

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il territorio - Environmental
and Land Planning Engineering



Analisi del ciclo di vita di una tecnologia per la cattura e stoccaggio di CO₂

Relatore: Prof. Stefano Caserini

Correlatore: Ing. Francesco Pietro Campo

Candidato:

Daniele Fusco

Matr. 944149

Anno accademico 2021/2022

INDICE

Indice delle figure	III
Indice delle tabelle	V
SOMMARIO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
SOMMARIO E CONCLUSIONI	IX
1. INTRODUZIONE	1
1.1 Accordi e obiettivi.....	3
1.2 Tecnologie per far fronte agli obiettivi.....	4
1.3 Analisi del ciclo di vita.....	6
2. DESCRIZIONE DELLA TECNOLOGIA BUFFERED ACCELERATED WEATHERING OF LIMESTONE E CONFIGURAZIONI ESAMINATE	7
2.1 Buffered Accelerated Weathering of Limestone.....	7
2.2 Alcalinizzazione	9
2.3 Configurazioni analizzate.....	11
3. ANALISI DEL CICLO DI VITA.....	16
3.1 Struttura della metodologia LCA	16
3.2 Fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione	17
4. INVENTARIO DEL CICLO DI VITA	25
4.1 Flusso gassoso e acqua dall'oceano	25
4.2 Produzione del carbonato di calcio	26
4.3 Trasporto del calcare	27
4.4 Costruzione dell'impianto	28
4.5 Consumo acqua	31
4.6 Consumo energetico	32
4.7 Processo OL	34
5. RISULTATI.....	36
5.1 Analisi dei contributi.....	41
5.2 Focus sul cambiamento climatico	43
6. ANALISI DI SENSITIVITÀ.....	45
6.1 Focus sul cambiamento climatico	49
6.2 Analisi del fattore di emissione dell'elettricità.....	51
7. CONCLUSIONI E FUTURE RICERCHE	54
8. BIBLIOGRAFIA	57

Appendice 65
Figure 65
Tabelle 71

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Variazioni della temperatura superficiale globale (media decadale) ricostruita (1-2000) e osservata (1850-2020) riferite al periodo 1850-1900 (IPCC,2021).	2
Figura 1.2 – Proiezione delle emissioni globali annuali di CO ₂ in rispetto dell'obiettivo dell'Accordo di Parigi (Rockström et al., 2017).	3
Figura 2.1 – Schema rappresentativo di un impianto BAWL.....	9
Figura 2.2 – Esempio di scarico di Ca(OH) ₂ via nave e principali fenomeni che si verificano in tempi brevi.	10
Figura 2.3 – Percentuali di CO ₂ catturata e stoccata dall'impianto per le 4 configurazioni.	12
Figura 2.4 – Processo BAWL.	13
Figura 2.5 – Processo BAWL (riquadro blu) combinato con il processo di alcalinizzazione degli oceani (riquadro rosso).....	13
Figura 2.6 – Schema dell'impianto BAWL per le configurazioni A, B e C.....	14
Figura 2.7 – Schema dell'impianto BAWL per la configurazione D.	14
Figura 2.8 – Schema dell'impianto BAWL-OL per le configurazioni A, B e C.....	15
Figura 2.9 – Schema dell'impianto BAWL-OL per la configurazione D.	15
Figura 3.1 – Struttura della metodologia LCA	17
Figura 3.2 – Schema del processo (impianto BAWL).	19
Figura 3.3 – Schema del processo (impianto BAWL-OL).....	19
Figura 4.1 – Schema del miscelatore.	29
Figura 5.1 – Analisi dei contributi della configurazione A (BAWL).	42
Figura 5.2 – Analisi dei contributi della configurazione A (BAWL-OL).....	43
Figura 5.3 – Analisi dei contributi della categoria d'impatto 'Cambiamento climatico' (BAWL)...	44
Figura 5.4 – Analisi dei contributi della categoria d'impatto 'Cambiamento climatico' (BAWL-OL).	44
Figura 6.1 – Analisi dei contributi dell'impianto BAWL per la categoria "Cambiamento climatico".	50
Figura 6.2 – Analisi dei contributi dell'impianto BAWL-OL per la categoria "Cambiamento climatico".	51
Figura 6.3 – Efficienza di stoccaggio del BAWL in funzione del fattore di emissione dell'elettricità (FE _{el}).	52
Figura 6.4 – Efficienza di rimozione del BAWL-OL in funzione del fattore di emissione dell'elettricità (FE _{el}).	53

Figura 0.1 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione A del BAWL (in rosso l'unità funzionale).	65
Figura 0.2 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione B del BAWL (in rosso l'unità funzionale).	65
Figura 0.3 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione C del BAWL (in rosso l'unità funzionale).	65
Figura 0.4 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione D del BAWL (in rosso l'unità funzionale).	66
Figura 0.5 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione A+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).	66
Figura 0.6 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione B+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).	66
Figura 0.7 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione C+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).	67
Figura 0.8 – Bilancio di massa della CO ₂ nella configurazione D+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).	67
Figura 0.9 – Analisi dei contributi della configurazione B (BAWL).	67
Figura 0.10 – Analisi dei contributi della configurazione C (BAWL).	68
Figura 0.11 – Analisi dei contributi della configurazione D (BAWL).	68
Figura 0.12 – Analisi dei contributi della configurazione B (BAWL-OL).	69
Figura 0.13 – Analisi dei contributi della configurazione C (BAWL-OL).	69
Figura 0.14 – Analisi dei contributi della configurazione D (BAWL-OL).	70

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 : Parametri principali del BAWL considerato nelle quattro configurazioni	12
Tabella 3.1 : Categorie d’impatto del metodo EF method considerate nello studio.	21
Tabella 4.1 : Dati di Inventario dei flussi annuali di CO ₂ stoccata.	25
Tabella 4.2 : Dati d’inventario per il flusso gassoso e acqua dall’oceano	26
Tabella 4.3 : Dati dell’inventario del quantitativo di carbonato di calcio (CaCO ₃) necessario per ciascun processo in ciascuna configurazione. (kg CaCO ₃ /UF).....	27
Tabella 4.4 : Tipologia di trasporto.....	28
Tabella 4.5 : Dati di inventario per il miscelatore.....	29
Tabella 4.6 : Dati di inventario per l’emissione di CO ₂	30
Tabella 4.7 : Dati d’inventario per il compressore e le pompe.....	30
Tabella 4.8 : Caratteristiche della condotta DR nelle quattro configurazioni. (De Marco et al., 2022)	31
Tabella 4.9 : Caratteristiche della condotta SL nelle quattro configurazioni. (De Marco et al., 2022)	31
Tabella 4.10 : Dati d’inventario per le condotte.	31
Tabella 4.11 : Consumo annuale di acqua di rete per ciascuna configurazione, espresso in m ³	32
Tabella 4.12 : Fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell’energia elettrica in Italia.	32
Tabella 4.13 : Energia consumata annualmente dai processi per le quattro configurazioni in un impianto BAWL.....	33
Tabella 4.14 : Energia consumata annualmente dai processi per le quattro configurazioni in un impianto BAWL–OL	34
Tabella 4.15 : Dati d’inventario per il processo OL.	35
Tabella 5.1 : Impatti totali dei quattro scenari per l’impianto BAWL.....	36
Tabella 5.2 : Efficienze di stoccaggio della CO ₂ dell’impianto BAWL per le quattro configurazioni.	37
Tabella 5.3 : Impatti totali dei quattro scenari per l’impianto BAWL, rapportati al valore maggiore per ciascuna categoria di impatto ed espressi in percentuale (%).	38
Tabella 5.4 : Impatti totali dei quattro scenari per l’impianto BAWL–OL.	39
Tabella 5.5 : Efficienze di stoccaggio della CO ₂ dell’impianto BAWL–OL per le quattro configurazioni.	39

Tabella 5.6 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL–OL, rapportati al valore maggiore per ciascuna categoria di impatto ed espressi in percentuale (%).	40
Tabella 6.1 : Fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica.	45
Tabella 6.2 : Dati d'inventario del processo per lo scenario IT-RE.	46
Tabella 6.3 : Dati d'inventario del processo Ecoinvent usato per lo scenario NO.	46
Tabella 6.4 : Risultati dell'analisi di sensibilità sugli impatti totali per tutte le quattro configurazioni di un impianto BAWL espresse in percentuale rispetto al valore della corrispettiva configurazione del caso base (IT-base).	47
Tabella 6.5 : Risultati dell'analisi di sensibilità sugli impatti totali per tutte le quattro configurazioni di un impianto BAWL–OL espresse in percentuale rispetto al valore della corrispettiva configurazione del caso base (IT-base).	48
Tabella 6.6 : Efficienze di stoccaggio della CO ₂ dell'impianto BAWL per gli scenari IT-RE e NO.	49
Tabella 6.7 : Efficienze di rimozione della CO ₂ dell'impianto BAWL–OL per gli scenari IT-RE e NO.	49
Tabella 0.1 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL (IT-RE).	71
Tabella 0.2 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL (NO).	72
Tabella 0.3 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL–OL (IT-RE).	73
Tabella 0.4 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL–OL (NO).	74

SOMMARIO

Per limitare gli impatti del riscaldamento globale, con l'Accordo di Parigi (2015) si è posto a livello internazionale l'obiettivo di contenere l'aumento delle temperature "ben al di sotto di 2°C", che richiede una rapida e drastica riduzione delle emissioni di gas climalteranti accompagnata da una rimozione ingente di CO₂ dall'atmosfera. Questo lavoro di tesi valuta, attraverso la metodologia dell'Analisi del ciclo di vita, le prestazioni ambientali della tecnologia per la cattura e lo stoccaggio di CO₂ *Buffered Accelerated Weathering of Limestone* (BAWL) che stocca CO₂ sotto forma di ioni di bicarbonato in acque marine attraverso l'uso di CaCO₃ micronizzato e di Ca(OH)₂. Sono stati valutati gli impatti di due diverse applicazioni per la cattura e lo stoccaggio di 1 kgCO₂, assunta come unità funzionale (UF) del sistema, proveniente nel primo caso da un flusso gassoso di una fonte esterna al sistema, nel secondo caso dalla produzione di Ca(OH)₂ finalizzata a rimuovere CO₂ dall'atmosfera attraverso il processo di alcalinizzazione degli oceani. Per entrambe le applicazioni sono stati determinati e confrontati i potenziali impatti ambientali in 16 categorie di impatto, in accordo alla metodologia Environmental Footprint, per 4 diverse configurazioni del BAWL differenti per caratteristiche impiantistiche (lunghezza e profondità della condotta in mare) e per le dimensioni delle particelle di CaCO₃ (10, 2 o 1 µm). La configurazione con particelle più grossolane e una condotta più lunga e profonda risulta la meno impattante nella maggioranza delle categorie di impatto e mostra le migliori efficienze di stoccaggio e di rimozione, pari rispettivamente 39% e 10%. Il contributo maggiore in tutte le categorie di impatto è dovuto ai consumi energetici che sono soddisfatti da un sistema energetico prevalentemente fossile. È stata quindi svolta un'analisi di sensitività assumendo due diversi mix energetici prevalentemente da fonti rinnovabili: mix 100% rinnovabile ipotizzato in Italia nel 2050 e l'attuale mix in Norvegia. In entrambi i casi analizzati, tutte le configurazioni ottengono efficienze superiori a 75%.

