kg/s | Infrastructure                                       |
| Refractory, high aluminium oxide                     | Ecoinvent | 1.37E-04 | Kg/s | Infrastructure                                       |
| Tap water  | Ecoinvent | 3.40E-01 | Kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Chromium steel 18/8                                  | Ecoinvent | 5.86E-05 | Kg/s | Infrastructure                                       |
| Hard coal  | Aspen     | 1.20E-01 | kg/s | Fuel   |
| Cement factory                                       | Ecoinvent | 6.27E-12 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)                 |
| Electric power                                       | Ecoinvent | 5.48E-03 | kWh  | Power  |
| Refractory, basic                                    | Ecoinvent | 1.90E-04 | Kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Raw meal   | Aspen     | 1.54E+00 | Kg/s | Valuable intermediate                                |
| Output   |           |          |      |  |
| CO <sub>2</sub>                                      | Aspen     | 8.76E-01 | Kg/s | Emissions to atmosphere                              |
| Clinker  | Aspen     | 1.00E+00 | Kg/s | Valuable product                                     |
| Cement production                                    |           |          |      |  |
| Input  |           |          |      |  |
| Ethylene glycol                                      | Ecoinvent | 1.90E-04 | kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Limestone  | Ecoinvent | 5.00E-02 | kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Steel production, low-alloyed                        | Ecoinvent | 1.10E-04 | kg   | Infrastructure                                       |
| Cement factory                                       | Ecoinvent | 2.13E-09 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)                 |
| Gypsum   | Ecoinvent | 4.75E-02 | kg/s | Raw meal/additives                                   |
| Electric power                                       |           |          |      | All power is modelled as input of clinker production |
| Clinker  | Aspen     | 9.03E-01 | kg/s | Valuable product                                     |
| Output   |           |          |      |  |
| Cement   | Ecoinvent | 1.00E+00 | kg/s | Valuable product                                     |

**C2 tail-end:** Il sistema di riferimento C1 è stato messo a confronto con due diverse configurazioni di integrazione del processo di decarbonizzazione CaL. Nella prima soluzione, chiamata *C2 tail-end*, il CaL consiste in un'unità a sé stante posta a valle della produzione del clinker: Il carbonatore, quindi, cattura la CO<sub>2</sub> post-combustione, dai fumi provenienti dal clinker prima di essere immessi in atmosfera, e non interviene nel processo produttivo. Le modifiche da apportare alla configurazione C1 sono nulle o trascurabili, dato che l'unità CaL viene posta a valle del processo produttivo.

**C3 integrated:** Nella seconda soluzione, che abbiamo denominato *integrated*, il carbonatore viene integrato al preriscaldatore del forno e cattura la CO<sub>2</sub> dai fumi provenienti solamente dal forno rotante (*rotary kiln*), mentre il calcinatore del CaL, in cui avviene la ossi-combustione, sostituisce il calcinatore del clinker. A differenza della configurazione C2, la configurazione C3 prevede modifiche importanti alla configurazione di riferimento C1, dato che l'unità CaL viene integrata nella sua componente di rigenerazione al sistema produttivo, integrando le sue funzioni al precalcinatore.

In Figura 4 e 5, sono rappresentati i due schemi C2 e C3 e la loro corrispondente rappresentazione in GaBi. Come spiegato in Sezione 2.1, per la valutazione degli impatti delle diverse unità di processo, in GaBi a ciascun blocco evidenziato sono stati associati i risultati dell'analisi di inventario (dati validati del consumo di risorse e delle emissioni) e i fattori di caratterizzazione relativi alla categoria d'impatto d'interesse (in questo caso GWP100 per la valutazione del carbon footprint). Rispetto alla configurazione *tail-end* la configurazione *integrated* presenta due fondamentali differenze: invece di utilizzare carbonato di calcio come sorbente, viene utilizzato il *raw meal* stesso che viene utilizzato nel processo di produzione del clinker<sup>14</sup>; la piccola dimensione delle particelle che compongono il *raw meal* fa sì che, nella scelta della tipologia di componente da usare come calcinatore e carbonatore nel CaL, i reattori a letto trascinato siano da preferire rispetto a reattori a letto fluido<sup>14</sup>.

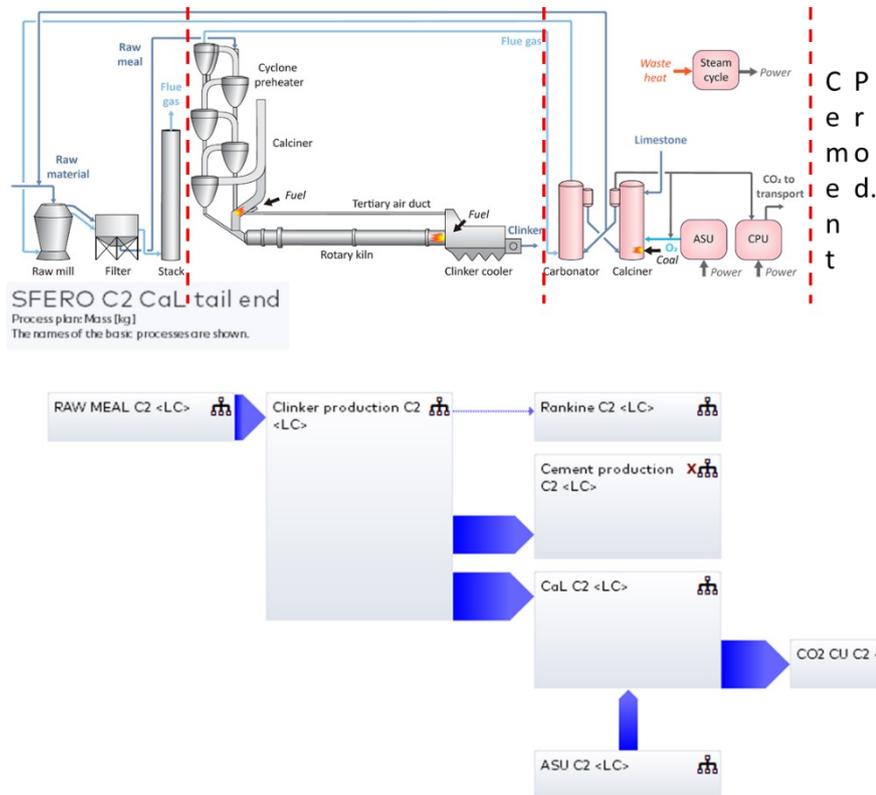
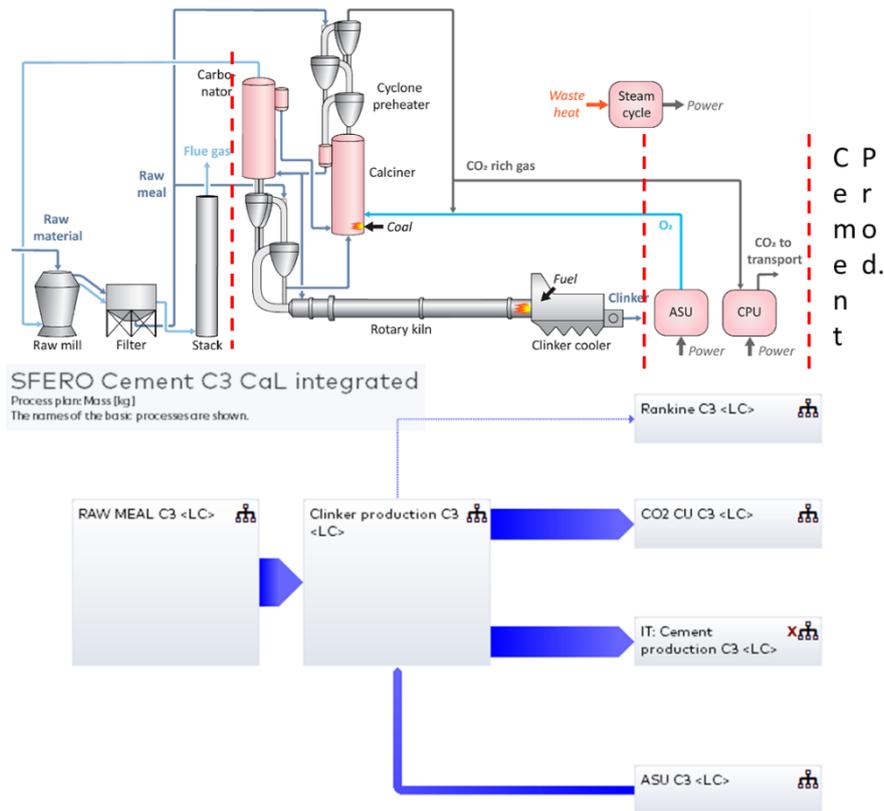


Figura 4 - Schema del sistema C2 del cementificio dotato di CaL tail-end e corrispondente rappresentazione in GaBi



**Figura 5** - Schema del sistema C3 del cementificio dotato di CaL *integrated* e corrispondente rappresentazione in GaBi.

Le due versioni (C2 e C3) dotate di CaL sono state modellate sulla base delle stesse assunzioni del sistema di riferimento (produzione e dimensionamento). In aggiunta, i sistemi C2 e C3 prevedono, oltre al sistema CaL, il sistema di compressione della CO<sub>2</sub> (*CO<sub>2</sub> compression unit*- CU), il sistema di produzione dell'ossigeno (*Air Separation Unit* – ASU) e il ciclo di Rankine per il recupero del calore di processo e la produzione di energia elettrica (riportato in Figura 4 e 5 come “*steam cycle*”), che consente un'ulteriore riduzione, in modo indiretto, delle emissioni complessive in termini di kg di CO<sub>2</sub> eq. Nelle Tabella 2 e 3, sono riportati i dati risultanti dall'analisi di inventario utilizzati per l'analisi LCA in GaBi. Una descrizione più dettagliata delle assunzioni e dei risultati delle simulazioni di processo sono state riportate in<sup>10</sup>.

Tabella 2 – Inventario sistema C2

| <b>SISTEMA C2: tail-end</b>                          |           |          |      |  |
|--|-----------|----------|------|--|
| Key details:   |           |          |      |  |
| Functional unit 1 kg of cement                       |           |          |      |  |
| All flows are scaled to 1 kg/s of clinker production |           |          |      |  |
| RAW MEAL   |           |          |      |  |
| Input  | Type      |          | MU   | Comment  |
| Limestone  | Aspen     | 1.04E+00 | Kg/s | Raw meal/additives   |
| Clay   | Aspen     | 1.77E-01 | Kg/s | Raw meal/additives   |
| Silica Sand  | Aspen     | 3.97E-02 | Kg/s | Raw meal/additives   |
| Output   |           |          |      |  |
| Rawmeal  |           | 1.26E+00 | Kg/s | Valuable product   |
| Clinker production (calcination + rotary kiln)       |           |          |      |  |
| Input  | Type      |          | MU   | Comment  |
| Refractory production, fireclay                      | Ecoinvent | 8.21E-05 | Kg   | Infrastructure   |
| Diesel burned in building machine                    | Ecoinvent | 1.34E-02 | MJ   | Infrastructure   |
| Lubricating oil                                      | Ecoinvent | 4.71E-05 | Kg/s | Infrastructure   |
| Industrial machine                                   | Ecoinvent | 3.76E-05 | Kg/s | Infrastructure   |
| Refractory, high aluminium oxide                     | Ecoinvent | 1.37E-04 | Kg/s | Infrastructure   |
| Tap water  | Ecoinvent | 3.40E-01 | Kg/s | Raw meal/additives   |
| Chromium steel 18/8                                  | Ecoinvent | 5.86E-05 | Kg/s | Infrastructure   |
| Hard coal  | Aspen     | 9.00E-02 | kg/s | Fuel   |
| Cement factory                                       | Ecoinvent | 6.27E-12 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)                                 |
| Refractory, basic                                    | Ecoinvent | 1.90E-04 | Kg/s | Infrastructure   |
| Raw meal   | Aspen     | 1.26E+00 | Kg/s | Valuable product   |
| Output   |           |          |      |  |
| CO <sub>2</sub>                                      | Aspen     | 1.29E+00 | Kg/s | Valuable product   |
| Heat, thermal energy                                 | Aspen     | 2.54E-03 | kWh  | Power  |
| Clinker  | Aspen     | 1.00E+00 | Kg   | Valuable product   |
| CO <sub>2</sub>                                      | Aspen     | 6.83E-02 | Kg/s | Emissions  |
| O <sub>2</sub>                                       | Aspen     | 9.58E-02 | Kg/s | Emissions  |
| H <sub>2</sub> O                                     | Aspen     | 4.08E-02 | Kg/s | Emissions  |
| H <sub>2</sub>                                       | Aspen     | 9.19E-06 | Kg/s | Emissions  |
| N <sub>2</sub>                                       | Aspen     | 1.03E+00 | Kg/s | Emissions  |
| Cement production                                    |           |          |      |  |
| Input  | Type      |          | MU   | Comment  |
| Ethylene glycol                                      | Ecoinvent | 1.90E-04 | kg/s | Raw meal/additives   |
| Limestone  | Ecoinvent | 5.00E-02 | kg/s | Raw meal/additives   |
| Steel production, low-alloyed                        | Ecoinvent | 1.10E-04 | kg   | Infrastructure   |
| Cement factory                                       | Ecoinvent | 2.13E-09 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)                                 |
| Gypsum   | Ecoinvent | 4.75E-02 | kg/s | Raw meal/additives   |
| Electric power                                       |           |          |      | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle |
| Clinker  | Aspen     | 9.03E-01 | kg/s |  |
| Output   |           |          |      |  |
| Cement   |           | 1.00E+00 | kg/s | Valuable product   |
| Rankine  |           |          |      |  |
| Input  | Type      |          | MU   | Comment  |

|  |           |           |      |  |
|--|-----------|-----------|------|--|
| Heat, thermal energy                                       | Aspen     | 2.54E-03  | kWh  | Power  |
| Electricity medium voltage                                 | Aspen     | -1.10E-04 | MWh  | Power  |
| Power block  | Ecoinvent | 5.83E-11  | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| <b>Output</b>  |           |           |      |  |
| Electric power   | Aspen     | -1.30E+01 | MWh  | Power; total consumption: 15.492 (cement) + 14.264 (ASU) + 16.259 (CO <sub>2</sub> ) = 46.016 MWh; Rankine: -59.201. Net balance= -13MWh |
| <b>CO<sub>2</sub> CU (CO<sub>2</sub> Compression Unit)</b> |           |           |      |  |
| <b>Input</b>   |           |           |      |  |
| CO <sub>2</sub>  | Aspen     | 1.29E+00  | Kg/s | Valuable product   |
| Electric power   |           |           |      | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle   |
| Air compressor   | Ecoinvent | 2.63E-09  | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| <b>Output</b>  |           |           |      |  |
| CO <sub>2</sub>  | Aspen     | 1.29E+00  |      | Valuable product (compressed)  |
| <b>ASU</b>   |           |           |      |  |
| <b>Input</b>   |           |           |      |  |
| Electric power   |           |           |      | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle   |
| Air separation facility                                    | Ecoinvent | 3.35E-10  | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| <b>Output</b>  |           |           |      |  |
| Oxygen gaseous   | Aspen     | 5.36E-01  | Kg/s | Valuable product (compressed)  |
| <b>CaL</b>   |           |           |      |  |
| <b>Input</b>   |           |           |      |  |
| CO <sub>2</sub>  | Aspen     | 1.29E+00  | Kg/s | Exhaust emissions  |
| Hard coal  | Aspen     | 2.20E-01  | Kg/s | Fuel   |
| Limestone  | Aspen     | 2.47E-01  | Kg/s | Raw meal/additives   |
| Oxygen gaseous   | Aspen     | 5.36E-01  | Kg/s | Fuel   |
| <b>Output</b>  |           |           |      |  |
| CO <sub>2</sub>  | Aspen     | 1.29E+00  |      | Valuable product (compressed)  |