ABSTRACT

The Paris Agreement (2015) has set out an international goal to avoid dangerous impacts of global warming by limiting the temperature increase "well below 2°C", which requires a rapid and drastic reduction of greenhouse gas emissions in combination with a massive removal of CO₂ from the atmosphere. In this thesis work, the Life Cycle Analysis methodology (LCA) is used to evaluate the environmental performance of CO₂ capture and storage technology, *Buffered Accelerated Weathering of Limestone* (BAWL). The BAWL stores CO₂ as bicarbonate ions in seawater by the use of micronized CaCO₃ particles and Ca(OH)₂. Two different applications of the technology are examined, assuming the capture and storage of 1 kgCO₂ as the functional unit (FU) of the system. In the first case, CO₂ comes from a gaseous stream generated by an external source, while in the second case from the production of Ca(OH)₂ used to remove CO₂ from the atmosphere through the process of *Ocean Liming* (OL). For both applications, the potential environmental impacts are calculated and compared for 4 different BAWL configurations in 16 impact categories, according to the Environmental Footprint methodology. BAWL configurations differ in terms of plant construction characteristics (length and depth of the pipeline into the sea) and CaCO₃ particle size (10, 2 or 1 μm). The configuration with coarser particles and a longer and deeper pipeline is the lowest impacting in most of the impact categories and shows the highest efficiency of storage and remove CO₂, equal to 39% and 10%. The largest contribution in all impact categories is derived from energy consumption, which is covered by a predominantly fossil energy system. Therefore, a sensitivity analysis is carried out assuming two different energy mixes based prevalently on renewable resources: a 100% renewable mix assumed in Italy in 2050 and a current mix in Norway. In both cases examined, all configurations achieve efficiencies above 75%.

SOMMARIO E CONCLUSIONI

Le tecnologie per la cattura e lo stoccaggio del carbonio (in inglese Carbon Capture and Storage, CCS) risultano essenziali per limitare il riscaldamento a "ben al di sotto" dei 2°C, poiché, per il raggiungimento di questo obiettivo, sono richieste sia una rapida e drastica riduzione delle emissioni di gas climalteranti sia la rimozione di CO₂ dall'atmosfera nell'ordine di gigatonnellate all'anno (IPCC, 2018).

Il presente lavoro ha l'obiettivo di analizzare la tecnologia *Buffered Accelerated Weathering of Limestone*, BAWL, per valutarne l'effettiva applicazione come tecnologia di cattura e stoccaggio di CO₂ da una fonte esterna (Figura 1) o come sistema di rimozione della CO₂ combinandolo al processo di alcalinizzazione degli oceani (Figura 2).

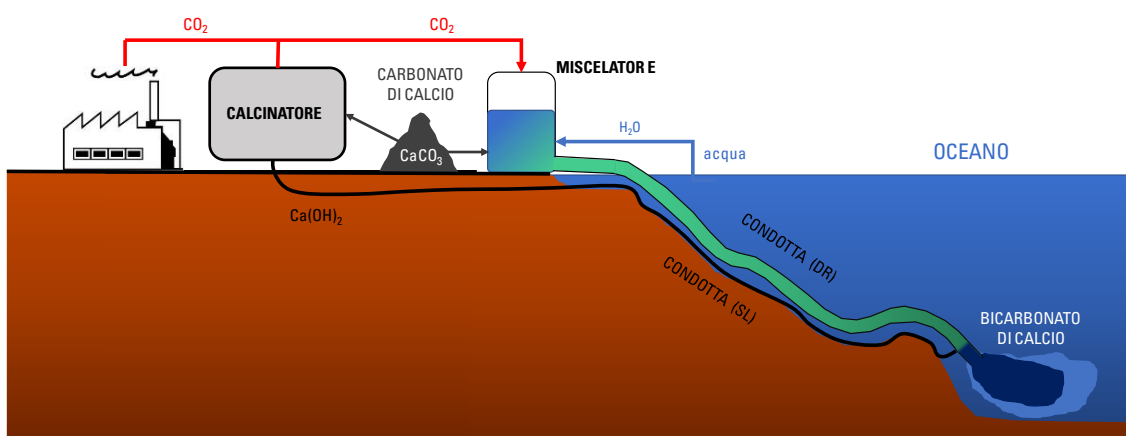


Figura 1 – Processo BAWL

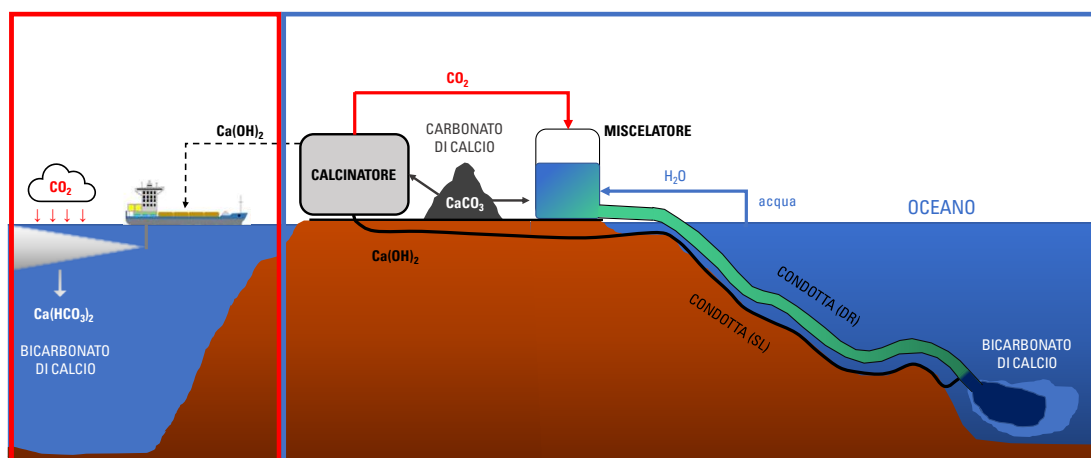


Figura 2 – Processo BAWL (riquadro blu) combinato con il processo di alcalinizzazione degli oceani (riquadro rosso).

Il BAWL è una tecnologia in fase di studio, presentata in Caserini et al. (2021b), per la cattura e lo stoccaggio di CO₂ sotto forma di ioni di bicarbonato (HCO₃⁻) in acque marine. La tecnologia consente di trattare un flusso gassoso ricco di CO₂ attraverso l'uso di particelle micronizzate CaCO₃ e di idrossido di calcio (Ca(OH)₂). Il flusso gassoso, proveniente da una fonte esterna, viene introdotto all'interno di un miscelatore per essere mescolato con acqua di mare e particolato di CaCO₃ con dimensioni dell'ordine dei micrometri. La soluzione con acqua di mare ricca di CO₂ disciolta e particolato viene trasportata in una condotta (definita reattore di dissoluzione), nel quale il CaCO₃ reagisce con una parte della CO₂ disciolta formando HCO₃⁻. La restante parte di CO₂ che non ha reagito viene trasformata in HCO₃⁻ per mezzo del Ca(OH)₂, il quale viene trasportato da un'ulteriore condotta e viene rilasciato nel tratto finale della condotta principale. Infine, la soluzione ionica tamponata ricca di ioni di bicarbonato viene scaricata in mare allo stesso pH dell'acqua di mare. L'impianto BAWL è caratterizzato anche da diverse fasi per la produzione di particelle micronizzate CaCO₃ e di Ca(OH)₂. La materia prima necessaria all'impianto è il calcare, che viene ridotto con un processo di macinazione a dimensioni grossolane (200 µm) o micronizzate (1, 2 o 10 µm) a seconda del suo utilizzo. Il particolato con diametri di pochi micrometri viene introdotto nel miscelatore per reagire con CO₂, mentre il particolato più grossolano viene usato per la produzione di ossido di calcio (CaO) per mezzo di un calcinatore elettrico. L'ossido di calcio viene successivamente idratato attraverso uno slaker, generando Ca(OH)₂.

Sono state considerate e confrontate 4 diverse configurazioni del BAWL (denominate A, B, C e D) differenti per caratteristiche impiantistiche (lunghezza e profondità della condotta in mare) e per le dimensioni delle particelle di CaCO₃ come riportato in Tabella 1.

Tabella 1 : Parametri principali del BAWL considerato nelle quattro configurazioni.

	A	B	C	D
Profondità finale [m]	3000	500	100	100
Lunghezza condotta [km]	100	25	10	5
Diametro del CaCO ₃ per il miscelatore [µm]	10	2	1	-

È stata analizzata l'applicazione della tecnologia BAWL per produrre idrossido di calcio da utilizzare per il processo di rimozione di CO₂ dall'atmosfera, denominato alcalinizzazione degli oceani, in inglese Ocean Liming (OL). Il processo OL consiste nello spargimento in mare di Ca(OH)₂ provocando l'innalzamento del pH dovuto alla presenza di ioni OH⁻ che favoriscono la trasformazione della CO₂ in ioni di bicarbonato, riducendo la quantità di CO₂ in acqua e permettendo un assorbimento di CO₂ dall'atmosfera. Dal momento che la produzione di idrossido di calcio comporta inevitabilmente l'emissione di CO₂ dovuto alla calcinazione del carbonato di calcio. La combinazione

di OL con BAWL permetterebbe anche la cattura e lo stoccaggio della CO₂ derivanti dalla produzione di Ca(OH)₂.

Nel presente lavoro è stata applicata la metodologia Analisi del ciclo di vita, in inglese Life Cycle Assessment (LCA), per uno studio dettagliato della tecnologia BAWL e del suo intero ciclo di vita con l'obiettivo di valutarne i potenziali impatti ambientali in 16 categorie di impatto, in accordo alla metodologia Environmental Footprint. Le categorie di impatto analizzate sono: *Cambiamento climatico; Assottigliamento della fascia di ozono; Radiazioni ioniche - salute umana; Formazione fotochimica di ozono - salute umana; Assunzione di materiale particolato; Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni; Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni; Acidificazione; Eutrofizzazione - acqua dolce; Eutrofizzazione marina; Eutrofizzazione terrestre; Ecotossicità - acqua dolce; Uso del suolo; Uso delle risorse idriche; Uso delle risorse – combustibili fossili; Uso delle risorse – minerali e metalli.*

Attraverso la metodologia Analisi del ciclo di vita sono stati valutati gli impatti delle 4 configurazioni per due diverse applicazioni della tecnologia BAWL per la cattura e lo stoccaggio di 1 kgCO₂, quantità che è stata assunta come unità funzionale (UF) del sistema. Nel primo caso, la CO₂ stoccata proviene da un flusso gassoso di una fonte esterna al sistema (impianto BAWL), mentre nel secondo caso proviene dalla produzione di Ca(OH)₂ adibita per rimuovere CO₂ dall'atmosfera attraverso il processo di alcalinizzazione degli oceani (impianto BAWL-OL).

Per la fase di inventario, sono raccolti i dati di consumo di materia e di energia del sistema espressi in rapporto a UF dalle seguenti fonti: i risultati dell'analisi dei processi chimici, i dati forniti dai progettisti della tecnologia BAWL e i dati presenti nei moduli del database Ecoinvent. I vari casi studiati, impianti BAWL e BAWL-OL per le 4 configurazioni, sono stati modellizzati su SimaPro suddividendo il sistema nei seguenti processi:

- *Produzione del calcare*, tiene conto dei processi di estrazione del calcare e di macinazione del calcare (grossolana e micronizzata);
- *Trasporto del calcare* dal sito di estrazione all'impianto;
- *Costruzione dell'impianto*, considera la realizzazione di calcinatore, slaker, miscelatore, compressore, pompe e condotte;
- *Consumo di acqua*, per il processo di idratazione dell'ossido di calcio;
- *Consumo energetico*, tiene conto dell'elettricità consumata dai processi di macinazione (grossolana e micronizzata), calcinazione, compressione e pompaggio, come riportati in Tabella 2;

- *CO₂ emessa in atmosfera*, dovuta all'efficienza del miscelatore nel dissolvere CO₂ in acqua;
- *Processo OL* (solo per il caso BAWL-OL), considera il rilascio di Ca(OH)₂ in mare e la rimozione di CO₂.

Tabella 2 : Energia consumata annualmente dai processi per le quattro configurazioni.

Processo	BAWL				BAWL-OL			
	A	B	C	D	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Estrazione [MWh/anno]	7	7	8	8	13	13	14	14
Macinazione (grossolana) [MWh/anno]	67	86	137	207	231	250	301	370
Macinazione (micronizzata) [MWh/anno]	11.233	17.844	14.421	-	11.233	17.844	14.421	-
Calcinazione [MWh/anno]	64.371	82.641	131.606	197.982	221.190	239.459	288.425	354.801
Compressore [MWh/anno]	20.150	11.905	15.836	20.808	20.150	11.905	15.836	20.808
Pompe [MWh/anno]	28.801	20.418	28.278	19.480	28.801	20.418	28.278	19.480
Totale [MWh/anno]	124.630	132.901	190.286	238.485	281.618	289.889	347.274	395.473

Gli impatti totali ottenuti per ciascuna configurazione sia per l'impianto solo BAWL sia BAWL-OL sono riportati in Tabella 3. La configurazione A, con particelle più grossolane e una condotta più lunga e profonda, risulta la meno impattante in tutte le categorie di impatto, fatta eccezione per le categorie *Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni*, *Ecotossicità-acqua dolce*, *Uso delle risorse-combustibili fossili* e *Uso delle risorse-minerali e metalli* nelle quali la configurazione B ha impatti inferiori.

Fra tutte le configurazioni, mostra anche l'efficienza migliore di stoccaggio calcolata come la differenza tra l'UF e l'impatto *cambiamento climatico*, che considera le emissioni di gas climalteranti dell'intero processo calcolate con l'approccio dell'analisi del ciclo di vita, diviso la teorica quantità di CO₂ stoccata, cioè UF. L'efficienza è pari a 39%, ovvero 61% della CO₂ stoccata serve a compensare le emissioni generate dal sistema considerando il suo ciclo di vita. Le efficienze delle 4 configurazioni per l'impianto BAWL sono riportate in Tabella 4. La configurazione D ha un'efficienza negativa, cioè la realizzazione e funzionamento dell'impianto BAWL causerebbe emissioni maggiori di gas climalteranti rispetto alla quantità di CO₂ stoccata. Per l'impianto BAWL-OL la situazione resta simile a quella ottenuta per l'impianto BAWL, ovvero la configurazione con impatti inferiori in tutte le categorie risulta sempre la configurazione A+OL, ad eccezione per le

categorie *Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni* e *Uso delle risorse-combustibili fossili* in cui gli impatti inferiori sono ottenuti con la configurazione B+OL. Anche per l'impianto BAWL-OL la configurazione A+OL risulta con l'efficienza di rimozione migliore, seppur molto bassa, 10%. L'efficienza di rimozione di CO₂ è calcolata con un rapporto tra l'impatto calcolato nella categoria *cambiamento climatico* e il valore teorico di rimozione del processo di OL in assenza di impatti relativi all'emissione di CO₂ dovuta alla produzione di Ca(OH)₂, pari a -1,4 kgCO₂eq/UF.

Le efficienze delle configurazioni dell'impianto BAWL-OL, riportate in

Tabella 5, assumono valori negativi nelle configurazioni C+OL e D+OL, ovvero l'applicazione e l'attività dell'impianto genererebbe emissioni superiori a quelle rimosse attraverso il processo di OL.

In entrambi i casi BAWL e BAWL-OL, la configurazione D risulta la più impattante nelle 16 categorie di impatto valutate e con efficienze controproducenti allo scopo degli impianti studiati.

Tabella 3 : *Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL e BAWL-OL.*

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Uso del suolo; 14. Uso delle risorse idriche; 15.Uso delle risorse-combustibili fossili; 16.Uso delle risorse-minerali e metalli.)

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL				BAWL-OL			
		A	B	C	D	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
1	kg CO ₂ eq	0,61	0,63	0,88	1,10	-0,14	-0,12	0,13	0,35
2	kg CFC-11 eq	7,2E-08	7,6E-08	1,1E-07	1,4E-07	1,6E-07	1,7E-07	2,0E-07	2,2E-07
3	kBq U ₂₃₅ eq	7,2E-02	7,6E-02	1,1E-01	1,4E-01	1,6E-01	1,6E-01	2,0E-01	2,2E-01
4	kg NMVOC eq	1,3E-03	1,4E-03	1,9E-03	2,3E-03	2,9E-03	2,9E-03	3,4E-03	3,8E-03
5	disease inc.	1,2E-08	1,2E-08	1,5E-08	1,9E-08	2,4E-08	2,4E-08	2,8E-08	3,1E-08
6	CTUh	3,0E-08	3,1E-08	4,4E-08	5,4E-08	6,5E-08	6,6E-08	7,9E-08	8,9E-08
7	CTUh	4,1E-09	4,0E-09	5,3E-09	6,2E-09	8,1E-09	8,0E-09	9,3E-09	1,0E-08
8	mol H ⁺ eq	2,6E-03	2,6E-03	3,7E-03	4,6E-03	5,6E-03	5,7E-03	6,7E-03	7,6E-03
9	kg P eq	1,2E-04	1,2E-04	1,8E-04	2,2E-04	2,6E-04	2,7E-04	3,2E-04	3,7E-04
10	kg N eq	4,3E-04	4,4E-04	6,0E-04	7,4E-04	9,2E-04	9,4E-04	1,1E-03	1,2E-03
11	mol N eq	4,9E-03	5,0E-03	6,9E-03	8,4E-03	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,4E-02
12	CTUe	0,14	0,13	0,18	0,22	0,28	0,28	0,33	0,36
13	Pt	2,84	2,93	4,13	5,13	6,23	6,33	7,52	8,53
14	m ³ depriv.	0,37	0,38	0,54	0,68	0,82	0,84	1,00	1,14
15	MJ	8,59	8,54	12,01	14,98	18,46	18,41	21,88	24,85
16	kg Sb eq	7,3E-07	7,0E-07	9,2E-07	1,0E-06	1,3E-06	1,3E-06	1,5E-06	1,6E-06

Tabella 4 : Efficienze di stoccaggio della CO₂ dell'impianto BAWL per le quattro configurazioni

	Configurazioni			
	A	B	C	D
IT	39%	37%	12%	-10%

Tabella 5 : Efficienze di stoccaggio della CO₂ dell'impianto BAWL-OL per le quattro configurazioni

	Configurazioni			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
IT	10%	8%	-9%	-25%

Attraverso un'analisi dei contributi degli impatti totali, il consumo energetico è risultato in tutti gli otto casi studiati il contributo maggiore in tutte le categorie di impatto. In Figura 3 è rappresentata l'analisi dei contributi della configurazione A dell'impianto BAWL; le altre configurazioni riportano ripartizioni simili.

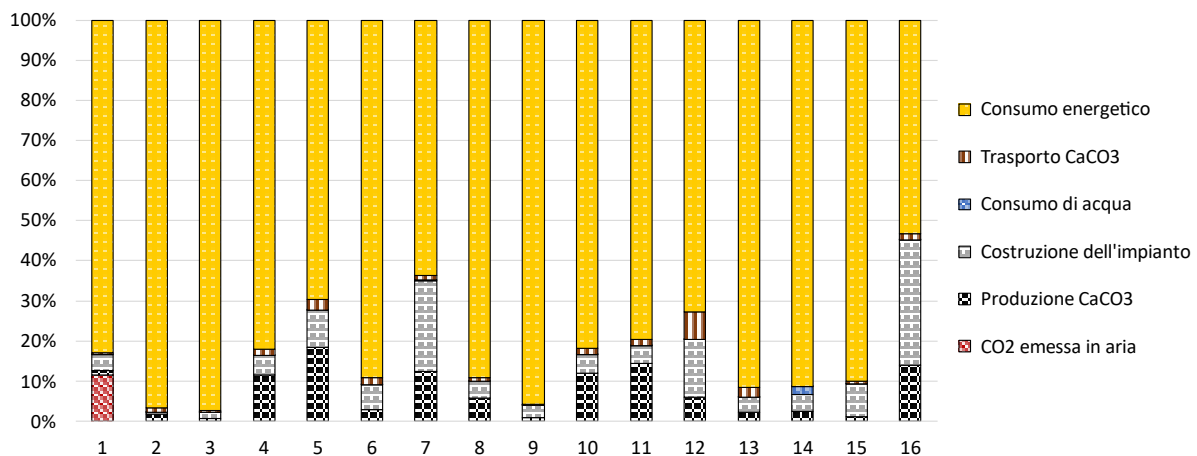


Figura 3 - Analisi dei contributi della configurazione A (BAWL).