Tabella 3 - Inventario sistema C3

| <b>SISTEMA C3: integrated</b>                               |       |          |      |                    |
|---|-------|----------|------|--------------------|
| Key details:  |       |          |      |                    |
| Functional unit 1 kg of cement                              |       |          |      |                    |
| All flows are scaled to 1 kg/s of clinker production        |       |          |      |                    |
| <b>RAW MEAL</b>   |       |          |      |                    |
| <b>Input</b>  |       |          |      |                    |
| Limestone   | Aspen | 1.28E+00 | Kg/s | Raw meal/additives |
| Clay  | Aspen | 2.18E-01 | Kg/s | Raw meal/additives |
| Silica Sand   | Aspen | 4.88E-02 | Kg/s | Raw meal/additives |
| <b>Output</b>   |       |          |      |                    |
| Raw meal  | Aspen | 1.55E+00 | Kg/s | Valuable product   |
| <b>Clinker production (calcination + rotary kiln) + CaL</b> |       |          |      |                    |

| Input                             | Type      |          | MU   | Comment  |
|-----------------------------------|-----------|----------|------|--|
| Refractory production, fireclay   | Ecoinvent | 8.21E-05 | Kg   | Infrastructure   |
| Diesel burned in building machine | Ecoinvent | 1.34E-02 | MJ   | Infrastructure   |
| Lubricating oil                   | Ecoinvent | 4.71E-05 | Kg/s | Infrastructure   |
| Industrial machine                | Ecoinvent | 3.76E-05 | Kg/s | Infrastructure   |
| Refractory, high aluminium oxide  | Ecoinvent | 1.37E-04 | Kg/s | Infrastructure   |
| Tap water                         | Ecoinvent | 3.40E-01 | Kg/s | Raw meal/additives   |
| Chromium steel 18/8               | Ecoinvent | 5.86E-05 | Kg/s | Infrastructure   |
| Hard coal                         | Aspen     | 1.95E-01 | kg/s | Energy/fuel  |
| Cement factory                    | Ecoinvent | 6.27E-12 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)                                 |
| Electric power                    |           |          |      | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle |
| Refractory, basic                 | Ecoinvent | 1.90E-04 | Kg/s | Infrastructure   |
| Raw meal                          | Aspen     | 1.55E+00 | Kg/s | Valuable product   |
| <b>CaL</b>                        |           |          |      |  |
| CO <sub>2</sub>                   | Aspen     | 1.04E+00 | Kg/s | Emissions  |
| Oxygen                            | Aspen     | 3.40E-01 | Kg/s |  |
| <b>Output</b>                     |           |          |      |  |
| CO <sub>2</sub>                   | Aspen     | 1.01E+00 | Kg/s | Valuable product   |
| Heat, thermal energy              | Aspen     | 8.95E-04 | kWh  | Power  |
| Clinker                           | Aspen     | 1.00E+00 | Kg   | Valuable product   |
| CO <sub>2</sub>                   | Aspen     | 2.72E-02 | Kg/s | Emissions  |
| O <sub>2</sub>                    | Aspen     | 2.09E-01 | Kg/s | Emissions  |
| H <sub>2</sub>                    | Aspen     | 2.25E-09 | Kg/s | Emissions  |
| H <sub>2</sub> O                  | Aspen     | 1.80E-02 | Kg/s | Emissions  |
| N <sub>2</sub>                    | Aspen     | 9.95E-01 | Kg/s | Emissions  |
| <b>Cement production</b>          |           |          |      |  |
| Input                             | Type      |          | MU   | Comment  |
| Ethylene glycol                   | Ecoinvent | 1.90E-04 | kg/s | Raw meal/additives   |
| Limestone                         | Ecoinvent | 5.00E-02 | kg/s | Raw meal/additives   |
| Steel production, low-alloyed     | Ecoinvent | 1.10E-04 | kg   | Infrastructure   |
| Cement factory                    | Ecoinvent | 2.13E-09 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)                                 |
| Gypsum                            | Ecoinvent | 4.75E-02 | kg/s | Raw meal/additives   |

|  |             |          |           |   |
|--|-------------|----------|-----------|---|
| Electric power   |             |          |           | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle  |
| Clinker  | Ecoinvent   | 9.03E-01 | kg/s      |   |
| <b>Output</b>  |             |          |           |   |
| Cement   | Ecoinvent   | 1        | kg/s      |   |
| <b>Rankine</b>   |             |          |           |   |
| <b>Input</b>   | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>  |
| Heat, thermal energy                                       | Aspen       | 8.95E-04 | kWh       | Power   |
| Electric power   | Aspen       | 1.70E-01 | kWh       | Power; total consumption: 15.492 (cement)+9.053(ASU) +13.254(CO2)=37.799 MWh; RANKINE: -17.464. Balance=20MWh |
| Power block  | Ecoinvent   | 1.72E-11 | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)  |
| <b>Output</b>  |             |          |           |   |
| Electric power   | Aspen       | 1.70E-01 | MWh       |   |
| <b>CO<sub>2</sub> CU (CO<sub>2</sub> Compression Unit)</b> |             |          |           |   |
| <b>Input</b>   | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>  |
| CO <sub>2</sub>  | Aspen       | 2.87E+06 | Kg/s      | Valuable product  |
| Electric power   |             |          |           | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle  |
| Air compressor   | Ecoinvent   | 2.14E-09 | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)  |
| <b>Output</b>  |             |          |           |   |
| CO <sub>2</sub>  | Aspen       | 2.87E+06 |           | Valuable product (compressed)   |
| <b>ASU</b>   |             |          |           |   |
| <b>Input</b>   | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>  |
| Electric power   |             |          |           | All power is modelled in terms of net outflow from the Rankine cycle  |
| Air separation facility                                    | Ecoinvent   | 2.13E-10 | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)  |
| <b>Output</b>  |             |          |           |   |
| Oxygen gaseous (O <sub>2</sub> )                           | Aspen       | 3.40E-01 | Kg        | Fuel  |

### 2.3.2 Acciaieria con altoforno tradizionale e fornace ad ossigeno

L'acciaio viene prodotto attraverso diverse fasi di lavorazione che vengono combinate in diverse configurazioni al variare del mix di materie prime disponibili e dell'approvvigionamento di energia termica ed elettrica. In questo lavoro sono state valutate due linee per la produzione dell'acciaio, che sono, allo stato dell'arte, indicate tra quelle attualmente più utilizzate e/o promettenti in una prospettiva di sviluppo<sup>4</sup>:

- Ciclo integrale di produzione basato su altoforno tradizionale (*Blast Furnace - BF*) e fornace ad ossigeno (*Blast Oxygen Furnace - BOF*);
- Riduzione diretta (*Direct reduction - DR*) combinato con processi ad arco elettrico (*Electric Arc Furnace - EAF*).

Nel primo processo, il minerale ferifero viene ridotto in un altoforno ed il metallo caldo risultante è quindi avviato in una fornace BOF detta anche convertitore ad ossigeno. In questo processo, il ferro liquido viene convertito e trattato con O<sub>2</sub> riducendo gli elementi chimici indesiderati come carbonio, silicio e fosforo

portando l'acciaio prodotto agli standard di qualità richiesti. L'altoforno viene alimentato attraverso minerali ferriferi tal quali oppure opportunamente sinterizzati o pellettizzati. La carica di solidi in alimentazione è composta oltre che da questi minerali, da coke, principale agente riducente in questa configurazione, a cui si aggiungono additivi (pietra calcarea, pietra dolomitica, quarzite) per aumentare e correggere l'indice di basicità delle scorie e per una desolforazione più spinta del processo. Nei pressi dell'altoforno sono presenti unità per il preriscaldamento dell'aria (*pre-heater/hot stoves*) dove avviene la combustione del gas d'altoforno arricchito con metano. Il gas d'altoforno (*Blast Furnace Gas – BFG*), che viene captato quando finisce la risalita verso l'alto, è una miscela costituita principalmente da CO (20-28%), H<sub>2</sub> (1-5%), inerti come N<sub>2</sub> (50-55%) e CO<sub>2</sub> (17-25%). Le emissioni liberate da questa combustione rappresentano la sorgente principale di CO<sub>2</sub> del processo di produzione del ferro a cui si aggiungono i *Blast Oxygen Furnace Gas – BOFG*, quelle derivanti dal BOF, dove avviene conversione del metallo fuso in acciaio. Il BOFG sono i fumi generati dal processo di ossi-combustione, ed è una miscela ad alta temperatura, costituita prevalentemente da CO<sub>2</sub>, vapore acqueo e N<sub>2</sub>, con tracce di CO. In questo processo è necessario l'utilizzo di un'unità ASU (*Air Separation Unit*) che fornisce l'ossigeno nelle percentuali di purezza necessaria, che variano dal 95 al 99.9%. Entrambe le due linee industriali (i.e., BF-BOF e DR-EAF) si prestano ad essere dotate di sistema CaL per il trattamento dei fumi ricchi di CO<sub>2</sub> emessi durante le varie fasi del processo e, una volta esaurita la sua capacità di sorbente, l'utilizzo dell'ossido di calcio nel processo produttivo come additivo basico. Come nel caso del cemento, minerali a base di calcio (e.g. calcare, dolomite) sono usati nella produzione di ferro e acciaio. I minerali a base di calcio sono caricati insieme ai minerali ferriferi per la loro funzione scorificante e di protezione del ferro o dell'acciaio da possibili fenomeni di ossidazione durante la fusione e la permanenza in forno, promuovendo la formazione di una barriera che ostacoli il contatto fra l'ossigeno ed il bagno fuso, ed impedendone la contaminazione da agenti esterni.

L'integrazione del processo di CaL nel processo BF-BOF è stato valutato mediante analisi LCA di tre diverse configurazioni che sono state modellate in Aspen Plus v.10.0<sup>10</sup> insieme al sistema di riferimento:

**S1 BF+BOF:** consiste nel sistema di riferimento e non prevede unità CaL. Come sopra descritto è costituito dalle unità di *pre-heater, BF e BOF*.

**S2 (BF+CaL)+BOF:** Rispetto a S1, si aggiunge l'unità CaL, dove vengono riciclati i BFG provenienti da BF per essere decarbonizzati invece di andare direttamente al *pre-heater*.

**S3 (BF+BOF)+CaL:** Nel CaL sono riciclati, oltre ai fumi BFG, anche i BOFG, provenienti dal BOF.

**S4 (BF+BOF+HS)+CaL:** Infine in S4, si ipotizza di riciclare nel CaL, anche i fumi in uscita dal *pre-heater*, per forzare la simulazione di processo a massimizzare il potenziale di cattura della CO<sub>2</sub>.

In Figura 6, 7, 8 e 9 sono visualizzati gli schemi dei quattro sistemi, S1, S2, S3 e S4, rispettivamente, evidenziando i principali aspetti che sono stati tenuti in considerazione nelle simulazioni di processo e, nello specifico, i principali punti emissivi, indicati in rosso se non trattati, invece in arancio se decarbonizzati, quindi in output dal processo CaL. Viene anche visualizzato il corrispondente schema a blocchi costruito in GaBi per l'analisi LCA. Nelle tabelle 4, 5, 6 e 7 sono infine riportati tutti i dati raccolti nell'analisi di inventario. I dati sono suddivisi secondo quattro categorie principali: Infrastrutture, *raw meal*/additivi, processi di combustione/calcinazione, fornitura di energia/combustibile (metano). I dati commerciali utilizzati (*Ecoinvent*), sono stati selezionati tra quelli più simili ai processi presi in esame, sulla base delle schede tecniche di *Ecoinvent* (<https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Home/Index>) dettagliate per ciascun processo.

I sistemi S2, S3 e S4, essendo integrati con l'unità CaL, permettendo l'inserimento di un'unità di potenza a ciclo di Rankine per il recupero di calore e produzione di energia elettrica da utilizzare per il fabbisogno interno dell'impianto, riducendo ulteriormente le emissioni indirette di CO<sub>2</sub>.

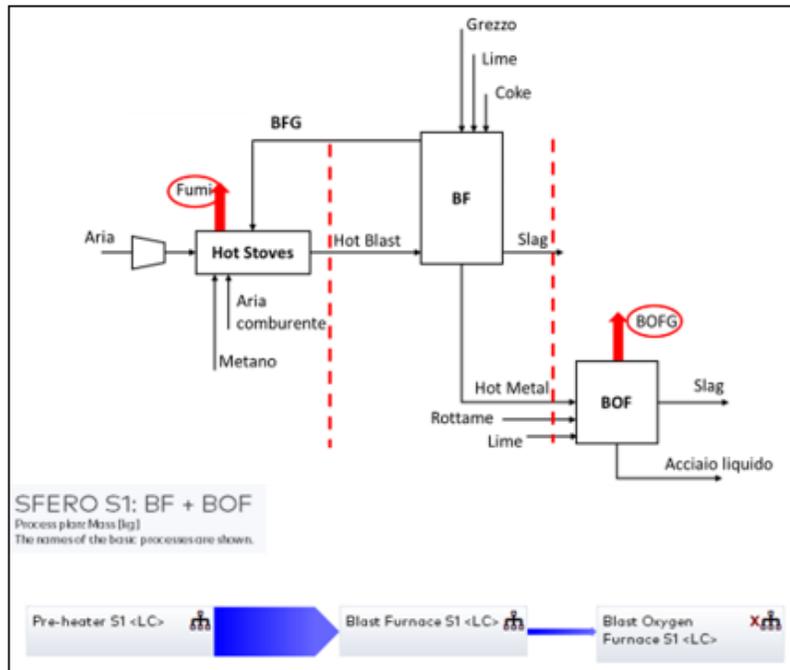


Figura 6 - Schema del sistema S1 di riferimento (non provvisto di CaL) e corrispondente rappresentazione in GaBi.

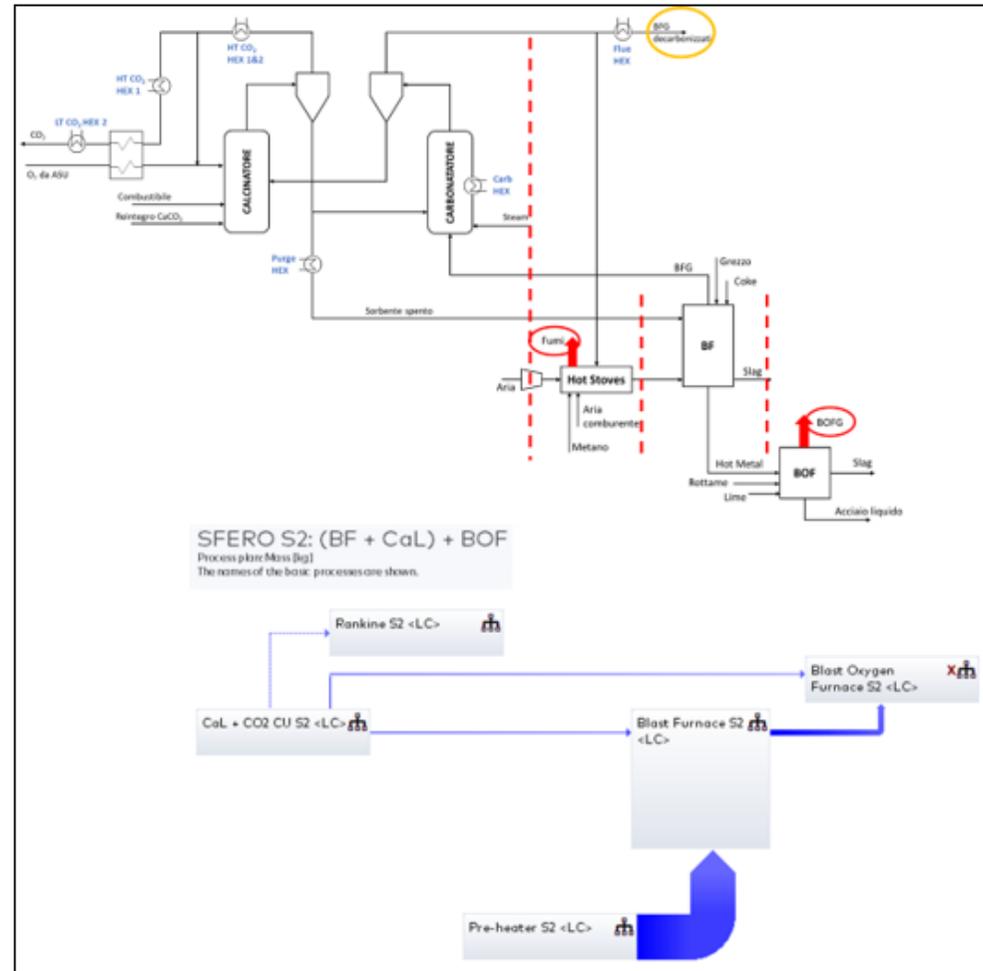


Figura 7 - Schema del sistema S2 e corrispondente rappresentazione in GaBi.

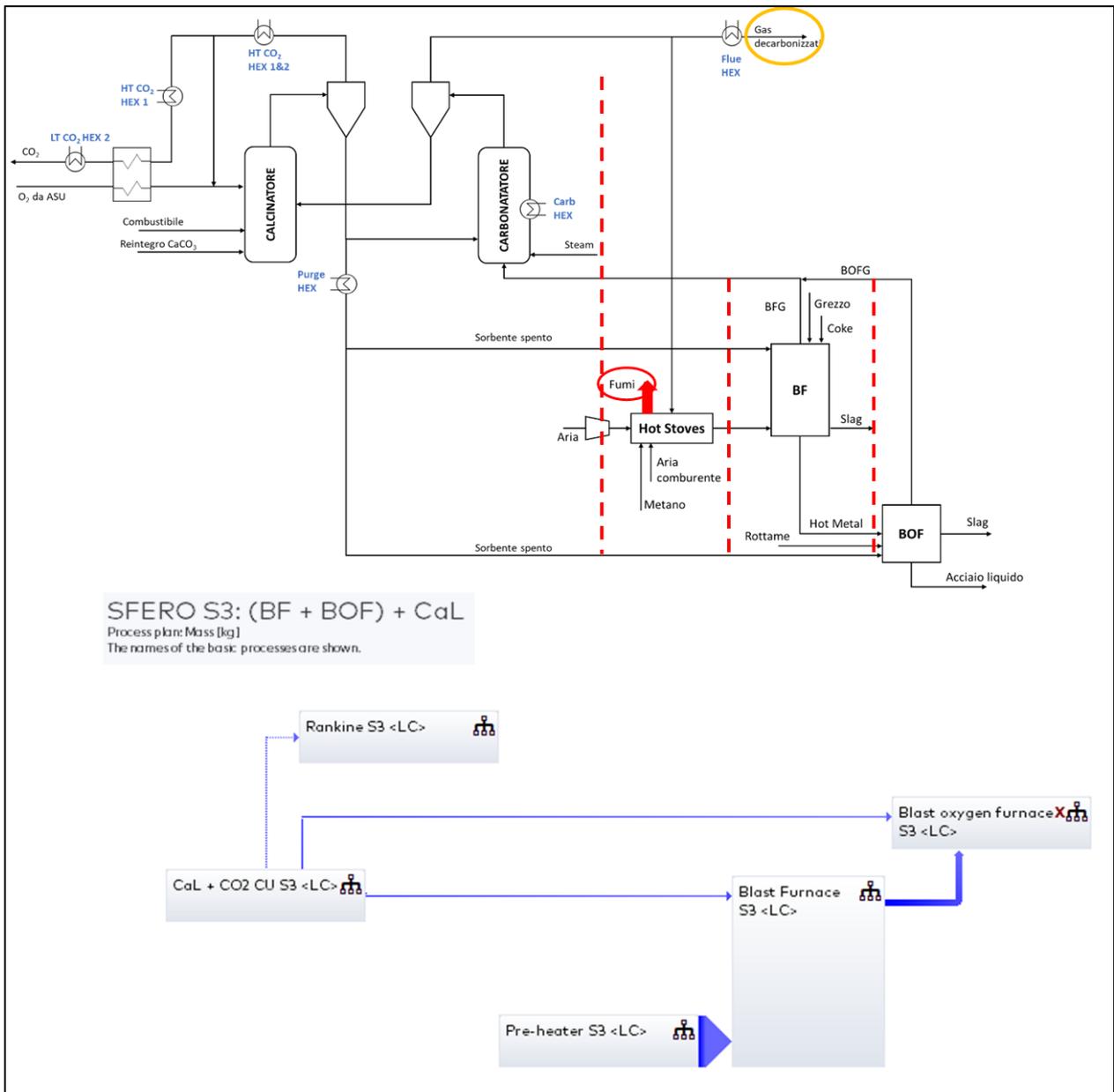


Figura 8 - Schema del sistema S3 e corrispondente rappresentazione in GaBi.

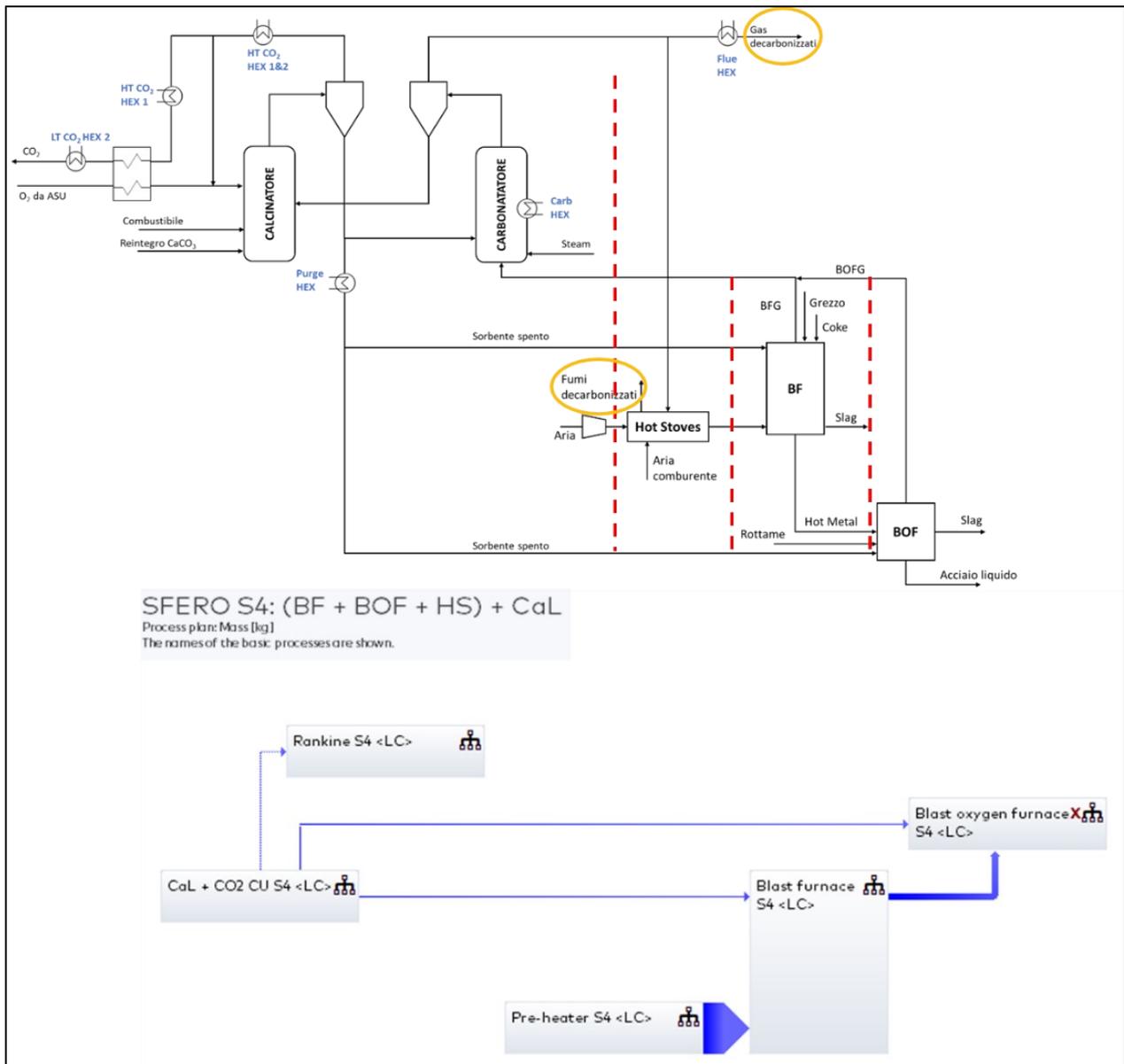


Figura 9 - Schema del sistema S4 e corrispondente rappresentazione in GaBi.

Tabella 4 – Inventario sistema S1

| <b>OPTION S1: BF + BOF</b>   |           |          |                |                                      |
|--|-----------|----------|----------------|--------------------------------------|
| Key details:   |           |          |                |                                      |
| Functional unit 1 tonne of steel   |           |          |                |                                      |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of steel production (679.59 tonnes per hour) |           |          |                |                                      |
| Pre-heater (HS)  |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Industrial furnace, natural gas  | Ecoinvent | 6.28E-03 | pcs            | Infrastructure                       |
| CH <sub>4</sub>  | Aspen     | 7.42E+01 | m <sup>3</sup> | Fuel                                 |
| Electricity, high voltage  | Aspen     | 1.60E+02 |                | Power                                |
| Output   |           |          |                |                                      |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen     | 6.00E+03 | kg/h           | Flue gas to BF (internal exchange)   |
| Carbon dioxide   |           | 720      | kg/h           | Emissions                            |
| Nitrogen   |           | 1900     | kg/h           | Emissions                            |
| Oxygen   |           | 88       | kg/h           | Emissions                            |
| Water vapour   |           | 92       | kg/h           | Emissions                            |
| BLAST FURNACE (BF)   |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Blast furnace production   | Ecoinvent | 6.67E-07 | pcs            | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| Lime   | Aspen     | 3.20E+02 | kg/h           | Raw meal                             |
| Hard coal coke   | Aspen     | 1.65E+04 | MU             | Fuel                                 |
| Iron ore   | Aspen     | 1.30E+03 | kg/h           | Raw meal                             |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen     | 6.00E+03 | kg/h           | Internal exchange                    |
| Output   |           |          |                |                                      |
| Hot metals   | Aspen     | 7.90E+02 | kg/h           | Valuable intermediate (to BF)        |
| Carbon dioxide   | Aspen     | 1.10E+03 | kg/h           | Emissions                            |
| Nitrogen   | Aspen     | 2.60E+03 | kg/h           | Emissions                            |
| Oxygen   | Aspen     | 2.00E+02 | kg/h           | Emissions                            |
| Slag   |           | 5.90E+02 | kg/h           | Hazardous waste                      |
| BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)   |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Blast oxygen furnace converter   | Ecoinvent | 6.67E-07 | kg/s           | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| Hot metals   | Aspen     | 7.90E+02 | kg/h           | Valuable intermediate                |
| Metal scraps   | Aspen     | 2.80E+02 | kg/h           | Valuable intermediate                |
| Oxygen, liquid   | Aspen     | 7.80E+01 | kg/h           | Fuel                                 |
| Output   |           |          |                |                                      |
| Carbon dioxide   | Aspen     | 1.20E+02 | kg/h           | Emissions                            |
| Nitrogen   | Aspen     | 1.40E+02 | kg/h           | Emissions                            |
| Oxygen   | Aspen     | 1.30E+01 | kg/h           | Emissions                            |
| Slag   | Aspen     | 9.10E+01 | kg/h           | Hazardous waste                      |
| Steel  | Aspen     | 1.00E+03 | kg/h           | Valuable product                     |
| ASU for oxygen supply  |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Air separation facility  | Ecoinvent | 6.25E-07 | pcs            | Infrastructure (timelife = 20 years) |
| Electricity, high voltage  | Aspen     | 3.09E+02 | kWh            | Power                                |
| Output   |           |          |                |                                      |

|        |       |          |      |                           |
|--------|-------|----------|------|---------------------------|
| Oxygen | Aspen | 1.00E+03 | kg/h | Valuable product (to BOF) |
|--------|-------|----------|------|---------------------------|

Tabella 5 – Inventario sistema S2

**OPTION S2: (BF + CaL) + BOF**

|  |           |          |                |                                      |
|--|-----------|----------|----------------|--------------------------------------|
| Key details:   |           |          |                |                                      |
| Functional unit 1 tonne of steel   |           |          |                |                                      |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of steel production (679.59 tonnes per hour) |           |          |                |                                      |
| <b>Pre-heater (HS)</b>   |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Industrial furnace, natural gas  | Ecoinvent | 6.28E-03 | pcs            | Infrastructure                       |
| CH <sub>4</sub>  | Aspen     | 6.86E+01 | m <sup>3</sup> | Fuel                                 |
| Output   |           |          |                |                                      |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen     | 5.49E+00 | t/h            | Flue gas to BF (internal exchange)   |
| Oxygen   | Aspen     | 7.88E-02 | t/h            | Emissions                            |
| Carbon monoxide  | Aspen     | 6.62E-05 | t/h            | Emissions                            |
| Carbon dioxide   | Aspen     | 1.70E-01 | t/h            | Emissions                            |
| Nitrogen   | Aspen     | 1.82E+00 | t/h            | Emissions                            |
| Water vapour   | Aspen     | 1.97E-01 | t/h            | Emissions                            |
| Hydrogen   | Aspen     | 3.83E-06 | t/h            | Emissions                            |
| Methane  | Aspen     | 1.26E-24 | t/h            | Emissions                            |
| <b>BLAST FURNACE (BF)</b>  |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Blast furnace production   | Ecoinvent | 6.67E-07 | pcs            | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| Lime   | Aspen     | 3.80E+02 | kg/h           | Raw meal                             |
| Hard coal coke   | Aspen     | 1.65E+04 | MU             | Fuel                                 |
| Iron ore   | Aspen     | 1.27E+03 | kg/h           | Raw meal                             |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen     | 5.49E+00 | t/h            | Flue gas (internal exchange)         |
| Output   |           |          |                |                                      |
| Hot metals   | Aspen     | 7.91E+02 | kg/h           | Valuable intermediate                |
| Oxygen   | Aspen     | 7.89E-02 | t/h            | Emissions                            |
| Carbon monoxide  | Aspen     | 6.58E-05 | t/h            | Emissions                            |
| Carbon dioxide   | Aspen     | 1.65E-01 | t/h            | Emissions                            |
| Nitrogen   | Aspen     | 1.81E+00 | t/h            | Emissions                            |
| Water vapour   | Aspen     | 2.01E-01 | t/h            | Emissions                            |
| Hydrogen   | Aspen     | 3.98E-06 | t/h            | Emissions                            |
| Methane  | Aspen     | 1.37E-24 | t/h            | Emissions                            |
| Slag   | Aspen     | 5.90E+02 | t/h            | Hazardous waste                      |
| <b>BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)</b>  |           |          |                |                                      |
| Input  | Type      |          | MU             | Comment                              |
| Blast oxygen furnace converter   | Ecoinvent | 6.67E-07 | pcs            | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| Hot metals   | Aspen     | 7.90E+02 | kg/h           | Valuable intermediate                |
| Oxygen, liquid   | Aspen     | 8.20E+01 | kg/h           | Fuel                                 |
| Metal scraps   | Aspen     | 2.83E-01 | t/h            | Valuable product                     |
| Air separation facility  | Ecoinvent | 6.25E-07 | pcs            | Infrastructure (timelife = 20 years) |
| Output   |           |          |                |                                      |
| Carbon dioxide   | Aspen     | 1.30E+02 | kg/h           | Emissions                            |

| Nitrogen                              | Aspen     | 1.40E+02      | kg/h | Emissions  |
|---------------------------------------|-----------|---------------|------|--|
| Oxygen                                | Aspen     | 1.30E+01      | kg/h | Emissions  |
| Slag                                  | Aspen     | 9.30E+01      | kg/h | Hazardous waste  |
| Steel                                 | Aspen     | 1.00E+03      | kg/h | Valuable product   |
| RANKINE                               |           |               |      |  |
| Input                                 | Type      |               | MU   | Comment  |
| Thermal energy                        | Aspen     | 3.64E+03      | kWh  | Power  |
| Electricity, high voltage             | Aspen     | -<br>5.46E+02 | kWh  | Energy/fuel: Net production = -371 MW = 109 (HB)+ 17 (BOF)+ 427 (CaL+CO <sub>2</sub> CU) - 924 (RANKINE) |
| Power block                           | Ecoinvent | 1.55E-07      | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| Output                                |           |               |      |  |
| Electricity, high voltage             | Aspen     | -<br>5.46E+02 | kWh  | Power  |
| CALCIUM LOOPING (CaL)                 |           |               |      |  |
| Input                                 | Type      |               | MU   | Comment  |
| Hard coal                             | Aspen     | 5.21E-01      | t/h  | Fuel   |
| Air compressor                        | Ecoinvent | 7.98E-07      | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| Oxygen                                | Aspen     | 1.28E+00      | t/h  | Fuel   |
| Limestone                             | Aspen     | 7.63E-01      | t/h  | Raw meal   |
| Tap water                             | Aspen     | 3.20E-01      | t/h  | Raw meal   |
| Output                                |           |               |      |  |
| Heat                                  | Aspen     | 3.64E+03      | kWh  | Power  |
| Carbone dioxide                       | Aspen     | 3.19E+00      | kg/s | Valuable product   |
| Lime                                  | Aspen     | 3.80E-01      | t/s  | Raw meal (valuable intermediate to BF)   |
| CO <sub>2</sub> Compression Unit (CU) |           |               |      |  |
| Input                                 | Type      |               | MU   | Comment  |
| Air compressor production             | Ecoinvent | 1.94E-03      | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| Carbone dioxide                       | Aspen     | 3.20E+03      | kg/s | Valuable product   |
| Output                                |           |               |      |  |
| Carbone dioxide                       | Aspen     | 3.20E+03      | kg/s | Valuable product   |