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Uso del suolo; 14. Uso delle risorse idriche; 15.Uso delle risorse-combustibili fossili; 16.Uso delle risorse-minerali e metalli.)

È stata quindi svolta un'analisi di sensitività, assumendo due diversi mix energetici prevalentemente da fonti rinnovabili: mix 100% rinnovabile ipotizzato in Italia nel 2050 (scenario IT-RE) e l'attuale mix in Norvegia (scenario NO). In Tabella 6 sono riportate le percentuali delle fonti da cui viene generata l'energia elettrica per lo scenario base (IT) e i due scenari analizzati IT-RE e NO.

Tabella 6 : Fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica.

	Percentuale [%]		
	IT-base	IT-RE	NO
Fonti fossili	54	-	2
Geotermico	2	1	-
Idroelettrico	21	8	92
Eolico	6	52	2
Fotovoltaico	-	40	-
Importato	17	-	4

Per entrambi gli scenari IT-RE e NO, i valori ottenuti dall'analisi di sensitività mostrano impatti inferiori per tutte le categorie di impatto rispetto alle configurazioni (A, B, C e D) nello scenario IT-base, ad eccezione delle categorie *Tossicità per l'uomo – effetti non cancerogeni*, *Tossicità per l'uomo – effetti cancerogeni*, *Ecotossicità – acqua dolce* e *Uso delle risorse – minerali e metalli* dove per lo scenario IT-RE risultano degli impatti superiori rispetto allo scenario IT-base. La stessa situazione si verifica anche per gli scenari IT-RE e NO dell'impianto BAWL-OL.

Una riduzione degli impatti per entrambi gli scenari dovuta ad un mix energetico prodotto da fonti principalmente rinnovabili porta ad una riduzione degli impatti dovuti al consumo energetico e del suo contributo sugli impatti totali per la categoria *cambiamento climatico*, come rappresentato in Figura 4. In questi scenari il contributo maggiore è dovuto all'emissione di CO₂ da parte del miscelatore, poiché è stato assunto un'efficienza del 95% per la dissoluzione di CO₂ nell'acqua. Questo contributo, che si aggira tra 45% e 64% a seconda della configurazione e dello scenario considerato, è, però, riferito ad impatti totali inferiori rispetto a quelli dello scenario IT-base. Analogamente, anche nel caso BAWL-OL si verifica una riduzione del contributo dovuto al consumo energetico.

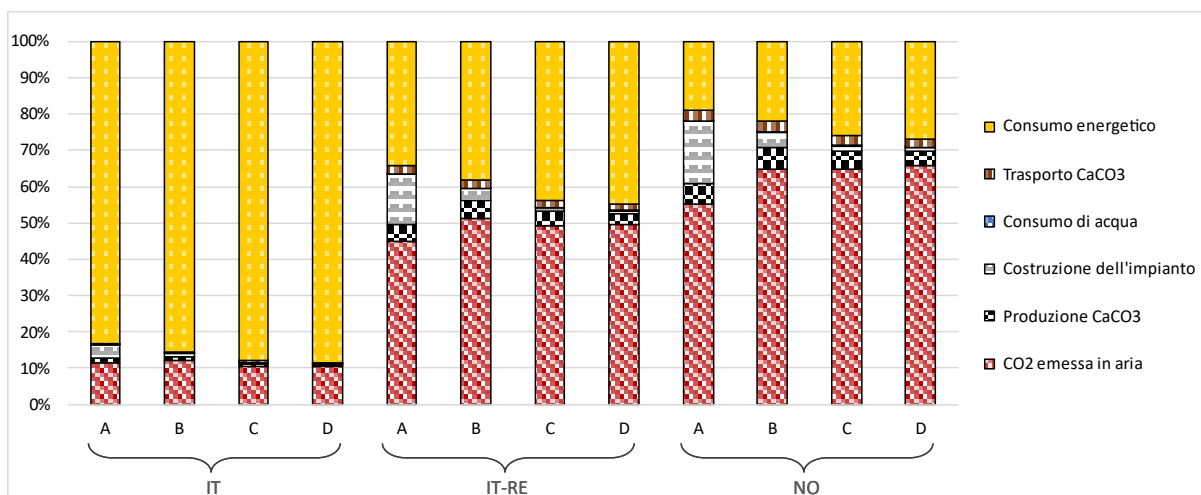


Figura 4 - Analisi dei contributi dell'impianto BAWL per la categoria "Cambiamento climatico".

La riduzione degli impatti dovuta alla variazione delle fonti di produzione dell'energia consumata ha portato ad efficienze di stoccaggio e rimozione per gli impianti BAWL e BAWL-OL (riportate rispettivamente in Tabella 7 e Tabella 8) nettamente superiori per gli scenari IT-RE e NO. I valori sono superiori a 80% per quasi tutte le configurazioni, ad eccezione della configurazione D dello scenario IT-RE di un impianto BAWL, pari a 77%, la quale registra un'efficienza di stoccaggio di CO₂ pari al doppio di quella calcolata per il caso migliore dello scenario IT-base, configurazione A.

Tabella 7 : Efficienze di stoccaggio della CO₂ dell'impianto BAWL per gli scenari IT-base, IT-RE e NO.

Scenari	Configurazioni			
	A	B	C	D
IT-base	39%	37%	12%	-10%
IT-RE	84%	85%	81%	77%
NO	87%	88%	86%	83%

Tabella 8 : Efficienze di rimozione della CO₂ dell'impianto BAWL-OL per gli scenari IT-base, IT-RE e NO.

Scenari	Configurazioni			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
IT-base	10%	8%	-9%	-25%
IT-RE	83%	84%	81%	78%
NO	88%	89%	87%	85%

In seguito viene analizzata come varia l'efficienza del processo in funzione del fattore di emissione (FE) dell'energia elettrica. Un FE indica la quantità di inquinante rilasciato nell'atmosfera rispetto all'attività che l'ha emesso; per il consumo di energia elettrica il fattore di emissione viene definito come quantità di inquinante emesso per unità di energia elettrica consumata, ed è espresso in gCO₂eq/kWh. Dal grafico in Figura 5 si nota quanto valori bassi del fattore di emissione dell'elettricità, come quelli dello scenario IT-base, comportino un maggior divario tra le configurazioni, a causa dei diversi consumi energetici tra le configurazioni. Invece, per FE sempre minori, fino ai valori degli scenari IT-RE (43 gCO₂eq/kWh) e NO (19 gCO₂eq/kWh), le efficienze risultano sempre maggiori per tutte le configurazioni raggiungendo valori superiori a 80%.

Per l'impianto BAWL-OL, che registra consumi energetici maggiori (Tabella 2), le configurazioni analizzate subiscono una riduzione delle efficienze di rimozione di CO₂ maggiori con l'aumentare del fattore di emissione, mentre per FE prossimi ai valori degli scenari IT-RE e NO, si ottengono delle efficienze superiori a 85% per tutte le configurazioni.

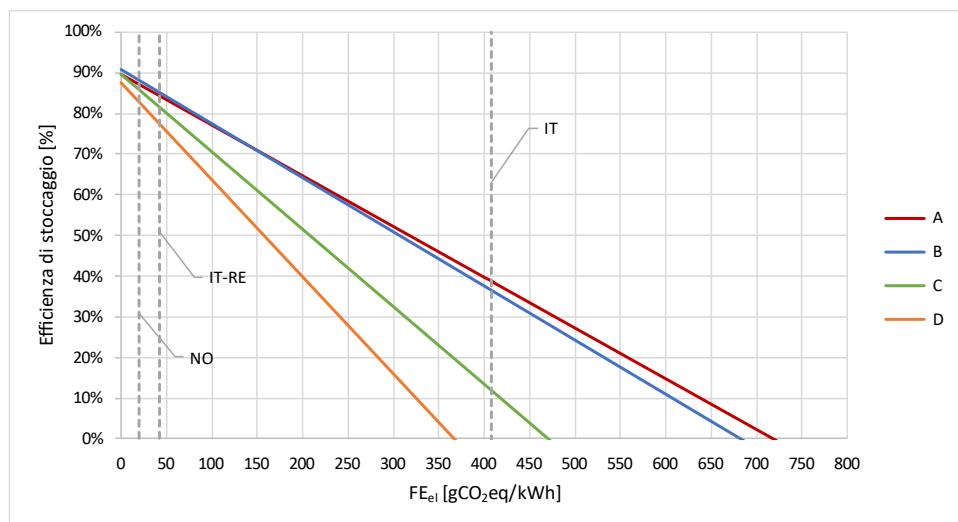


Figura 5 – Efficienza di stoccaggio del BAWL in funzione del fattore di emissione dell'elettricità (FE_{ei}).

In conclusione, la disponibilità di elettricità da fonte rinnovabile risulta essenziale per l'efficienza della tecnologia BAWL sia per il sequestro di CO₂ che per la rimozione di CO₂ in caso di utilizzo del Ca(OH)₂ prodotto per l'alcalinizzazione degli oceani.

1. INTRODUZIONE

Secondo l'IPCC (2021), “L'influenza umana sul riscaldamento dell'atmosfera, dell'oceano e della terraferma è inequivocabile” (IPCC, 2021). Le diverse attività umane che soddisfano le esigenze della popolazione mondiale (ad esempio la produzione di cibo, energia, cemento, il trasporto di merci e persone, ecc.), causano l'emissione in atmosfera di gas a effetto serra (in inglese Greenhouse Gases, GHGs), come l'anidride carbonica (CO₂). Di conseguenza, la concentrazione atmosferica dei gas serra è aumentata causando il cambiamento climatico. Gli impatti presenti e futuri connessi al cambiamento climatico sono l'aumento della temperatura superficiale, fusione dei ghiacciai, innalzamento del livello medio globale del mare, ondate di calore più frequenti e più lunghe, precipitazioni estreme più intense e più frequenti, aumento delle temperature e dell'acidità degli oceani. Poiché questi impatti si ripercuotono sugli ecosistemi, sulla società e sull'economia, i Paesi dovrebbero implementare soluzioni di adattamento per rispondere a tali impatti e al contempo adottare azioni di mitigazione per affrontare il problema alla fonte, cioè ridurre le emissioni di gas serra (IPCC, 2013).