Tabella 6 – Inventario sistema S3

| OPTIONS3: (BF + BOF) + CaL   |           |          |     |                                    |
|--|-----------|----------|-----|------------------------------------|
| Key details:   |           |          |     |                                    |
| Functional unit 1 tonne of steel   |           |          |     |                                    |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of steel production (679.59 tonnes per hour) |           |          |     |                                    |
| Pre-heater (HS)  |           |          |     |                                    |
| Input  | Type      |          | MU  | Comment                            |
| Industrial furnace, natural gas  | Ecoinvent | 5.28E-03 | pcs | Infrastructure                     |
| CH <sub>4</sub>  | Aspen     | 6.24E+01 | m3  | Fuel                               |
| Output   |           |          |     |                                    |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen     | 5.48E+00 | t/h | Flue gas to BF (internal exchange) |
| Oxygen   | Aspen     | 7.37E-02 | t/h | Emissions                          |
| Carbon dioxide   | Aspen     | 1.20E-01 | t/h | Emissions                          |

| Nitrogen                             | Aspen     | 1.61E+00 | t/h  | Emissions   |
|--------------------------------------|-----------|----------|------|---|
| Hydrogen                             | Aspen     | 2.57E-02 | t/h  | Emissions   |
| BLAST FURNACE (BF)                   |           |          |      |   |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment   |
| Blast furnace production             | Ecoinvent | 6.67E-07 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)  |
| Lime                                 | Aspen     | 3.78E-01 | t/h  | Raw meal  |
| Hard coal coke                       | Aspen     | 1.65E+04 | MJ   | Fuel  |
| Iron ore                             | Aspen     | 1.27E+00 | t/h  | Raw meal  |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen     | 5.48E+00 | t/h  | Flue gas (internal exchange)  |
| Output                               |           |          |      |   |
| Hot metals                           | Aspen     | 7.90E+02 | kg/h | Valuable intermediate (to BOF)  |
| Oxygen                               | Aspen     | 7.88E-02 | t/h  | Emissions   |
| Carbon dioxide                       | Aspen     | 1.70E-01 | t/h  | Emissions   |
| Nitrogen                             | Aspen     | 1.82E+00 | t/h  | Emissions   |
| Water vapour                         | Aspen     | 1.97E-01 | t/h  | Emissions   |
| Hydrogen                             | Aspen     | 3.83E-06 | t/h  | Emissions   |
| Methane                              | Aspen     | 1.26E-24 | t/h  | Emissions   |
| Slag                                 | Aspen     | 5.90E+02 | t/h  | Hazardous waste   |
| BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)           |           |          |      |   |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment   |
| Blast oxygen furnace converter       | Ecoinvent | 6.67E-07 | pcs  | Infrastructure (timelife = 50 years)  |
| Hot metals                           | Aspen     | 7.90E+02 | kg/h | Valuable intermediate   |
| Oxygen, liquid                       | Aspen     | 8.20E+01 | kg/h | Fuel  |
| Metal scraps                         | Aspen     | 2.83E-01 | t/h  | Valuable intermediate   |
| Air separation facility              | Ecoinvent | 6.25E-07 | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)  |
| Output                               |           |          |      |   |
| Carbon dioxide                       | Aspen     | 1.30E+02 | kg/h | Emissions   |
| Nitrogen                             | Aspen     | 1.40E+02 | kg/h | Emissions   |
| Oxygen                               | Aspen     | 1.30E+01 | kg/h | Emissions   |
| Slag                                 | Aspen     | 9.30E+01 | kg/h | Hazardous waste   |
| Steel                                | Aspen     | 1.00E+03 | kg/h | Valuable product  |
| RANKINE                              |           |          |      |   |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment   |
| Thermal energy                       | Aspen     | 3.96E+03 | kWh  | Power   |
| Electricity, high voltage            | Aspen     | 6.19E+02 | kWh  | Power: Net power production = -421 MW = 109 (HB) + 17 (BOF) + 459 (CaL+CO <sub>2</sub> CU) - 1006 (RANKINE) |
| Power block                          | Ecoinvent | 1.69E-07 | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)  |
| Output                               |           |          |      |   |
| Electricity, high voltage            | Aspen     | 6.19E+02 | kWh  | Power   |
| CALCIUM LOOPING (CaL)                |           |          |      |   |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment   |
| Hard coal                            | Aspen     | 5.59E-01 | t/h  | Fuel  |
| Air compressor                       | Ecoinvent | 8.57E-07 | pcs  | Infrastructure (timelife = 20 years)  |
| Oxygen                               | Aspen     | 1.37E+00 | t/h  | Fuel  |

|   |             |          |           |  |
|---|-------------|----------|-----------|--|
| Limestone                                   | Aspen       | 8.40E-01 | t/h       | Raw meal                               |
| Tap water                                   | Aspen       | 3.53E-01 | t/h       | Raw meal                               |
| <b>Output</b>                               |             |          |           |  |
| Heat  | Aspen       | 3.96E+03 | kWh       | Power                                  |
| Carbone dioxide                             | Aspen       | 3.43E+00 | Kg/s      | Valuable intermediate (to CU)          |
| Lime  | Aspen       | 3.80E-01 | t/s       | Raw meal (valuable intermediate To BF) |
| <b>CO<sub>2</sub> Compression Unit (CU)</b> |             |          |           |  |
| <b>Input</b>                                | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>                         |
| Air compressor production                   | Ecoinvent   | 2.09E-03 | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| Carbone dioxide                             | Aspen       | 3.43E+00 | Kg/s      | Valuable product                       |
| <b>Output</b>                               |             |          |           |  |
| Carbone dioxide                             | Aspen       | 3.43E+00 | Kg/s      | Valuable product                       |

Tabella 7 – Inventario sistema S4

|  |             |          |           |                                      |
|--|-------------|----------|-----------|--------------------------------------|
| <b>OPTION S4: (BF + BOF + HS) + CaL</b>  |             |          |           |                                      |
| Key details:   |             |          |           |                                      |
| Functional unit 1 tonne of steel   |             |          |           |                                      |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of steel production (679.59 tonnes per hour) |             |          |           |                                      |
| <b>Pre-heater (HS)</b>   |             |          |           |                                      |
| <b>Input</b>   | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>                       |
| Industrial furnace, natural gas  | Ecoinvent   | 5.28E-03 | pcs       | Infrastructure                       |
| <b>Output</b>  |             |          |           |                                      |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen       | 5.92E+00 | t/h       | Flue gas to BF (internal exchange)   |
| <b>BLAST FURNACE (BF)</b>  |             |          |           |                                      |
| <b>Input</b>   | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>                       |
| Blast furnace production   | Ecoinvent   | 6.67E-07 | pcs       | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| Lime   | Aspen       | 3.79E-01 | t/h       | Raw meal                             |
| Hard coal coke   | Aspen       | 1.65E+04 | MU        | Energy/fuel                          |
| Iron ore   | Aspen       | 1.27E+00 | t/h       | Raw meal                             |
| Gas combustion flow (thermal energy)   | Aspen       | 5.92E+00 | t/h       | Flue gas (internal exchange)         |
| <b>Output</b>  |             |          |           |                                      |
| Hot metals   | Aspen       | 7.90E+02 | kg/h      | Valuable intermediate (to BOF)       |
| Oxygen   | Aspen       | 7.88E-02 | t/h       | Emissions                            |
| Carbon dioxide   | Aspen       | 1.70E-01 | t/h       | Emissions                            |
| Nitrogen   | Aspen       | 1.82E+00 | t/h       | Emissions                            |
| Water vapour   | Aspen       | 1.97E-01 | t/h       | Emissions                            |
| Hydrogen   | Aspen       | 3.83E-06 | t/h       | Emissions                            |
| Methane  | Aspen       | 1.26E-24 | t/h       | Emissions                            |
| Slag   | Aspen       | 5.90E+02 | t/h       | Hazardous waste                      |
| <b>BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)</b>  |             |          |           |                                      |
| <b>Input</b>   | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>                       |
| Blast oxygen furnace converter   | Ecoinvent   | 6.67E-07 | pcs       | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| Hot metals   | Aspen       | 7.90E+02 | kg/h      | Valuable intermediate                |
| Oxygen, liquid   | Aspen       | 8.20E+01 | kg/h      | Fuel                                 |
| Metal scraps   | Aspen       | 2.83E-01 | t/h       | Valuable intermediate                |

|   |             |               |           |  |
|---|-------------|---------------|-----------|--|
| Air separation facility                     | Ecoinvent   | 6.25E-07      | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| <b>Output</b>                               |             |               |           |  |
| Carbon dioxide                              | Aspen       | 1.30E+02      | kg/h      | Emissions  |
| Nitrogen                                    | Aspen       | 1.40E+02      | kg/h      | Emissions  |
| Oxygen                                      | Aspen       | 1.30E+01      | kg/h      | Emissions  |
| Slag  | Aspen       | 9.30E+01      | kg/h      | Hazardous waste  |
| Steel                                       | Aspen       | 1.00E+03      | kg/h      | Valuable product   |
| <b>RANKINE</b>                              |             |               |           |  |
| <b>Input</b>                                | <b>Type</b> |               | <b>MU</b> | <b>Comment</b>   |
| Thermal energy                              | Aspen       | 3.96E+03      | kWh       | Power  |
| Electricity, high voltage                   | Aspen       | -<br>5.65E+02 | kWh       | Power: Net power production = -384<br>MW = 109 (HB) + 17 (BOF) + 459<br>(CaL+CO <sub>2</sub> CU) - 969 (RANKINE) |
| Power block                                 | Ecoinvent   | 1.63E-07      | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| <b>Output</b>                               |             |               |           |  |
| Electricity, high voltage                   | Aspen       | -<br>5.65E+02 | kWh       | Power  |
| <b>CALCIUM LOOPING (CaL)</b>                |             |               |           |  |
| <b>Input</b>                                | <b>Type</b> |               | <b>MU</b> | <b>Comment</b>   |
| Hard coal                                   | Aspen       | 5.59E-01      | t/h       | Fuel   |
| Air compressor                              | Ecoinvent   | 8.57E-07      | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| Oxygen                                      | Aspen       | 1.37E+00      | t/h       | Fuel   |
| Limestone                                   | Aspen       | 8.40E-01      | t/h       | Raw meal   |
| Tap water                                   | Aspen       | 3.53E-01      | t/h       | Raw meal   |
| <b>Output</b>                               |             |               |           |  |
| Heat  | Aspen       | 3.96E+03      | kWh       | Power  |
| Carbone dioxide                             | Aspen       | 3.43E+00      | t/h       | Valuable intermediate (to CU)  |
| Lime  | Aspen       | 4.23E-01      | t/h       | Raw meal (valuable intermediate to BF)   |
| <b>CO<sub>2</sub> Compression Unit (CU)</b> |             |               |           |  |
| <b>Input</b>                                | <b>Type</b> |               | <b>MU</b> | <b>Comment</b>   |
| Air compressor production                   | Ecoinvent   | 2.09E-03      | pcs       | Infrastructure (timelife = 20 years)   |
| Carbone dioxide                             | Aspen       | 3.43E+00      | t/h       | Valuable product   |
| <b>Output</b>                               |             |               |           |  |
| Carbone dioxide                             | Aspen       | 3.43E+00      | t/h       | Valuable product   |

### 2.3.3 Acciaieria a riduzione diretta e processo ad arco elettrico

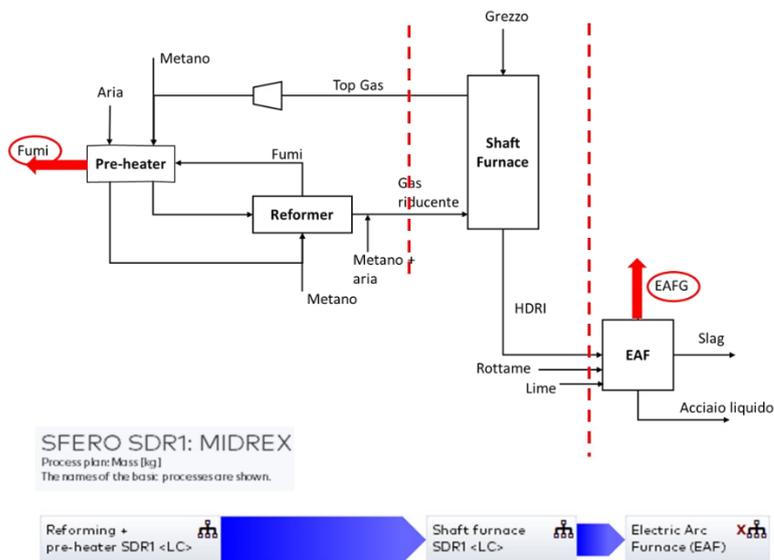
La seconda linea di produzione dell'acciaio presa in esame consiste in un forno elettrico ad arco (*Electric Arc Furnace* - EAF) alimentato da ferro caldo prodotto da riduzione diretta (*Direct reduction* – DR).

Come raffigurato in Figura 10, il sistema così concepito comprende:

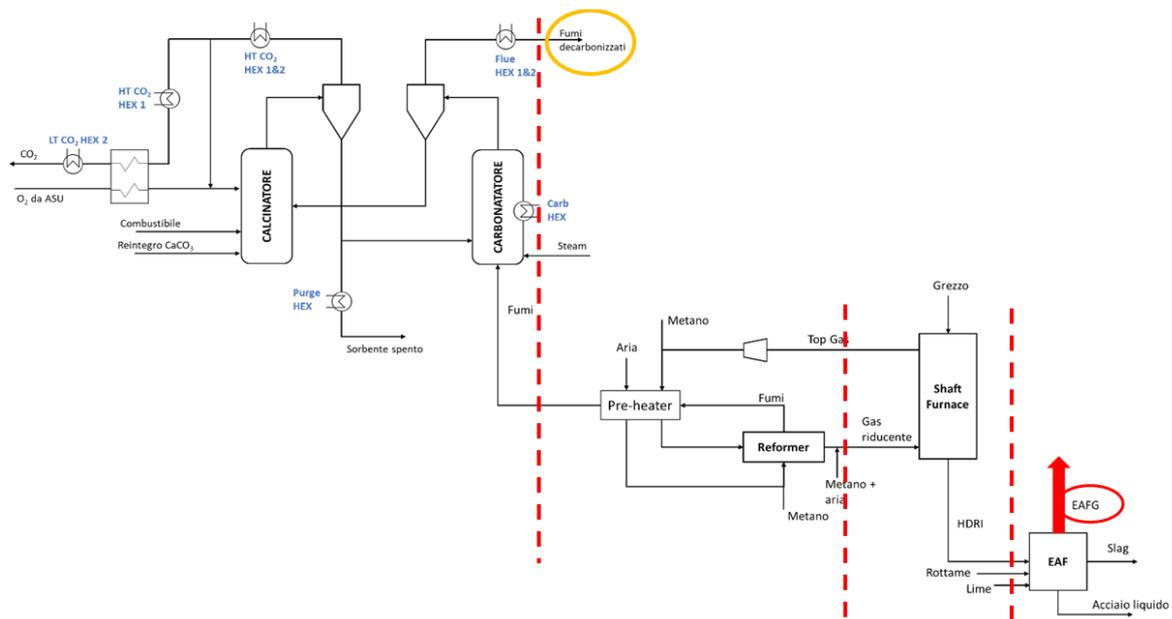
- un'unità per il preriscaldamento dell'aria (*pre-heater/hot stoves*) dove avviene la combustione dei gas caldi di ricircolo;
- Un forno a tino, o *Shaft Furnace*, dove avviene il processo DR (Midrex), che consiste nella rimozione di ossigeno da materiale ferroso (rottami, minerali di ferro) direttamente nel loro stato solido. Il prodotto solido che si ottiene (HDRI/hot metals) è poi impiegato per la produzione di acciaio con forno elettrico ad arco. Il materiale di alimentazione del forno a riduzione diretta è una miscela di minerali ferrosi. Mentre il minerale scende, l'ossigeno viene rimosso dal gas riducente;
- *Reformer*: Il gas riducente che fluisce controcorrente nel *Shaft Furnace*, arricchito di idrogeno e monossido di carbonio viene generato dalla reazione di *reforming* del CH<sub>4</sub>.
- EAF: Il forno elettrico ad arco viene utilizzato generalmente per convertire i rottami ferrosi (hot metals), proveniente dal *Shaft Furnace*, in acciaio. Nel forno il calore liberato da un arco elettrico

generato per ionizzazione del gas tra due elettrodi al carbonio a differente potenziale presenti all'interno del forno portano a completa fusione la carica di alimentazione. L'affinazione del materiale fino all'ottenimento dell'acciaio al grado di purezza desiderato richiede, come nel BOF, l'input di ossigeno (generato mediante ASU) e di ossidi di calcio (lime) per il controllo di basicità del processo.

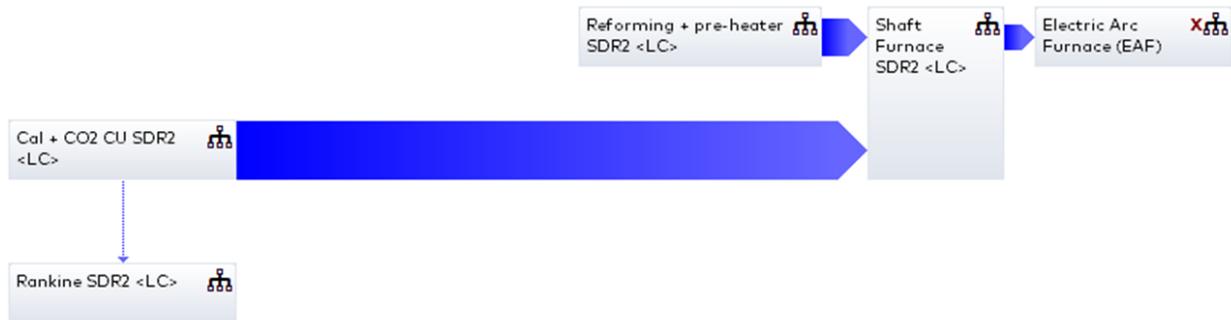
- Il processo per la produzione di DRI e la soluzione tecnica maggiormente utilizzata come alternativa al ciclo integrato BF/BOF. Per questo motivo in questo studio è stata valutata l'integrazione del Sistema CaL anche in questa configurazione per la produzione dell'acciaio. I tre sistemi analizzati sono i seguenti:
- **SDR1 (Figura 10):** quello descritto sopra, considerato come riferimento e non provvisto del processo di CaL.
- **SDR2 (Figura 11):** Rispetto a SDR1, è dotato di sistema CaL, alimentato a O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Per il trattamento dei fumi proveniente dal *pre-heater* richiede come materiale in ingresso carbonato di calcio (*limestone*) e permette il riutilizzo del sorbente spento esausto (lime) per il processo EAF.
- **SDR3 (Figura 12):** a differenza di SDR2, ipotizza il ricircolo in CaL e trattamento dei gas di scarico provenienti anche da EAF (*Electric Arc Furnace Gas – EAFG*), per massimizzare il processo di cattura della CO<sub>2</sub>. I sistemi SDR2 e SDR3, dotati di CaL, permettono il recupero del calore a cascata mediante ciclo di Rankine, portando a un ulteriore risparmio energetico nel bilancio complessivo della linea di processo.



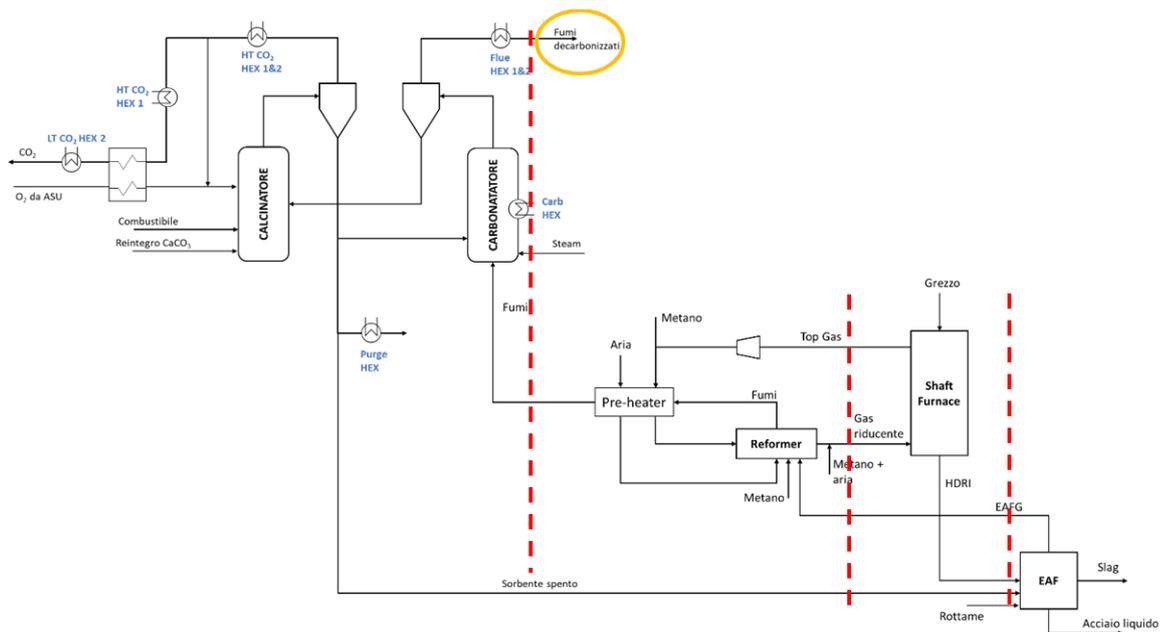
**Figura 10** - Schema del sistema SDR1 e corrispondente rappresentazione in GaBi. In rosso sono indicate le emissioni in atmosfera, senza trattamento di decarbonizzazione. Il processo di produzione di pre-ridotto preso a riferimento è quello MIDREX



**SFERO SDR2: MIDREX + CaL**  
Process plan: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



**Figura 11** - Schema del sistema SDR2 e corrispondente rappresentazione in GaBi. In rosso sono indicate le emissioni in atmosfera, senza trattamento di decarbonizzazione, in arancione quelle in uscita dal CaL.



SFERO SDR3: (MIDREX+EAF)+CaL

Process plant: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.

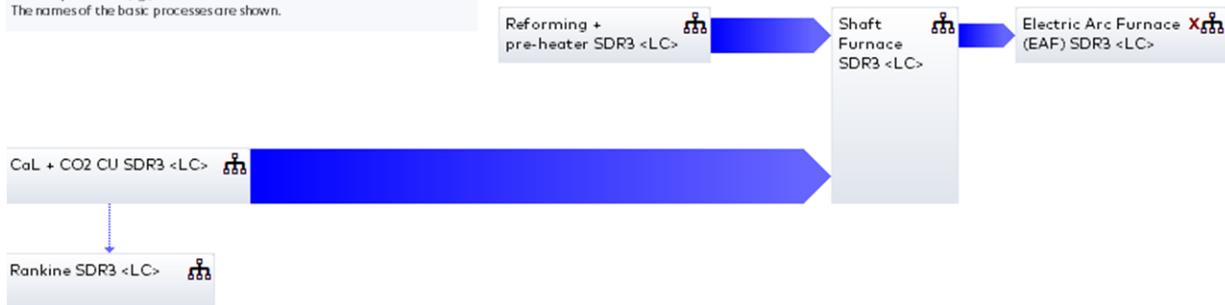


Figura 12 - Schema del sistema SDR3 e corrispondente rappresentazione in GaBi. In rosso sono indicate le emissioni in atmosfera, senza trattamento di decarbonizzazione, in arancione quelle in uscita dal CaL.

In Tabella 8, 9 e 10, sono riportati i dati di inventario utilizzato in GaBi per l’analisi LCA e la determinazione del carbon footprint dei diversi processi.

Tabella 8 – Inventario sistema SDR1. I dati per le infrastrutture dell’unità di steam reforming sono pubblicate in<sup>15</sup>.

| OPTION SDR1: MIDREX   |                |              |     |                                      |
|---|----------------|--------------|-----|--------------------------------------|
| Key details:  |                |              |     |                                      |
| Functional unit 1 tonne of liquid steel   |                |              |     |                                      |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of liquid steel production (354.87 tonnes per hour) |                |              |     |                                      |
| Reforming + pre-heater  |                |              |     |                                      |
| Input   | Type           |              | MU  | Comment                              |
| Industrial furnace, natural gas   | Ecoinvent      | 1.34E-03     | pcs | Infrastructure (timelife = 50 years) |
| CH <sub>4</sub> to furnace  | Aspen          | 8.80E-03     | t/h |                                      |
| CH <sub>4</sub> to reforming  | Aspen          | 1.36E-01     | t/h |                                      |
| CH <sub>4</sub> to end reforming  | Aspen          | 1.05E-02     | t/h |                                      |
| CH <sub>4</sub>   | Total          | 2.80E+0<br>2 | m3  | Fuel                                 |
| Concrete C25/30   | Schreiber 2020 | 1.33E-01     | t/h | Infrastructure (steam reforming)     |
| Nickel, 99.5%   | Schreiber      | 6.66E-04     | t/h | Infrastructure (steam reforming)     |

|                                      |                |          |      |  |
|--------------------------------------|----------------|----------|------|--|
|                                      | 2020           |          |      |  |
| Steel, low alloyed                   | Schreiber 2020 | 4.66E-03 | t/h  | Infrastructure (steam reforming)   |
| Steel, chromium                      | Schreiber 2020 | 1.86E-03 | t/h  | Infrastructure (steam reforming)   |
| Steel, unalloyed                     | Schreiber 2020 | 3.46E-02 | t/h  | Infrastructure (steam reforming)   |
| <b>Output</b>                        |                |          |      |  |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen          | 1.03E+00 | t/h  | Flue gas to shaft furnace (Internal exchange)  |
| O <sub>2</sub>                       | Aspen          | 1.10E-01 | t/h  | Emissions  |
| CO                                   | Aspen          | 3.36E-06 | t/h  | Emissions  |
| CO <sub>2</sub>                      | Aspen          | 3.66E-01 | t/h  | Emissions  |
| CH <sub>4</sub>                      | Aspen          | 9.11E-29 | t/h  | Emissions  |
| H <sub>2</sub>                       | Aspen          | 1.61E-07 | t/h  | Emissions  |
| H <sub>2</sub> O                     | Aspen          | 2.43E-01 | t/h  | Emissions  |
| N <sub>2</sub>                       | Aspen          | 1.22E+00 | t/h  | Emissions  |
| <b>Shaft furnace</b>                 |                |          |      |  |
| <b>Input</b>                         |                |          |      |  |
| Blast furnace production             | Ecoinvent      | 3.33E-09 | pcs  | Infrastructure (assuming a size reduced by 1/4 with respect to the blast furnace; timelife = 50 years) |
| Air compressor                       | Ecoinvent      | 1.13E-06 | pcs  | Infrastructure   |
| Iron ore                             | Aspen          | 1.11E+00 | t/h  | Raw meal   |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen          | 1.03E+00 | t/h  | Internal exchange  |
| Electricity, high voltage            | Aspen          | 5.92E+01 | kWh  | Power  |
| <b>Output</b>                        |                |          |      |  |
| Hot metals                           | Aspen          | 7.35E-01 | kg/h | Valuable product   |
| <b>Electric Arc Furnace (EAF)</b>    |                |          |      |  |
| <b>Input</b>                         |                |          |      |  |
| Electric arc furnace converter       | Ecoinvent      | 2.00E-06 | pcs  | Infrastructure   |
| Hot metals                           | Aspen          | 7.35E-01 | t/h  | Valuable product   |
| Lime                                 | Aspen          | 8.25E-02 | t/h  | Raw meal   |
| Air separation unit                  | Ecoinvent      | 1.33E-08 | pcs  | Infrastructure   |
| Oxygen                               | Aspen          | 2.12E-02 | t/h  | Fuel   |
| Electricity, high voltage            | Aspen          | 4.82E+02 | kWh  | Power  |
| <b>Output</b>                        |                |          |      |  |
| Carbon dioxide                       | Aspen          | 5.34E-02 | t/h  | Emissions  |
| Nitrogen                             | Aspen          | 2.17E-01 | t/h  | Emissions  |
| Oxygen                               | Aspen          | 5.42E-02 | t/h  | Emissions  |
| Slag                                 | Aspen          | 1.20E-01 | t/h  | Hazardous waste  |
| Steel                                | Aspen          | 1.00E+00 | t/h  | Valuable product   |

Tabella 9 – Inventario sistema SDR2. I dati per le infrastrutture dell'unità di steam reforming sono pubblicate in<sup>15</sup>.

| OPTION SDR2: MIDREX+CaL   |                |              |     |  |
|---|----------------|--------------|-----|--|
| Key details:  |                |              |     |  |
| Functional unit 1 tonne of liquid steel   |                |              |     |  |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of liquid steel production (354.87 tonnes per hour) |                |              |     |  |
| Reforming + pre-heater  |                |              |     |  |
| Input   | Type           |              | MU  | Comment  |
| Industrial furnace, natural gas   | Ecoinvent      | 1.58E-03     | pcs | Infrastructure (timelife = 50 years)   |
| CH <sub>4</sub> to furnace  | Aspen          | 1.03E-02     | t/h |  |
| CH <sub>4</sub> to reforming  | Aspen          | 1.35E-01     | t/h |  |
| CH <sub>4</sub> to end reforming  | Aspen          | 1.04E-02     | t/h |  |
| CH <sub>4</sub>   | Total          | 2.81E+0<br>2 | m3  | Fuel   |
| Concrete C25/30   | Schreiber 2020 | 1.33E-01     | t/h | Infrastructure (steam reforming)   |
| Nickel, 99.5%   | Schreiber 2020 | 6.63E-04     | t/h | Infrastructure (steam reforming)   |
| Steel, low alloyed  | Schreiber 2020 | 4.64E-03     | t/h | Infrastructure (steam reforming)   |
| Steel, chromium   | Schreiber 2020 | 1.86E-03     | t/h | Infrastructure (steam reforming)   |
| Steel, unalloyed  | Schreiber 2020 | 3.45E-02     | t/h | Infrastructure (steam reforming)   |
| Output  |                |              |     |  |
| Gas combustion flow (thermal energy)  | Aspen          | 1.03E+0<br>0 | t/h | Flue gas to shaft furnace (internal exchange)  |
| O <sub>2</sub>  | Aspen          | 1.11E-01     | t/h | Emissions  |
| CO  | Aspen          | 3.37E-06     | t/h | Emissions  |
| CO <sub>2</sub>   | Aspen          | 3.67E-02     | t/h | Emissions  |
| CH <sub>4</sub>   | Aspen          | 0.00E+0<br>0 | t/h | Emissions  |
| H <sub>2</sub>  | Aspen          | 1.61E-07     | t/h | Emissions  |
| H <sub>2</sub> O  | Aspen          | 2.45E-01     | t/h | Emissions  |
| N <sub>2</sub>  | Aspen          | 1.23E+0<br>0 | t/h | Emissions  |
| Shaft furnace   |                |              |     |  |
| Input   | Type           |              | MU  | Comment  |
| Blast furnace production  | Ecoinvent      | 3.33E-09     | pcs | Infrastructure (assuming a size reduced by 1/4 with respect to the blast furnace; timelife = 50 years) |