Con il termine “cambiamenti climatici” si intendono le variazioni a lungo termine delle temperature e dei modelli meteorologici (ONU, 2022). Queste variazioni di temperatura possono avvenire in maniera naturale nel corso di periodi prolungati; tuttavia, a partire dal XIX secolo, con l'inizio del periodo industriale, vi è stata una rapida crescita delle temperature mai registrata in precedenza. Nel grafico in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è rappresentato l'andamento delle temperature globali della superficie terrestre in un arco di 2000 anni. Si nota che nell'ultimo secolo e mezzo l'andamento delle temperature sia in netta crescita e questo è attribuibile allo sviluppo delle attività umane, in cui prevalentemente la combustione di combustibili fossili (quali carbone, petrolio e gas) comporta l'emissione in atmosfera di gas a effetto serra che trattengono il calore (IPCC, 2021).

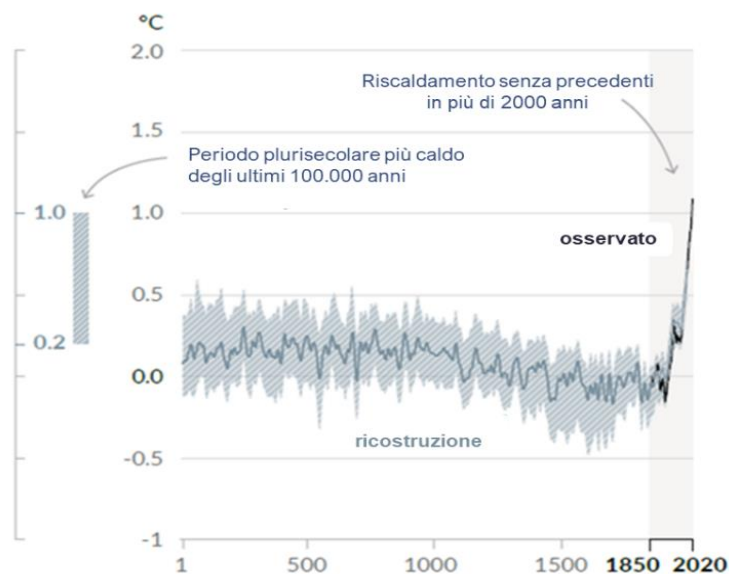


Figura 1.1 – Variazioni della temperatura superficiale globale (media decennale) ricostruita (1-2000) e osservata (1850-2020) riferite al periodo 1850-1900 (IPCC, 2021).

Per rispondere a tale problema, a livello internazionale con l'articolo 2 dell'Accordo di Parigi si è posti l'obiettivo che l'aumento della temperatura media globale resti al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali e di perseguire gli sforzi affinché venga limitato a 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali (UNFCCC, 2015). Ciò comporta dei piani di riduzione delle emissioni che consentano di raggiungere l'azzeramento delle emissioni di CO₂ entro la metà del secolo; dunque, è fondamentale una decarbonizzazione del settore energetico nel breve termine (IPCC, 2018). L'azzeramento delle emissioni di CO₂ significa che le emissioni sono pari a zero o che le emissioni in atmosfera (positive) sono compensate da emissioni negative, ossia che viene rimossa dall'atmosfera la stessa quantità emessa. Rockström et al. (2017) hanno presentato un esempio di tabella di marcia per una rapida decarbonizzazione a breve termine secondo l'obiettivo dell'Accordo di Parigi, illustrato nella Figura 1.2. Dopo aver raggiunto il picco di emissioni entro il 2020, le emissioni globali annue di CO₂ vengono dimezzate ogni dieci anni dal 2020 al 2050, quando le emissioni globali scendono a 5 GtCO₂. Le emissioni rimanenti vengono compensate con tecnologie di rimozione dell'anidride carbonica (in inglese Carbon Dioxide Removal, CDR), chiamate anche tecnologie a emissioni negative (in inglese Negative Emission Technology, NET), che dovrebbero iniziare a essere utilizzate a partire dal 2030 (Rockström et al., 2017; IPCC, 2018).

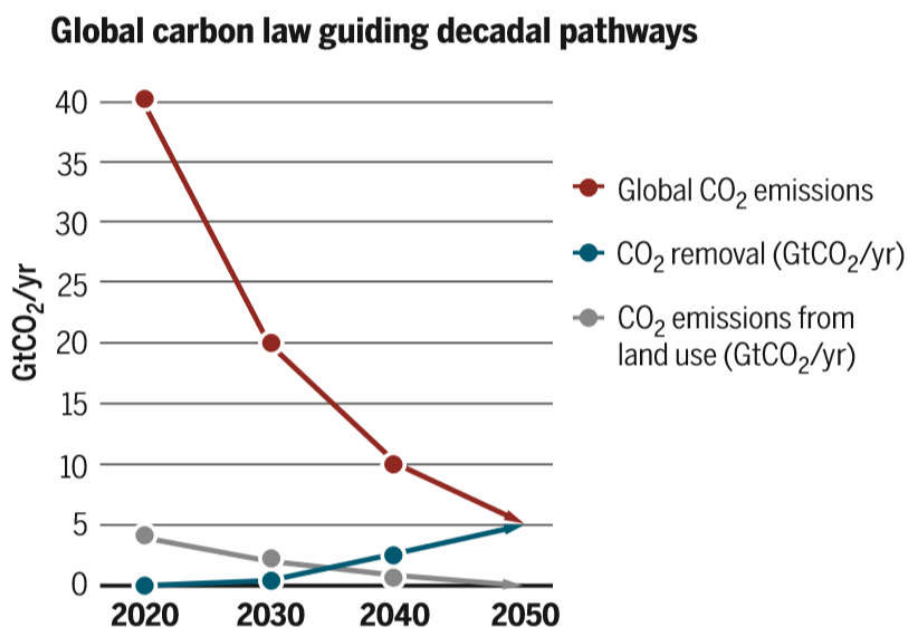


Figura 1.2 – Proiezione delle emissioni globali annuali di CO₂ in rispetto dell'obiettivo dell'Accordo di Parigi (Rockström et al., 2017).

1.1 Accordi e obiettivi

Nel 1992 è stata stipulata la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC), un trattato internazionale che ha tra i suoi obiettivi la riduzione delle emissioni dei gas serra ed è alla base dei negoziati internazionali annuali per la lotta ai cambiamenti climatici, noti anche come Conferenza delle Parti (in inglese Conference of Parties, COP). Durante le diverse conferenze è aumentata la consapevolezza delle conseguenze del cambiamento climatico su scala globale, anche grazie al supporto tecnico scientifico dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), portando al raggiungimento di diversi accordi tra i paesi partecipanti. Tra i più importanti vi è la pubblicazione del Protocollo di Kyoto (1997) e il raggiungimento dell'Accordo di Parigi (2015) che fissano degli obiettivi comuni affinché le politiche si muovano verso la decarbonizzazione per una società più sostenibile. L'Accordo di Parigi definisce le nuove politiche climatiche dei vari paesi perché sia indicata un obiettivo di temperature contenuto nell'articolo 2 sia cambia le regole a livello internazionale di politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso gli impegni volontari denominati Nationally Determined Contribution (NDC). Si è passati ad un approccio “bottom-up” in cui i paesi si assumono volontariamente degli impegni di riduzione di contrasto ai cambiamenti climatici che ogni 5 anni possono essere rilanciati con nuovi e più ambiziosi obiettivi e sono oggetto di verifica attraverso la cosiddetta “global stocktake” (UNFCCC, 2015).

Nel 2020 la Commissione Europea, attenendosi agli accordi presi, ha approvato l'European Green Deal, un insieme di iniziative e obiettivi che mirano a raggiungere la neutralità carbonica dei Paesi dell'Unione Europea (UE) entro il 2050. Tali obiettivi sono stati riportati nel 2021 nella European Climate Law. Oltre al raggiungimento della neutralità carbonica al 2050, questa legge stabilisce l'obiettivo intermedio al 2030 di ridurre le emissioni nette di gas serra dei Paesi UE di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990, così come indicato nel piano "Fit to 55" (2021).

Diverse organizzazioni e istituzioni come l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), International Energy Agency (IEA) and National Energy Technology Laboratory (NETL) sostengono che senza l'azzeramento delle emissioni di carbonio è difficile mantenere i livelli di temperatura indicati nell'Accordo di Parigi (EC,2021). Pertanto, la visione strategica a lungo termine della Commissione Europea, denominata "2050 long-term strategy" (EC, 2021), dipende in parte dalle tecniche di rimozione della CO₂ dall'atmosfera basate su tecnologie di cattura e stoccaggio di CO₂ (in inglese Carbon Capture and Storage, CCS) come la cattura diretta dell'aria (in inglese Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) o la produzione di energia da biomassa (in inglese Bio-Energy Carbon Capture and Storage, BECCS) per ottenere la neutralità climatica.

1.2 Tecnologie per far fronte agli obiettivi

L'applicazione di metodi per la cattura e stoccaggio permanente di CO₂ è visto come uno degli strumenti per contrastare i cambiamenti climatici in atto. A seguito dello sviluppo tecnologico degli ultimi anni si sono messe a punto specifiche tecniche di cattura e stoccaggio della CO₂, in inglese Carbon Capture and Storage (CCS) (IPCC, 2005; Gibbins & Chalmers, 2008; Tan, 2016; Bui et al., 2018). Tra le diverse metodologie di stoccaggio di CO₂, vi è lo stoccaggio geologico. Quest'ultima è la tecnologia più avanzata e può avvenire in acquiferi salini profondi o in giacimenti di petrolio e di gas esauriti (IPCC, 2005; Lane et al., 2021). Nonostante vi siano già impianti in cui viene applicata questa opzione di stoccaggio ad oggi 26 impianti con una capacità di 40 MtCO₂ all'anno (Global CCS Institute, 2021), negli ultimi 30 anni la maggioranza dei 263 progetti di cattura e stoccaggio o uso di CO₂ sono stati fallimentari (Wang et al., 2021). Il motivo è che lo stoccaggio geologico presenta diversi svantaggi come il lungo tempo necessario per qualificare adatta allo scopo una formazione geologica, la distribuzione geografica disomogenea dei siti di stoccaggio nel mondo e la profonda incertezza sul tasso di iniezione sostenibile in un determinato sito. Altre tecnologie di stoccaggio, ancora in fase di sviluppo, sono:

- *Confined Submarine Carbon Storage* (CSCS), che consiste nello stoccaggio sottomarino di CO₂ in un ambiente confinato, ovvero il gas viene introdotto all'interno di capsule in vetro che vengono depositate sul fondo del mare (Caserini et al., 2017; Fu et al., 2021);
- *Accelerated Weathering of Limestone* (AWL), è l'accelerazione del fenomeno di dilavamento del calcare (CaCO₃), che consiste nello stoccaggio di CO₂ sotto forma di ioni di bicarbonato nell'oceano (Rau & Caldeira, 1999; Caldeira & Rau, 2000);
- *Buffered Accelerated Weathering of Limestone* (BAWL), è l'evoluzione dell'AWL ma con l'aggiunta finale di idrossido di calcio (Ca(OH)₂) per tamponare la soluzione salina prima di essere rilasciata nell'oceano (Caserini et al., 2021b).