|                                      |             |          |           |  |
|--------------------------------------|-------------|----------|-----------|--|
| Air compressor                       | Ecoinvent   | 1.13E-06 | pcs       | Infrastructure   |
| Iron ore                             | Aspen       | 1.11E+00 | t/h       | Raw meal   |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen       | 2.67E+00 | t/h       | From CaL and steam reforming processes (internal exchange)           |
| <b>Output</b>                        |             |          |           |  |
| Hot metals                           | Aspen       | 7.35E-01 | t/h       | Valuable product (to EAF)  |
| <b>Electric Arc Furnace (EAF)</b>    |             |          |           |  |
| <b>Input</b>                         | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>   |
| Electric arc furnace converter       | Ecoinvent   | 2.00E-06 | pcs       | Infrastructure   |
| Hot metals                           | Aspen       | 7.35E-01 | t/h       | Valuable product   |
| Lime                                 | Aspen       | 1.31E-02 | t/h       | Raw meal (Partially from market and partially recirculated from CaL) |
| Air separation unit                  | Ecoinvent   | 1.33E-08 | pcs       | Infrastructure   |
| Oxygen                               | Aspen       | 2.12E-02 | t/h       | Fuel   |
| <b>Output</b>                        |             |          |           |  |
| O <sub>2</sub>                       | Aspen       | 5.36E-03 | t/h       | Emissions  |
| CO                                   | Aspen       | 9.59E-35 | t/h       | Emissions  |
| CO <sub>2</sub>                      | Aspen       | 5.33E-02 | t/h       | Emissions  |
| Nitrogen                             | Aspen       | 5.51E-02 | t/h       | Emissions  |
| Slag                                 | Aspen       | 1.20E-01 | t/h       | Hazardous waste  |
| Steel                                | Aspen       | 1.00E+03 | t/h       | Valuable product   |
| <b>CaL + CO<sub>2</sub> CU</b>       |             |          |           |  |
| <b>Input</b>                         | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>   |
| Air separation facility              | Ecoinvent   | 1.68E-10 | pcs       | Infrastructure   |
| Oxygen                               | Aspen       | 2.69E-01 | t/h       | Energy/fuel (from ASU)   |
| Air compressor                       | Ecoinvent   | 1.29E-10 | pcs       | Infrastructure   |
| Limestone                            | Aspen       | 1.65E-01 | t/h       | Raw meal   |
| CH <sub>4</sub>                      | Aspen       | 1.01E+02 | m3        | Fuel   |
| <b>Output</b>                        |             |          |           |  |
| Lime                                 | Aspen       | 6.94E-02 | t/h       | Valuable product (to EAF)  |
| CO <sub>2</sub>                      | Aspen       | 5.53E-01 | t/h       | Valuable product (compressed for storage or utilization)             |
| Thermal energy                       | Aspen       | 7.83E-01 | MW h      | Power  |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen       | 1.64E+00 | t/h       | Flue gas to shaft furnace (internal exchange)                        |
| <b>Rankine</b>                       |             |          |           |  |
| <b>Input</b>                         | <b>Type</b> |          | <b>MU</b> | <b>Comment</b>   |
| Thermal energy                       | Aspen       | 7.83E-01 | MW h      | Power  |
| Electricity, high voltage            | Aspen       | 3.69E+02 | kWh       | Power (Net balance)  |
| Power block                          | Ecoinvent   | 3.41E-08 | pcs       | Infrastructure   |

| Output                    |       |              |     |                     |
|---------------------------|-------|--------------|-----|---------------------|
| Electricity, high voltage | Aspen | 3.55E+0<br>2 | kWh | Power (Net balance) |

Tabella 10 – Inventario sistema SDR3. I dati per le *infrastructures* dell'unità di *steam reforming* sono pubblicate in<sup>15</sup>

| OPTION SDR3: (MIDREX+EAF)+CaL   |                              |          |     |   |
|---|------------------------------|----------|-----|---|
| Key details:  |                              |          |     |   |
| Functional unit 1 tonne of liquid steel   |                              |          |     |   |
| All flows are scaled to 1 tonne/h of liquid steel production (354.87 tonnes per hour) |                              |          |     |   |
| Reforming+ pre-heater   |                              |          |     |   |
| Input   | Type                         |          | MU  | Comment                                       |
| Industrial furnace, natural gas   | Ecoinvent                    | 8.59E-04 | pcs | Infrastructure (timelife = 50 years)          |
| CH <sub>4</sub> to furnace  | Aspen                        | 5.62E-03 | t/h |   |
| CH <sub>4</sub> to reforming  | Aspen                        | 1.35E-01 | t/h |   |
| CH <sub>4</sub> to end reforming  | Aspen                        | 1.04E-02 | t/h |   |
| CH <sub>4</sub>   | Total                        | 2.72E+02 | m3  | Power   |
| Concrete C25/30   | Schreiber 2020 <sup>15</sup> | 1.33E-01 | t/h | Infrastructure (steam reforming)              |
| Nickel, 99.5%   | Schreiber 2020 <sup>15</sup> | 6.63E-04 | t/h | Infrastructure (steam reforming)              |
| Steel, low alloyed  | Schreiber 2020 <sup>15</sup> | 4.64E-03 | t/h | Infrastructure (steam reforming)              |
| Steel, chromium   | Schreiber 2020 <sup>15</sup> | 1.86E-03 | t/h | Infrastructure (steam reforming)              |
| Steel, unalloyed  | Schreiber 2020 <sup>15</sup> | 3.45E-02 | t/h | Infrastructure (steam reforming)              |
| Output  |                              |          |     |   |
| Gas combustion flow (thermal energy)  | Aspen                        | 1.03E+00 | t/h | Flue gas to shaft furnace (internal exchange) |
| O <sub>2</sub>  | Aspen                        | 1.10E-01 | t/h | Emissions                                     |
| CO  | Aspen                        | 3.74E-06 | t/h | Emissions                                     |
| CO <sub>2</sub>   | Aspen                        | 4.08E-02 | t/h | Emissions                                     |
| CH <sub>4</sub>   | Aspen                        | 0.00E+00 | t/h | Emissions                                     |
| H <sub>2</sub>  | Aspen                        | 1.55E-07 | t/h | Emissions                                     |
| H <sub>2</sub> O  | Aspen                        | 2.34E-01 | t/h | Emissions                                     |
| N <sub>2</sub>  | Aspen                        | 1.21E+00 | t/h | Emissions                                     |

| Shaft furnace                        |           |          |      |  |
|--------------------------------------|-----------|----------|------|--|
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment  |
| Blast furnace production             | Ecoinvent | 3.33E-09 | pcs  | Infrastructure (assuming a size reduced by 1/4 with respect to the blast furnace; timelife = 50 years) |
| Air compressor                       | Ecoinvent | 1.13E-06 | pcs  | Infrastructure   |
| Iron ore                             | Aspen     | 1.11E+00 | t/h  | Raw meal   |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen     | 2.67E+00 | t/h  | From CaL and steam reforming processes (internal exchange)   |
| Output                               |           |          |      |  |
| Hot metals                           | Aspen     | 7.35E-01 | kg/h | Valuable product (to EAF)  |
| Electric Arc Furnace (EAF)           |           |          |      |  |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment  |
| Electric arc furnace converter       | Ecoinvent | 2.00E-06 | pcs  | Infrastructure   |
| Hot metals                           | Aspen     | 7.35E-01 | t/h  | Valuable product   |
| Lime                                 | Aspen     | 6.56E-02 | t/h  | Raw meal (Partially from market and partially recirculated from CaL)                                   |
| Air separation unit                  | Ecoinvent | 1.33E-08 | pcs  | Infrastructure   |
| Oxygen                               | Aspen     | 2.12E-02 | t/h  | Energy/fuel  |
| Output                               |           |          |      |  |
| Slag                                 | Aspen     | 1.20E-01 | t/h  | Hazardous waste  |
| Steel                                | Aspen     | 1.00E+03 | t/h  | Valuable product   |
| CaL + CO <sub>2</sub> CU             |           |          |      |  |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment  |
| Air separation facility              | Ecoinvent | 1.68E-10 | pcs  | Infrastructure   |
| Oxygen                               | Aspen     | 2.69E-01 | t/h  | Fuel (from ASU)  |
| Air compressor                       | Ecoinvent | 1.29E-10 | pcs  | Infrastructure   |
| Limestone                            | Aspen     | 1.65E-01 | t/h  | Raw meal   |
| CH <sub>4</sub>                      | Aspen     | 1.01E+02 | m3   | Fuel   |
| Output                               |           |          |      |  |
| Lime                                 | Aspen     | 1.69E-02 | t/h  | Valuable product (to EAF)  |
| CO <sub>2</sub>                      | Aspen     | 6.34E-01 | t/h  | Valuable product (compressed for storage or utilization)   |
| Thermal energy                       | Aspen     | 8.59E-01 | MWh  | Power  |
| Gas combustion flow (thermal energy) | Aspen     | 1.64E+00 | t/h  | Flue gas to shaft furnace (internal exchange)  |
| Rankine                              |           |          |      |  |
| Input                                | Type      |          | MU   | Comment  |
| Thermal energy                       | Aspen     | 8.59E-01 | MWh  | Power  |
| Electricity, high voltage            | Aspen     | 3.55E+02 | kWh  | Power (Net balance)  |
| Power block                          | Ecoinvent | 3.41E-08 | pcs  | Infrastructure   |
| Output                               |           |          |      |  |
| Electricity, high voltage            | Aspen     | 3.55E+02 | kWh  | Power (Net balance)  |

## 2.4 Valutazione degli impatti (carbon footprint)

I flussi di materiali ed energia, identificati e dettagliati nella fase di analisi di inventario (Sezione 2.3) per modellare i tre cicli di processo esaminati, sono stati associati ai fattori di caratterizzazione relativi alle categorie di impatto selezionate, mediante l'uso del software di simulazione LCA GaBi. Il metodo di

valutazione adottato per lo studio del *carbon footprint* è quello IPCC AR5, *Global Warming Potential with 100 years' timeframe (GWP100)*, tra quelli raccomandati dalla Piattaforma di riferimento Europea per l'analisi LCA (EPLCA). La metrica di riferimento per questa categoria d'impatto è il kg di CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub>eq). Tutte le emissioni rilevanti sono convertite, applicando i corrispondenti fattori di caratterizzazione definiti per la categoria d'impatto ambientale indicata, in termini di kg CO<sub>2</sub> eq. per stimare il potenziale di riscaldamento climatico esercitato dai vari processi, che possono così essere confrontati tra loro utilizzando un indicatore comune.

## 2.5 Risultati (*carbon footprint*)

Per i tre sistemi descritti nella sessione 2.3, sono state valutate le prestazioni ambientali in termini di carbon footprint. L'analisi effettuata è di tipo comparativo, per ciascun ciclo di processo, il sistema non provvisto di CaL è stato confrontato con diverse configurazioni a cui sono state integrate il processo di CaL.

### 2.5.1 Cementificio

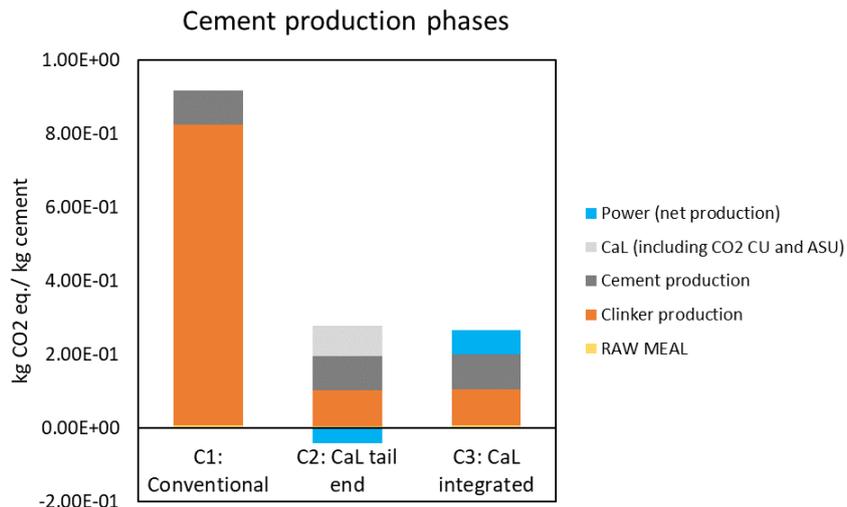
Figura 13 mostra le emissioni (dirette e indirette) delle varie fasi della linea di processo presa in esame per la produzione del cemento. Le emissioni totali per kg di cemento risultano 0.92 kg CO<sub>2</sub> eq per il sistema convenzionale. Come si nota circa l'85% delle emissioni di CO<sub>2</sub> eq è dovuta alla produzione del clinker è dovuto alla macinazione del clinker e al mescolamento degli additivi per la produzione finale del cemento. Le principali emissioni sono, quindi, associate alle fasi di produzione di clinker e cemento dove avviene la combustione di combustibile fossile (carbone) e la calcinazione, che consiste nel trattamento del carbonato di calcio e degli altri materiali grezzi (*raw meal/additives*) in ingresso al forno, per decomporre ad alta temperatura, il carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>) e, in minor quantità, il carbonato di magnesio (MgCO<sub>3</sub>) rispettivamente in ossido di calcio (CaO) e ossido di magnesio (MgO).

Il rimanente 15% delle emissioni di CO<sub>2</sub> eq è da imputarsi alla fase finale del ciclo produttivo. Questa fase consiste nella macinazione in un mulino insieme a quantitativi variabili di solfati di calcio (tipicamente 0.05 t per tonnellata di cemento<sup>16</sup>) per ottenere il tipo di cemento desiderato. Talvolta, durante questa fase si aggiungono altri materiali (calcare, scorie di altoforno, ceneri volanti, pozzolana naturale o materiali industriali pozzolanici) per ottenere cementi con diverse caratteristiche di indurimento. La fase finale richiede solo energia elettrica e assorbe circa il 38% dell'elettricità richiesta dal cementificio (Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: trying to look ahead; Cement Sustainability, 2009) in tutto il ciclo produttivo. La scelta del sistema di macinazione è determinata dal tipo di cemento da produrre. Al momento il mulino verticale a rulli, che consente rilevanti aggiunte di minerali, risulta essere la tecnologia che consente la maggiore efficienza energetica con consumi di elettricità di circa 7-8 kWh per tonnellata di materia da macinare<sup>17,18</sup> rispetto ai 14-15 kWh/ t tipica dei mulini a palle.

Per i sistemi decarbonizzati le emissioni di CO<sub>2</sub> eq si riducono a circa 0.2-0.3 kg CO<sub>2</sub> eq. Tale risultato è in accordo con uno studio recente di LCA che compara un cementificio tradizionale con e senza CaL in diverse configurazioni di combustibile utilizzato<sup>12</sup>.

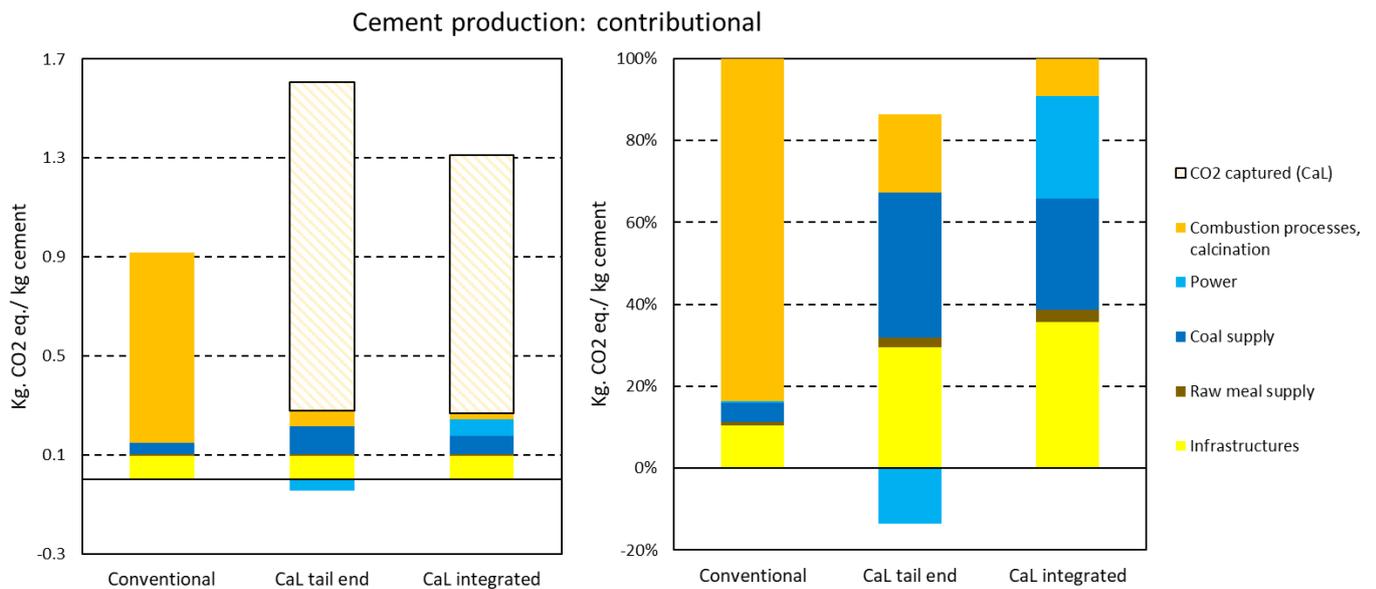
Nel processo di CaL la rigenerazione del sorbente mediante calcinazione di materiale esausto richiede energia termica che si ottiene dalla combustione del carbone e determina quindi un maggiore utilizzo di combustibile rispetto al sistema convenzionale, che però viene bilanciato, in termini di kg CO<sub>2</sub> eq dalla cattura della CO<sub>2</sub> dai fumi e dalla possibilità di recuperare l'energia termica attraverso un ciclo di Rankine e produrre elettricità a emissioni nulle da riutilizzare nei processi, in particolare per le fasi di trattamento meccanico per la macinazione ed omogeneizzazione dei materiali in ingresso. In Figura 13 viene riportato il bilancio netto del ciclo di Rankine, quindi alla produzione di energia elettrica prodotto dall'unità di Rankine è stata sottratta quella utilizzata per l'unità (*Air Separation Unit, ASU*) per la produzione dell'ossigeno, per la compressione della CO<sub>2</sub> pura (*Compression Unit, CU*) e per la movimentazione dei materiali. La componente negativa della voce RANKINE è dovuta alla maggiore produzione di energia elettrica dal ciclo Rankine che riduce notevolmente i consumi di energia dell'impianto prelevata dalla rete, producendo energia elettrica in eccesso che può essere, invece, esportata in rete evitando, quindi, di produrre energia elettrica da fonti convenzionali.

In C3, il processo di CaL è integrato in quello di produzione del clinker e risulta confrontabile alla configurazione C2 (CaL tail-end). La principale differenza tra le due configurazioni risiede nella diversa distribuzione delle emissioni. Il bilancio di energia è tale che a differenza del caso C2, non si ha una esportazione netta di energia elettrica. Data la natura integrata della sezione CaL al processo di produzione del clinker, le emissioni di CO<sub>2</sub> eq della cattura della CO<sub>2</sub> sono computate insieme alle emissioni dovute alla calcinazione e alla combustione che avvengono nel forno. Grazie a questa forte integrazione, le emissioni di CO<sub>2</sub> eq si riducono del 45%, confrontando C2 *clinker production* + CaL e C3 *clinker production* (in cui il CaL è integrato e di conseguenza i suoi input e output sono stati inseriti in GaBi nello stesso blocco).



**Figura 13** - Risultati analisi LCA per la categoria d'impatto GWP100 differenziata per le diverse fasi del processo di produzione del cemento. CaL: Calcium Looping, include ASU: Air Separation Unit; CO<sub>2</sub> CU: CO<sub>2</sub> Compression Unit.

In Figura 14 sono riportati i contributi delle diverse categorie principali di emissione, associate ai processi esaminati. La combustione di combustibili fossili e il processo di calcinazione, rappresentano più dell'80% di emissioni, ma con l'introduzione del processo CaL il contributo di queste due fasi del ciclo produttivo si abbatta drasticamente di oltre il 90% in C2 e C3. L'incremento emissivo legato all'uso di combustibile e di infrastrutture, richiesto dall'integrazione del processo CaL in C2 e C3, risulta del 158% e del 63.8%, rispettivamente, ma è ampiamente dentro i margini del miglioramento determinato dalla cattura della CO<sub>2</sub> in seguito al trattamento dei fumi col sorbente a base di calcio.

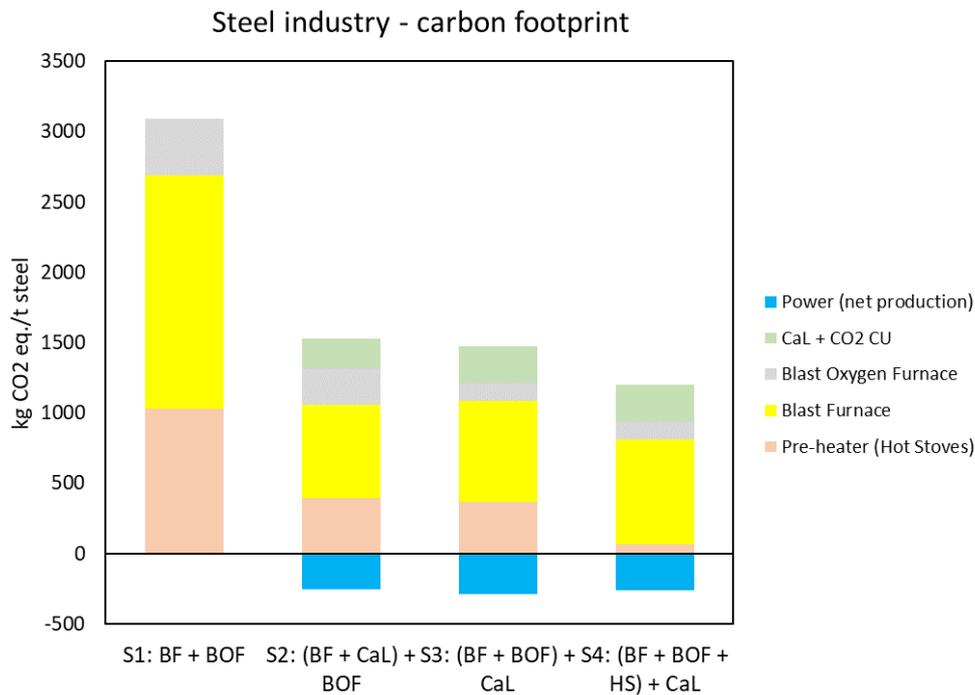


**Figura 14** - Risultati dell'analisi LCA contributiva (*contributivational*) per la categoria d'impatto GWP100. Le categorie di emissione prese in considerazione si riferiscono alla linea di processo del cemento: emissione diretta dai processi di combustione/calcinazione (*combustion processes, calcination*); emissioni associate all'utilizzo di elettricità (*power*) e combustibile (*coal*); emissioni legate all'approvvigionamento di materiali (*raw meal*); emissioni legate alla costruzione delle infrastrutture necessarie considerando una durata di vita di 20 o 50 anni come riportato in inventario (*infrastructures*).

### 2.5.2 Acciaieria con altoforno tradizionale e fornace ad ossigeno

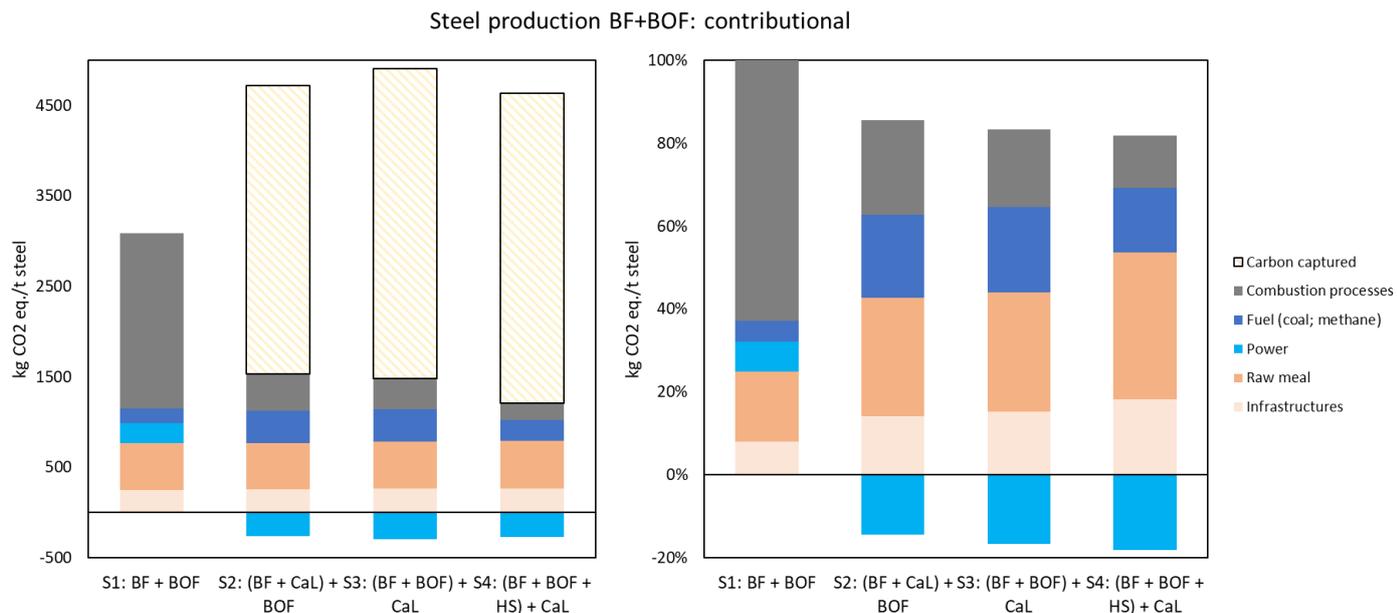
In Figura 15 sono riportate le emissioni (dirette e indirette) delle varie fasi della linea di processo presa in esame per la produzione di acciaio mediante *Blast Furnace* (BF) combinata con *Blast Oxygen Furnace* (BOF). Il ciclo integrale BF – BOF è quello predominante per la produzione di acciaio e occupa il 70% del mercato. Le emissioni sono dentro l'intervallo 1.6 – 2.2 t CO<sub>2</sub>/t acciaio di diversi studi<sup>19</sup>. Nelle simulazioni di processo e nell'analisi di inventario, sono stati considerati tre principali punti di emissioni dirette in atmosfera: (i) *Pre-heater* (*hot stoves*), (ii) BF e (iii) BOF. In S1 i fumi non sono trattati, in S2 sono trattati i fumi provenienti da BF (BFG), in S3 anche quelli da BOF (BOFG) e infine la configurazione S4 è caratterizzata dalla sostituzione del gas d'altoforno con il gas d'altoforno decarbonizzato nel preriscaldamento dell'aria calda al forno (*Pre-heater*). Queste diverse configurazioni sono state scelte in modo da determinare un abbattimento progressivo delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalenti. L'introduzione del ciclo a vapore Rankine esalta ancora di più l'abbattimento di CO<sub>2</sub> eq, permettendo il recupero di calore e la produzione di energia per uso interno allo stabilimento siderurgico. Come evidenziato nel caso del cementificio, le configurazioni scelte sono tali da avere una esportazione netta di energia elettrica prodotta evitando quindi di produrre energia elettrica da fonti convenzionali. L'introduzione del CaL anche se comporta un aumento dell'energia specifica per evitare parte delle emissioni di CO<sub>2</sub>, dal punto di vista delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> si ha un beneficio netto. Come si nota dalla figura 15, quasi il 50% di CO<sub>2</sub>eq viene abbattuto nel caso delle configurazioni S2 e S3 rispetto al benchmark S1.

L'alternativa S4 prevede la sostituzione del BFG tal quale con il BFG decarbonizzato. Generalmente, il BFG tal quale (potere calorifico varia da circa 2,7 a circa 4.0 MJ/Nm<sup>3</sup>) in miscela con metano o gas di cockeria viene utilizzato come combustibile nel processo di preriscaldamento dell'aria inviata all'altoforno. Questo gas viene bruciato in una delle due camere che compone il *pre-heater* ed il fumo caldo, così prodotto, preriscalda la seconda camera. Terminata questa fase l'aria calda viene fatta fluire attraverso questa seconda camera portandosi ad una temperatura che varia dai 900 a 1350 °C. Come mostra la figura 15, la sostituzione del BFG con il BFG decarbonizzato ha un effetto positivo sul bilancio totale di CO<sub>2</sub> eq emesse portando la riduzione delle emissioni climalteranti da 50% come nel caso S2 e S3 a quasi il 60% rispetto alla configurazione convenzionale S1.



**Figura 15** – Risultati analisi LCA per la categoria d’impatto GWP100 differenziata per le diverse fasi di processo per la produzione di acciaio ad altoforno (*Blast Furnace - BF*) combinato con forno ad ossigeno basico (*Blast Oxygen Furnace - BOF*).

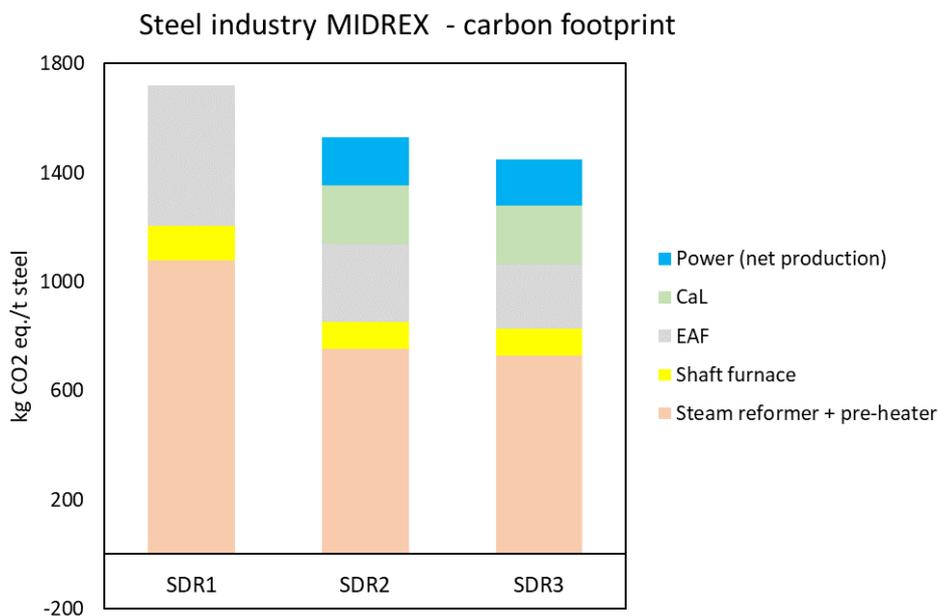
La Figura 16 riporta il contributo alle emissioni suddiviso per categoria rilevante e mostra anche le emissioni evitate in seguito alla cattura della CO<sub>2</sub>. Si evidenzia che l’introduzione del CaL determina un progressivo abbattimento delle emissioni dirette (*combustion processes*). Infatti si registra una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> eq del 79%, da S1 a S2, dell’83%, da S1 a S3, e del 90%, da S1 a S4. Da notare la diversa ripartizione delle emissioni di CO<sub>2</sub>: La sorgente di carbonio si sposta dalla categoria d’impatto *combustion processes* alla categoria *raw meal* e *infrastructures* come mostrato nei casi S2, S3, S4. Alle emissioni dirette evitate si aggiungono quelle indirette, dovute al ciclo a vapore Rankine, e che mostrano una riduzione per i consumi di energia elettrica (*Power*) e per l’approvvigionamento del combustibile (*Fuel*) pari al 74%, 82% e 110%, rispettivamente. I combustibili impiegati in questa linea di processo sono il metano per generare, all’interno degli *hot-stoves*, l’energia termica che viene poi fornita alla BF, e il carbone (*coal*), per il processo di calcinazione che avviene nel CaL. Nella configurazione S4, avviene una riduzione significativa di utilizzo dei combustibili (36% in meno rispetto a S3), perché nelle simulazioni di processo si è ipotizzato un aumento della quantità di BFG decarbonizzato trasferito all’unità degli *hot-stoves* come combustibile alternativo del metano fino ad azzerare il consumo di quest’ultimo. L’aumento delle emissioni associate all’impiego di infrastrutture aggiuntive con l’introduzione di CaL e di *Rankine* contribuiscono per meno dell’1% rispetto alle emissioni totali di S1 e si possono quindi considerare trascurabili. Le infrastrutture prese in considerazione nell’analisi di inventario sono quelle riportate in Tabella 4, 5, 6 e 7: per il CaL e il Rankine sono le strutture per la compressione di gas (*air compressor*), il separatore per la produzione di ossigeno (*air separation facility*) e la turbina a vapore per il ciclo di Rankine (*power block*). Non risultano differenze significative nelle emissioni dovute dall’approvvigionamento dei materiali (*raw meal*) tra i diversi sistemi.