Tali tecniche di cattura e stoccaggio possono essere funzionali per l'abbattimento delle emissioni di CO₂ prodotte da grandi impianti quali:

- centrali termoelettriche a carbone o gas;
- cementifici;
- industria siderurgica;
- industria carta;
- impianti per produzione ammoniacca;
- impianti per produzione idrogeno.

Un'ulteriore applicazione delle metodologie CCS è la loro combinazione con tecniche di rimozione della CO₂ come, ad esempio, la cattura diretta dell'aria (in inglese Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) o impianti per produzione di energia da biomassa (in inglese Bio-Energy Carbon Capture and Storage, BECCS). La pratica denominata DACCS consiste nella cattura di CO₂ atmosferica tramite filtrazione o processi di scrubbing dell'aria con appositi solventi al quale segue l'uso di una tecnologia di stoccaggio (Keith et al., 2018; de Jonge et al., 2019). Mentre, le configurazioni note come BECCS consistono nell'uso di biomassa come combustibile per la produzione di energia. Al fine di ottenere effettivamente emissioni negative la biomassa utilizzata deve essere prodotta attraverso sistemi di riforestazione e gli impianti devono essere legati a tecnologie di stoccaggio per evitare emissioni in atmosfera (Gough & Upham, 2011; Pour et al., 2018). Un'ulteriore tecnologia di rimozione è l'alcalinizzazione degli oceani, in inglese Ocean Alkalinity Enhancement (OAE), la quale in combinazione con una metodologia CCS eviterebbe le emissioni legate alla produzione dell'idrossido di calcio consentendo di ottenere emissioni negative (Renforth et al., 2013; Caserini et al., 2019).

1.3 Analisi del ciclo di vita

Le tecnologie CCS e CDR richiedono uno studio approfondito di analisi e valutazione dei potenziali impatti ambientali non solo per quanto riguarda i cambiamenti climatici affinché possano essere migliorate ed applicate in tempi brevi per il raggiungimento degli obiettivi prefissati. L'Analisi del ciclo di vita, in inglese Life Cycle Assessment - LCA, è uno dei metodi di studio usati maggiormente per un'analisi dettagliata della tecnologia interessata per valutare i suoi impatti ambientali. Questa analisi tiene conto di tutti i processi inerenti alla tecnologia: l'approvvigionamento delle materie prime impiegate, il consumo di energia elettrica, la gestione dei rifiuti e ulteriori dati inerenti all'intero ciclo di vita della tecnologia (dalla fase di costruzione a quella di funzionamento e smantellamento dell'impianto). Nella letteratura attuale sono presenti diversi studi LCA inerenti a tecnologie di CCS (Marx et al., 2011; Zakuciová et al., 2016; Raadal & Modahl, 2022) e tecnologie CDR quali: BECCS (Zang et al., 2020) e DACCS (de Jonge et al., 2019; Deutz & Bardow, 2021).

Terlouw et al. (2021) hanno realizzato una rassegna bibliografica su lavori LCA applicati a tecnologie CDR. Sulla base delle incongruenze e delle carenze osservate, hanno fornito delle raccomandazioni per migliorare la comprensione delle conseguenze ambientali della realizzazione di studi LCA applicati a CDR:

- condurre uno studio LCA con il maggior numero di categorie di impatto ambientale oltre ai cambiamenti climatici;
- considerare l'aspetto temporale delle emissioni nelle tecnologie CDR legate alla biomassa;
- concentrarsi sulle tecnologie CDR finora trascurate;
- essere il più trasparenti possibile riguardo alle scelte metodologiche;
- identificare gli effetti collaterali ambientali;
- distinguere tra "emissioni evitate" ed "emissioni negative" (solo le emissioni negative corrispondono alla rimozione permanente dall'atmosfera).

In conclusione, sono necessari studi LCA più completi e rigorosi per contribuire a configurare dei portafogli di tecnologie CDR e per aiutare la loro sperimentazione o applicazione futura (Terlouw et al., 2021).

Il presente lavoro è uno studio LCA della tecnologia *Buffered Accelerated Weathering of Limestone* (BAWL), ovvero una tecnologia di cattura e stoccaggio di CO₂, e di una tecnologia di rimozione della CO₂ attraverso un impianto combinato tra la tecnologia BAWL e la metodologia di alcalinizzazione degli oceani.

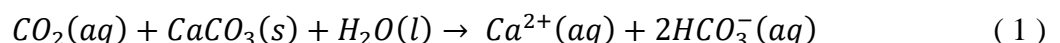
2. DESCRIZIONE DELLA TECNOLOGIA BUFFERED ACCELERATED WEATHERING OF LIMESTONE E CONFIGURAZIONI ESAMINATE

2.1 Buffered Accelerated Weathering of Limestone

La tecnologia analizzata in questo lavoro si chiama Buffered Accelerated Weathering of Limestone (BAWL), metodologia presentata in Caserini et al. (2021b) come metodo per lo stoccaggio della CO₂ alternativo rispetto a quelli correntemente maggiormente studiati ed implementati. Attualmente il metodo maggiormente sviluppato è lo stoccaggio di CO₂ in formazioni geologiche sotterranee quali acquiferi salini profondi, giacimenti di petrolio e gas, e miniere di carbone (IPCC, 2005). Le principali limitazioni relative a questo metodo sono:

- i lunghi tempi (minimo 6 anni) e i grandi investimenti (tra i 170-700 milioni di dollari) necessari per l'individuazione di siti adatti allo scopo;
- la distribuzione geografica non uniforme dei siti nel mondo;
- l'incertezza sulla continuità del rateo di iniezione di CO₂ (Lane et al., 2021).

La tecnologia BAWL nasce come sviluppo del metodo presentato da Rau e Caldeira (1999) e Caldeira e Rau (2000), noto come Accelerated Weathering of Limestone (AWL), il quale propone la cattura e stoccaggio di CO₂ sotto forma di ioni bicarbonato (HCO₃⁻) in acqua di mare. Attraverso un miscelatore viene fatto reagire il flusso gassoso di CO₂ e l'acqua, permettendo la formazione di acido carbonico (H₂CO₃) che reagisce con il calcare, costituito principalmente da carbonato di calcio solido (CaCO₃), producendo ioni di bicarbonato, come descritto nella reazione:



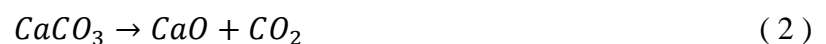
Il processo BAWL è progettato per rilasciare una soluzione ionica tamponata di bicarbonato di calcio al pH dell'acqua di mare aggiungendo idrossido di calcio (Ca(OH)₂). Infatti, l'evoluzione del metodo AWL consiste nell'uso di idrossido di calcio che permette di colmare le principali limitazioni della precedente metodologia:

- la necessità di un alto quantitativo di acqua, che richiede conseguentemente reattori di grandi dimensioni;
- il rischio di degassazione della CO₂ in atmosfera perché il carbonato di calcio ha lunghi tempi per la sua dissoluzione e la CO₂ non reagita, circa 45%, quando viene rilasciata in mare ritorna in atmosfera (Kirchner et al., 2020).

Nel processo BAWL rappresentato in Figura 2.1, un flusso gassoso ricco di CO₂ proveniente da una generica attività produttiva viene prima mescolato con l'acqua di mare per la sua dissoluzione e successivamente con particelle di CaCO₃ aventi dimensioni dell'ordine dei micrometri, al fine di formare un impasto (in inglese definito *slurry*) ricco di CaCO₃. Questo impasto viene quindi immesso in un reattore di dissoluzione, ossia una condotta installata sul fondale marino, dove il calcare viene completamente dissolto in una soluzione ionica lungo il percorso verso le profondità marine. Una seconda condotta trasporta la calce spenta, cioè l'idrossido di calcio (Ca(OH)₂), in un reattore "tampone" che è la parte finale del reattore di dissoluzione, dove la restante CO₂, che non ha reagito con il calcare, forma ioni bicarbonato.

L'intero processo richiede l'uso di acqua di mare e di calcare, il quale viene estratto da cave o miniere e frantumato in due granulometrie differenti rispettivamente per la produzione di Ca(OH)₂ e per la formazione di particolato di CaCO₃ di dimensioni micrometriche.

Di seguito in Figura 2.1 si riporta lo schema dell'intero processo BAWL. La prima fase del processo è la macinazione della roccia (in figura MIL) dal quale vengono prodotti due flussi di CaCO₃, il primo di dimensioni maggiori viene impiegato per la produzione di idrossido di calcio, mentre il secondo flusso viene introdotto all'interno del miscelatore (in figura MIX) e ha dei diametri dell'ordine dei micrometri per facilitarne la dissoluzione in acqua. La produzione di Ca(OH)₂ consiste nell'uso di un calcinatore elettrico (in figura CAL) dal quale si ottiene ossido di calcio (CaO) attraverso la decomposizione termica del calcare (reazione 2), seguito da uno slaker (in figura SLA) per produrre idrossido di calcio dall'idratazione dell'ossido di calcio (reazione 3).



Nel miscelatore avviene il mescolamento dell'acqua di mare con il gas ricco di CO₂ proveniente da una generica attività industriale unito al flusso di CO₂ generata dal calcinatore. Successivamente, alla base del miscelatore viene aggiunto il calcare micronizzato. La soluzione densa che viene prodotta nel miscelatore continua a reagire lungo una condotta, reattore di dissoluzione (in figura DR), dove il calcare reagisce con la CO₂ disciolta formando ioni di bicarbonato. L'ultimo tratto della condotta, denominato reattore di tamponamento (in figura BR), avviene l'aggiunta dell'idrossido di calcio, trasportato attraverso una tubazione (in figura SL), che va a tamponare la soluzione ionica e permette una completa reazione di tutta la CO₂ che si è disciolta nel miscelatore.