**Figura 16** – Risultati dell’analisi LCA contributiva (*contributivational*) per la categoria d’impatto GWP100. Le categorie di emissione prese in considerazione si riferiscono alla linea di processo altoforno (BF) combinata con forno ad ossigeno basico (BOF): emissione diretta dai processi di combustione (*combustion processes*); emissioni associate all’utilizzo di elettricità (*power*) e l’approvvigionamento del combustibile (*fuel*); emissioni legate all’approvvigionamento di materiali (*raw meal*); emissioni legate alla costruzione delle infrastrutture necessarie, prendendo come riferimento una durata di vita di 20-50 anni (*infrastructures*).

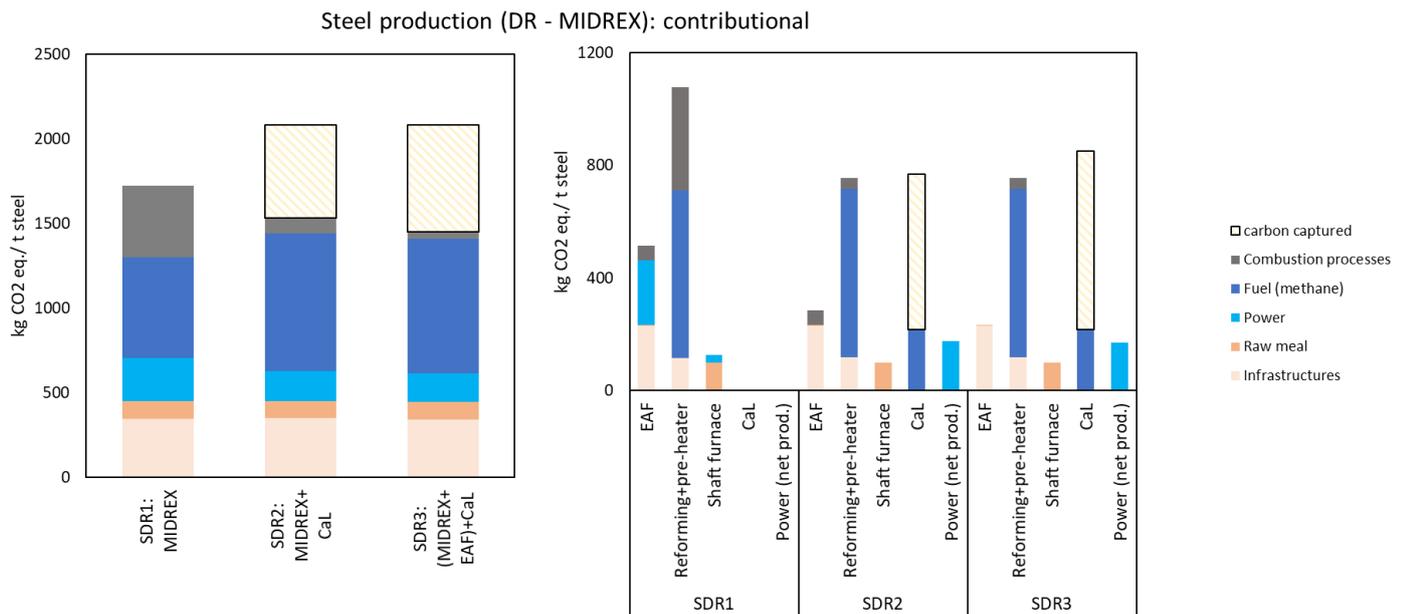
### 2.5.3 Acciaieria a riduzione diretta e processo ad arco elettrico

In Figura 17 sono riportate le emissioni (dirette e indirette) delle varie fasi della linea di processo presa in esame per la produzione di acciaio mediante processo a riduzione diretta (MIDREX: vedi figura 10) combinato con processo ad arco elettrico. Nelle simulazioni di processo e nell’analisi di inventario, sono stati considerati due principali punti di emissioni dirette in atmosfera: Il *pre-heater* e l’EAF. I fumi derivanti dai processi fortemente emissivi che avvengono nella fase di riduzione diretta (*Shaft Furnace*), sono riciclati nel *pre-heater*, per i processi di preriscaldamento: (i) dell’aria da utilizzare come comburente in processi combustivi e fornire l’energia al reforming del metano, (ii) del metano da riformare in CO e H<sub>2</sub>, (iii) del gas d’altoforno. L’integrazione del processo CaL prevede il trattamento dei fumi, per la cattura della CO<sub>2</sub>, provenienti dalla fase di preriscaldamento (SDR2), e dalla fase di preriscaldamento e di EAF (SDR3). Queste due alternative prevedono il recupero di cascami termici per la produzione interna di energia elettrica a emissioni nulle di CO<sub>2</sub> mediante un ciclo a vapore ciclo di Rankine. Come riportato in Figura 17 nonostante il processo CaL abbia un costo, in termini emissivi di kg CO<sub>2</sub> eq. pari al 13% (sia per SDR2 che per SDR3) rispetto alle emissioni totali del sistema di riferimento senza CaL (SDR1), si assiste ad una riduzione globale delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente pari a circa l’11% e il 16%, per SDR2 e SDR3, rispettivamente. La fase di processo che più viene impattata dall’utilizzo del processo CaL è quella di produzione di gas riducenti mediante *steam reformer* che riduce il suo potenziale emissivo di circa il 30-35%.



**Figura 17** - Risultati analisi LCA per la categoria d'impatto GWP100 differenziata per le diverse fasi di processo per la produzione di acciaio a riduzione diretta MIDREX. Le emissioni di CO<sub>2</sub> eq dovute alla sezione di compressione (CO<sub>2</sub> compression unit) sono state imputate al modulo CaL.

Come mostrato in Figura 18, in questo ciclo produttivo a DR le emissioni di CO<sub>2</sub> sono generalmente minori se confrontate con quelle di un ciclo integrale BF/BOF (riportate in Figura 15), perché non viene richiesta alcuna fase di agglomerazione né di produzione del coke, quindi il processo risulta già ben ottimizzato sul piano delle emissioni dirette (*combustion processes*), e un contributo emissivo maggiore del 50% è associato all'approvvigionamento di combustibile ed energia elettrica. L'introduzione del CaL, influisce poco in termini di emissioni riconducibili alle fasi di approvvigionamento di materie prime (*raw meal*: minerali di ferro, ossidi di calcio e altri additivi) e le infrastrutture (*infrastructures*). *Raw meal* e *infrastructures* contribuiscono rispetto alle emissioni totali del 26%, 29% e 31%, in SDR1, SDR2 e SDR3, rispettivamente. Si vede come l'alternativa SDR3 sembra avere il potere emissivo inferiore. Questo è dovuto al riuso del materiale sorbente esausto direttamente nel forno ad arco elettrico. In particolare per ogni incremento di 100 °C della temperatura del sorbente esausto alimentato, la richiesta di energia elettrica diminuisce di circa 20 kWh/t LS. Quindi i nuovi processi di caricamento a caldo (600 °C) possono portare ad una riduzione totale dell'energia elettrica di circa 120 kWh per tonnellata di acciaio liquido con le relative riduzioni delle emissioni di CO<sub>2</sub> ad essa associate.



**Figura 18** - Risultati dell'analisi LCA contributiva (*contributivational*) e per la categoria d'impatto GWP100. Le categorie di emissione prese in considerazione si riferiscono alla linea di processo a riduzione diretta MIDREX: emissione diretta dai processi di combustione (*combustion processes*); emissioni associate all'utilizzo di elettricità (*power*) e all'approvvigionamento del combustibile (*fuel*); emissioni legate all'approvvigionamento di materiali (*raw meal*); emissioni legate alla costruzione delle infrastrutture necessarie, prendendo come riferimento una durata di vita di 20-50 anni (*infrastructures*). Nel grafico a barre di destra il contributo è anche dettagliato per le fasi principali sulla base delle simulazioni di processo.

### 3 Conclusioni e raccomandazioni

In questo lavoro è stato valutato il potenziale di decarbonizzazione dell'industria per la produzione di acciaio e cemento con l'integrazione del processo di *Calcium Looping*, considerando l'intero ciclo di vita, dalla fornitura delle materie prime e del combustibile, fino al prodotto finito (1kg di cemento e 1t di acciaio), e tenendo conto anche del tempo di vita delle infrastrutture che costituiscono le diverse unità operative degli impianti. Tre linee di processo sono state prese in esame per l'analisi riproducendo i flussi elementari di materia ed energia delle varie fasi di processo mediante Aspen plus. I risultati delle simulazioni, combinati con dati disponibili in letteratura, sono stati utilizzati come input per la valutazione del *Global Warming Potential* (kg CO<sub>2</sub> eq.) dei diversi *pathways* applicando il metodo standardizzato IPCC AR5 GWP100, che risulta tra quelli indicati dall' *International Reference Life Cycle Data System - ILCD*. La scelta del Calcium Looping, tra le diverse tecniche di cattura della CO<sub>2</sub> disponibili in letteratura, è considerata particolarmente favorevole per questi due settori industriali, che sono già predisposti per la movimentazione di materiali in forma granulare e possiedono le infrastrutture per il trattamento di alcune materie prime utilizzate per la cattura della CO<sub>2</sub> (i.e., *limestone, dolomite*).

I seguenti tre casi studio sono stati presi in esame per l'analisi riproducendo i flussi elementari di materia ed energia delle varie fasi di processo mediante simulazioni con Aspen plus:

- 1) Cementificio tradizionale (CEMENT);
- 2) Altoforno combinato con forno a ossigeno (BF-BOF);
- 3) Riduzione diretta con forno ad arco elettrico (DR-EAF).

I risultati hanno riscontrato una riduzione significativa dei valori di emissione di kg CO<sub>2</sub> eq, sia per i cicli produttivi del cemento che per l'acciaio (Tabella 11).

**Tabella 11 – Risultati riassuntivi dell’analisi LCA in termini di emissioni totali ed evitate di kg di CO<sub>2</sub> eq. (IPCC AR5 GWP100) per le linee di processo prese in esame.**

|  |                 | Benchmark | Calcium Looping (Conf. I) | Calcium Looping (Conf. II) | Calcium Looping (Conf. III) |
|--|-----------------|-----------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| <b>[kg CO<sub>2</sub> eq/kg cemento]</b> | Total emissions | 0.919     | 0.235 <b>(-74%)</b>       | 0.267 <b>(-71%)</b>        |                             |
|  | Carbon avoided  |           | 0.684                     | 0.651                      |                             |
| <b>[t CO<sub>2</sub> eq/t acciaio]</b>   | Total emissions | 3.090     | 1.277 <b>(-59%)</b>       | 1.184 <b>(-62%)</b>        | 0.940 <b>(-70%)</b>         |
|  | Carbon avoided  |           | 1.813                     | 1.906                      | 2.151                       |
| <b>[t CO<sub>2</sub> eq/t acciaio]</b>   | Total emissions | 1.720     | 1.529 <b>(-11%)</b>       | 1.448 <b>(-16%)</b>        |                             |
|  | Carbon avoided  |           | 0.191                     | 0.273                      |                             |

Confrontando le due linee di produzione dell’acciaio, la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> nella linea DR - EAF risulta meno marcata rispetto alla linea BF – BOF in quanto in quest’ultima si è analizzato l’uso del BFG come combustibile alternativo negli *hot-stoves*. Nell’ottica di implementare il processo di *Calcium Looping* nel settore per la produzione di ferro e acciaio, bisogna quindi tenere presente che i margini di miglioramento degli impatti ambientali, in termini di *Global Warming Potential*, dipendono anche dalla riduzione dell’approvvigionamento di fonti fossili di energia e da un incremento nel riuso di gas prodotti e decarbonizzati all’interno dello stabilimento. Si sottolinea infine che i due cicli produttivi, DR – EAF e BF – BOF, non sono da intendersi come in competizione tra loro e confrontabili, perché presentano sostanziali differenze nel *feedstock* puntando a mercati differenti.

Il *Calcium Looping* si conferma una tecnologia promettente per la riduzione del *Global Warming Potential* in acciaierie e cementifici sia in modalità post-combustione, per l’upgrading di impianti pre-esistenti, che integrato in nuovi *concept* di cicli produttivi. Oltre alla categoria d’impatto *Climate Change*, meriterebbe un’ulteriore approfondimento la valutazione degli impatti sulla salute pubblica, categoria d’impatto *Human Health*, in particolare per quanto riguarda i rifiuti solidi ricchi di metalli pesanti da smaltire come rifiuti speciali e prodotti in grandi quantità, e le emissioni in atmosfera di particolato atmosferico (PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>) primario e secondario. In merito a queste ultime analisi sarebbero utili ulteriori studi più completi sulla caratterizzazione delle emissioni in presenza e non di abbattitori degli inquinanti, non solo limitati alle componenti gassose.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. IEA. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking. available: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
2. IEA. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry.
3. Romano, M. C. *et al.* Process simulation of Ca-looping processes : review and guidelines. *Energy Procedia* **37**, 142–150 (2013).
4. Stendardo, S. & Luisetto, I. *Potenziale di mitigazione delle emissioni di CO2 attraverso la cattura , il riuso e la rimozione del carbonio dall ’ aria : applicazione di tecnologie a basse emissioni di CO2 a*

- industrie energivore*. (2019).
5. Blamey, J., Anthony, E. J., Wang, J. & Fennell, P. S. The calcium looping cycle for large-scale CO<sub>2</sub> capture. *Prog. Energy Combust. Sci.* **36**, 260–279 (2010).
  6. Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R. B. H., Christiansen, K. & Klüppel, H. Commentaries The New International Standards for Life Cycle Assessment : ISO 14040 and ISO 14044. **11**, 80–85 (2006).
  7. 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.
  8. Bardow, A. & Green, D. *Low-Carbon Process Industries Through Energy Efficiency and Carbon Dioxide Utilisation*. (2017). doi:10.2777/175882.
  9. 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.
  10. Ferrario, D., Lanzini, A., Marchese, M., Guelpa, E. & Verda, V. *Analisi tecno-economica di processi basati sulla tecnologia calcium looping per la decarbonizzazione di cementifici e acciaierie - RdS\_PTR\_2020\_080*. (2021).
  11. Tesio, U., Guelpa, E. & Verda, V. Energy Conversion and Management : X Integration of thermochemical energy storage in concentrated solar power . Part 1 : Energy and economic analysis / optimization. *Energy Convers. Manag. X* **6**, 100039 (2020).
  12. Schakel, W. *et al.* Impact of fuel selection on the environmental performance of post-combustion calcium looping applied to a cement plant. *Appl. Energy* **210**, 75–87 (2018).
  13. Gardarsdottir, S. O. *et al.* Comparison of Technologies for CO<sub>2</sub> Capture from Cement Production — Part 2 : Cost Analysis. doi:10.3390/en12030542.
  14. De Lena, E. *et al.* Techno-economic analysis of calcium looping processes for low CO<sub>2</sub> emission cement plants. *Int. J. Greenh. Gas Control* **82**, 244–260 (2019).
  15. Schreiber, A., Peschel, A., Hentschel, B. & Zapp, P. Life Cycle Assessment of Power-to-Syngas: Comparing High Temperature Co-Electrolysis and Steam Methane Reforming. *Front. Energy Res.* **8**, 1–17 (2020).
  16. Scalet, B. M., Serge, R. & Luis, D. S. *Best Available Techniques ( BAT ) Reference Document for the Production of Cement , Lime and Magnesium Oxide*. (2013). doi:10.2788/12850.
  17. European Cement Research Academy. *Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing : Trying to Look Ahead*. (2017).
  18. Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S. & Rahim, N. A. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **15**, 2042–2060 (2011).
  19. Chisalita, D. *et al.* Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO<sub>2</sub> capture and storage using the LCA methodology. *J. Clean. Prod.* **211**, 1015–1025 (2019).