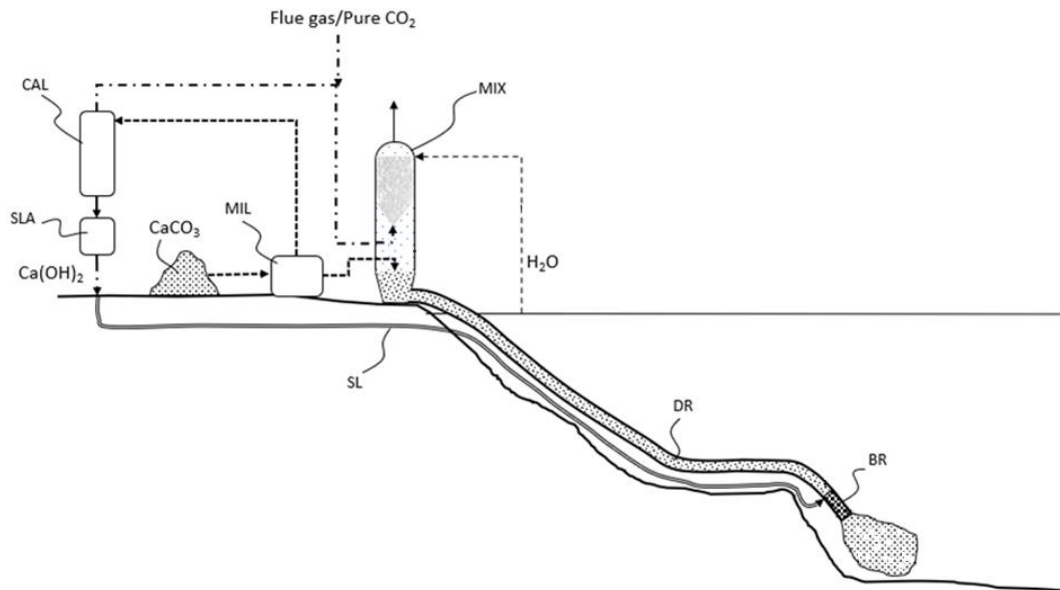


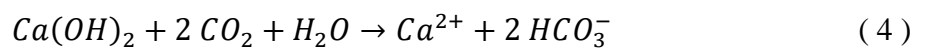
Figura 2.1 – Schema rappresentativo di un impianto BAWL.
 (CAL: calcinatore, SLA: slaker; MIL: macina; MIX: miscelatore; MIL: macina; MIX: miscelatore;
 DR: reattore di dissoluzione; BR: reattore “tampone”; SL: condotta per idrossido di calcio).

2.2 Alcalinizzazione

La pratica di alcalinizzazione degli oceani, in inglese Ocean Alkalinity Enhancement (OAE), consiste nello spargimento di grandi quantità di sostanze alcaline (ad esempio carbonato di sodio, carbonato di calcio o idrossido di calcio) per aumentare la capacità degli oceani di assorbire CO_2 e contemporaneamente contrastare l'aumento di acidità delle acque oceaniche a seguito di un aumento dell'alcalinità. È una tecnologia che permette l'accelerazione di un processo che altrimenti richiederebbe tempi lunghi dell'ordine delle migliaia di anni, ovvero il processo geologico naturale di dilavamento delle rocce e dei minerali (definito *weathering*) che porta a un trasferimento nel lungo periodo del carbonio e di altri elementi dalle rocce all'oceano.

Questa pratica è considerata una potenziale opzione strategica per la limitazione dei cambiamenti climatici e sono in corso studi per stabilire i suoi potenziali benefici ed effetti collaterali, come l'impatto sul funzionamento ecologico e biogeochimico dell'oceano. I primi studi, svolti da Kheshgi (1995), ipotizzano l'uso di carbonato di sodio (Na_2CO_3) o carbonato di calcio (CaCO_3), concludendo che il primo materiale ha buone proprietà di solubilità in acqua ma vi è una scarsa presenza di risorse in natura, mentre CaCO_3 è abbondante sulla superficie terrestre ma non è facilmente solubile. In seguito, lo studio di Renforth et al. (2013) ha valutato le sfide ingegneristiche per l'implementazione

dell'alcalinizzazione degli oceani assumendo il rilascio di polvere di ossido di calcio (CaO) sulla superficie dei mari, poiché maggiormente solubile; questa polvere viene ottenuta attraverso la lavorazione di CaCO₃ ed è stimata una richiesta tra le 1,4 e le 1,7 tonnellate di CaCO₃ per la rimozione di una tonnellata di CO₂. Ulteriori studi (Keller et al., 2014; Renforth & Henderson, 2017; Lenton et al., 2018) indicano il grande potenziale di questa pratica per la rimozione del carbonio attraverso diversi materiali alcalini. In questo lavoro la pratica di alcalinizzazione degli oceani viene attraverso l'uso dell'idrossido di calcio, Ca(OH)₂, e viene denominata in inglese Ocean Liming (OL) dal nome in inglese dell'idrossido di calcio, slaked lime. La tecnologia OL mira ad accelerare il processo di assorbimento della CO₂ da parte degli oceani, stoccandola in forma di bicarbonati. Aggiungendo alcalinità all'acqua di mare, le molecole di CO₂ reagiscono con quelle dell'idrossido di calcio scaricato in mare, portando alla formazione di HCO₃⁻, come rappresentato nella seguente reazione:



Il metodo di dispersione fino ad ora analizzato prevede lo spargimento all'interno della scia della nave sottoforma di una sospensione (Renforth et al., 2013; Keller et al., 2014; Caserini et al., 2021a, Gentile & Tarantola, 2022) come raffigurato in Figura 2.2.

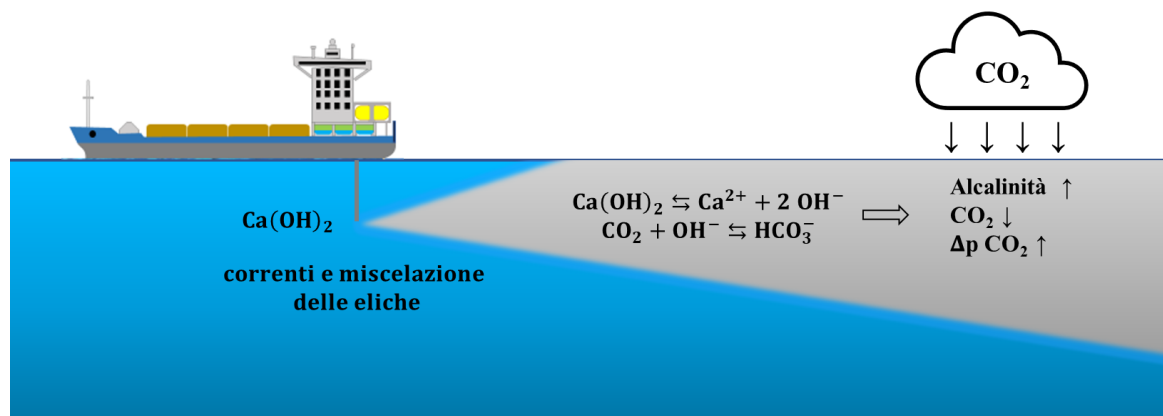


Figura 2.2 – Esempio di scarico di Ca(OH)₂ via nave e principali fenomeni che si verificano in tempi brevi.

La dissoluzione della Ca(OH)₂ causa un rapido aumento del pH, della durata di un paio di minuti, a causa del rilascio di ioni OH⁻ (Caserini et al., 2021a). Dopo questo aumento temporaneo, gli ioni OH⁻ reagiscono con la CO₂ disciolta e il livello di pH diminuisce nuovamente. Inoltre, la miscelazione grazie alle correnti oceaniche contribuisce a ridurre questo picco di pH, disperdendo le particelle di Ca(OH)₂. Inoltre, quando l'idrossido di calcio viene scaricato lungo la scia delle navi, l'elica

dell'imbarcazione aumenta l'efficienza della miscelazione, riducendo ulteriormente l'impatto sulla biologia marina.

Dal momento che la produzione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ comporta inevitabilmente l'emissione di CO_2 dovuto alla calcinazione del carbonato di calcio, il processo OL per rimuovere CO_2 dall'atmosfera è necessario che le emissioni di CO_2 derivanti dalla produzione di idrossido di calcio siano catturate e stoccate.

Il presente lavoro si occupa di studiare l'applicazione del processo OL associato al BAWL con il fine di unificare gli obiettivi di cattura e stoccaggio (BAWL) con quelli di rimozione della CO_2 (OL). Dunque, la combinazione delle tecnologie BAWL e OL permette complessivamente la rimozione di CO_2 dall'atmosfera, la cui efficacia è studiata in questo lavoro valutando le potenziali emissioni di gas ad effetto serra dell'intero processo.

2.3 Configurazioni analizzate

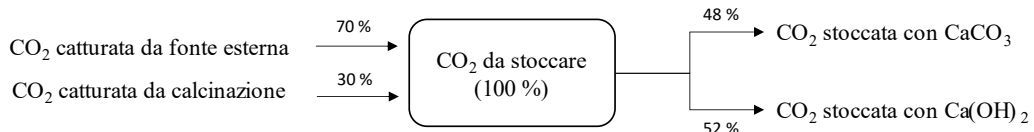
In questo lavoro sono state considerate quattro diverse configurazioni del processo BAWL. Nella Tabella 2.1 sono riportati i principali parametri che le caratterizzano. La configurazione A raffigura il caso studio presentato in Caserini et al. (2021b) nel quale l'impianto BAWL è caratterizzato da una tubatura lunga 100 km con profondità fino ai 3000 metri e viene usato nel miscelatore un particolato di CaCO_3 con $10\ \mu\text{m}$ di diametro. Per ridurre le potenziali difficoltà ingegneristiche per la posa di un tubo lungo 100 km a profondità elevate, sono state valutate ulteriori configurazioni con una riduzione della quantità di CaCO_3 e del diametro delle particelle di CaCO_3 introdotte nel miscelatore. Le particelle di CaCO_3 con dimensioni inferiori si disciolgono in acqua e reagiscono con la CO_2 disciolta con maggior velocità, rendendo possibile la realizzazione di un tubo DR più corto e a una profondità inferiore. Le configurazioni B e C si basano sull'uso di un particolato di diametro di $2\ \mu\text{m}$ e $1\ \mu\text{m}$ e tubature lunghe rispettivamente 25 km e 10 km, arrivando a profondità inferiori di 500 m e 100 m. Infine, la configurazione D rappresenta il caso estremo in cui non viene disciolto CaCO_3 nel miscelatore, ma la CO_2 viene trattata interamente utilizzando solo $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Le modifiche apportate nelle configurazioni comportano una riduzione della CO_2 rimossa per mezzo di CaCO_3 e un aumento della quantità di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ necessaria per il tamponamento della CO_2 rimanente (De Marco et al., 2022). Di conseguenza, una maggior produzione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ porta a consumi energetici superiori e ad un aumento delle emissioni di CO_2 provenienti dal calcinatore, le quali vengono inviate al miscelatore per essere stoccata. Infatti, in Figura 2.3 si può notare l'incremento percentuale di CO_2 proveniente da calcinazione rispetto al totale della quantità di CO_2 stoccata e l'aumento percentuale di CO_2 stoccata per mezzo della $\text{Ca}(\text{OH})_2$ passando dalla configurazione A alla D.

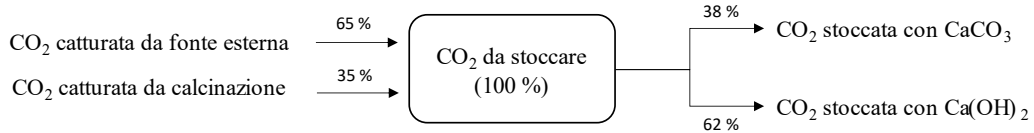
Tabella 2.1 : Parametri principali del BAWL considerato nelle quattro configurazioni

	A	B	C	D
Profondità finale [m]	3000	500	100	100
Lunghezza condotta [km]	100	25	10	5
Diametro del CaCO ₃ per il miscelatore [μm]	10	2	1	-

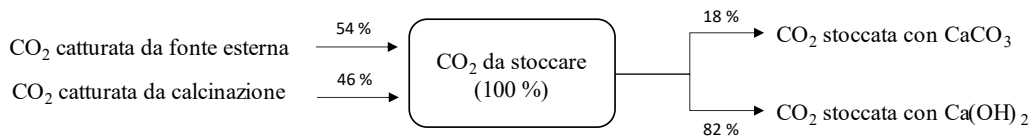
Configurazione A



Configurazione B



Configurazione C



Configurazione D

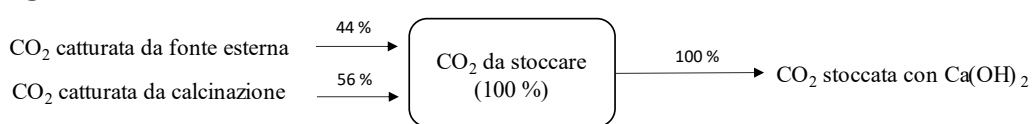


Figura 2.3 – Percentuali di CO₂ catturata e stoccata dall'impianto per le 4 configurazioni.

Nelle configurazioni precedentemente descritte, il flusso di CO₂ stoccato proviene da una fonte esterna e dalla produzione interna di CO₂ dal calcinatore rappresentato schematicamente in Figura 2.4.

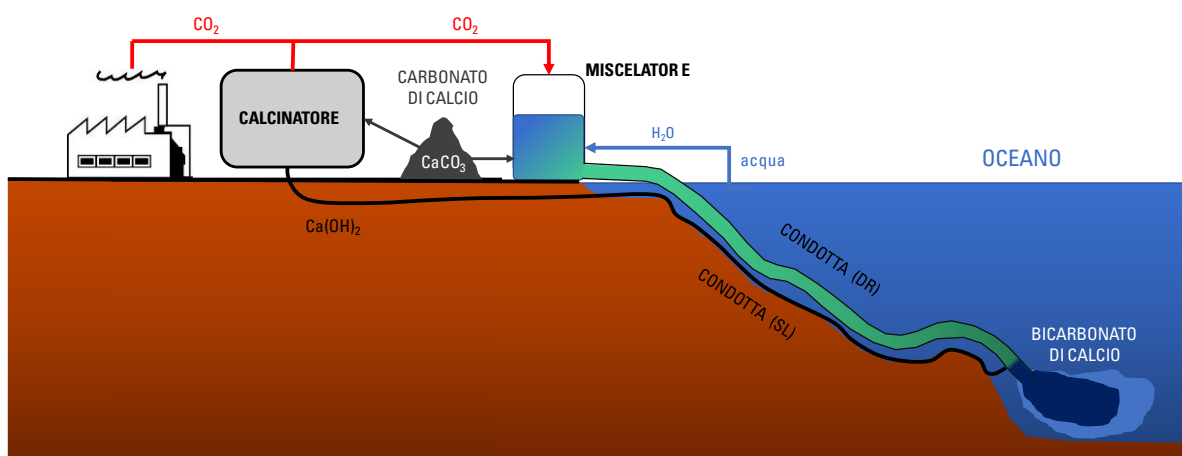


Figura 2.4 – Processo BAWL.

In questo lavoro sono valutate le stesse quattro configurazioni menzionate (A, B, C e D) in riferimento alla tecnologia che è una combinazione del processo BAWL con l'alcalinizzazione degli oceani (OL). Come raffigurato nello schema in Figura 2.5, il flusso di CO_2 trattato viene totalmente generato dalla produzione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utilizzata per il processo BAWL e per l'OL.

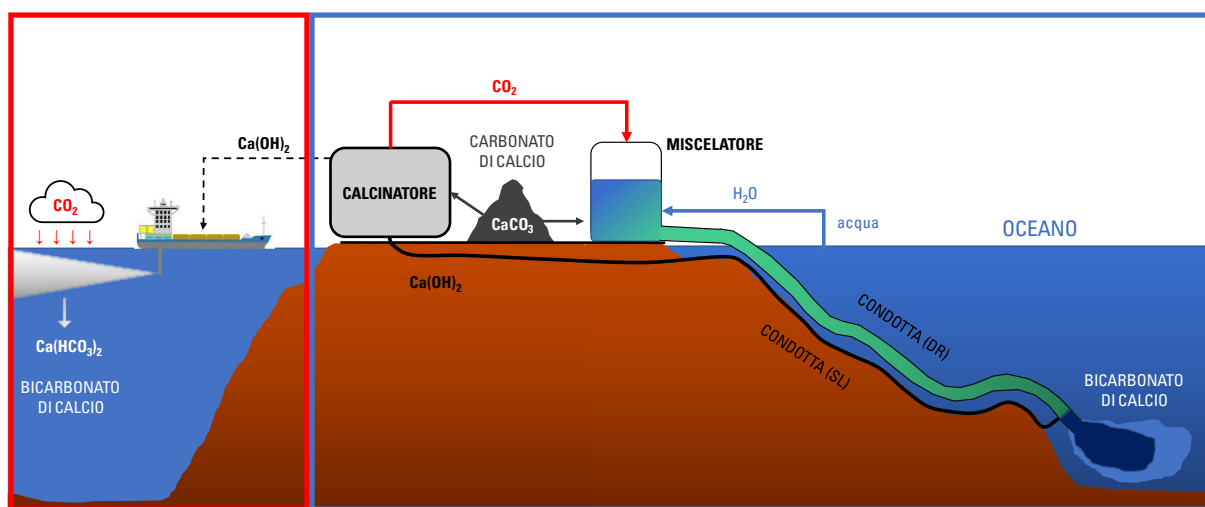


Figura 2.5 – Processo BAWL (riquadro blu) combinato con il processo di alcalinizzazione degli oceani (riquadro rosso).

L'intero impianto BAWL, tenendo conto di tutti i processi, è riportato in Figura 2.6 per le configurazioni A, B e C, mentre in Figura 2.7 è rappresentata la configurazione D che si distingue dalle altre poiché lo stoccaggio di CO_2 avviene solo per mezzo del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pertanto non è presente la macinazione micronizzata. Analogamente, per l'impianto BAWL-OL, le configurazioni A+OL, B+OL e C+OL e la configurazione D+OL si differenziano e sono rappresentate rispettivamente in Figura 2.8 e Figura 2.9. Inoltre, per le configurazioni BAWL-OL non è presente un flusso gassoso prodotto da una fonte esterna, ma il flusso gassoso ricco di CO_2 proviene interamente dal calcinatore

per la produzione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ necessario anche per il processo di alcalinizzazione degli oceani, il quale assorbe CO_2 dall'atmosfera.

L'analisi e il confronto di tutti i casi citati sono stati sviluppati attraverso la metodologia di Analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA), presentata nel seguente Capitolo 3, utile per la valutazione dei potenziali impatti ambientali determinate nelle differenti configurazioni.

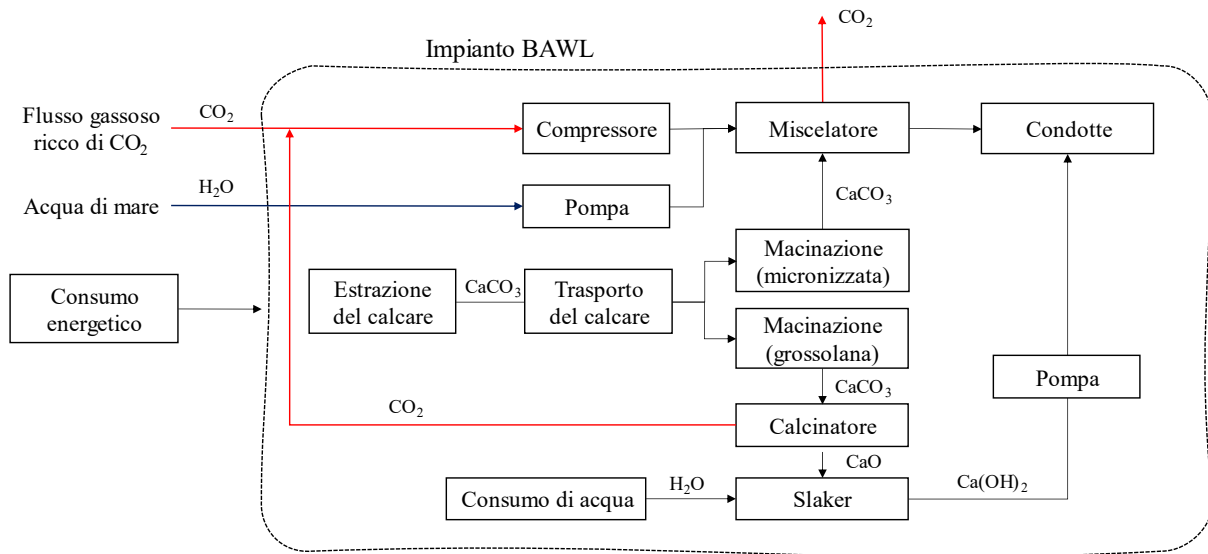


Figura 2.6 – Schema dell'impianto BAWL per le configurazioni A, B e C.

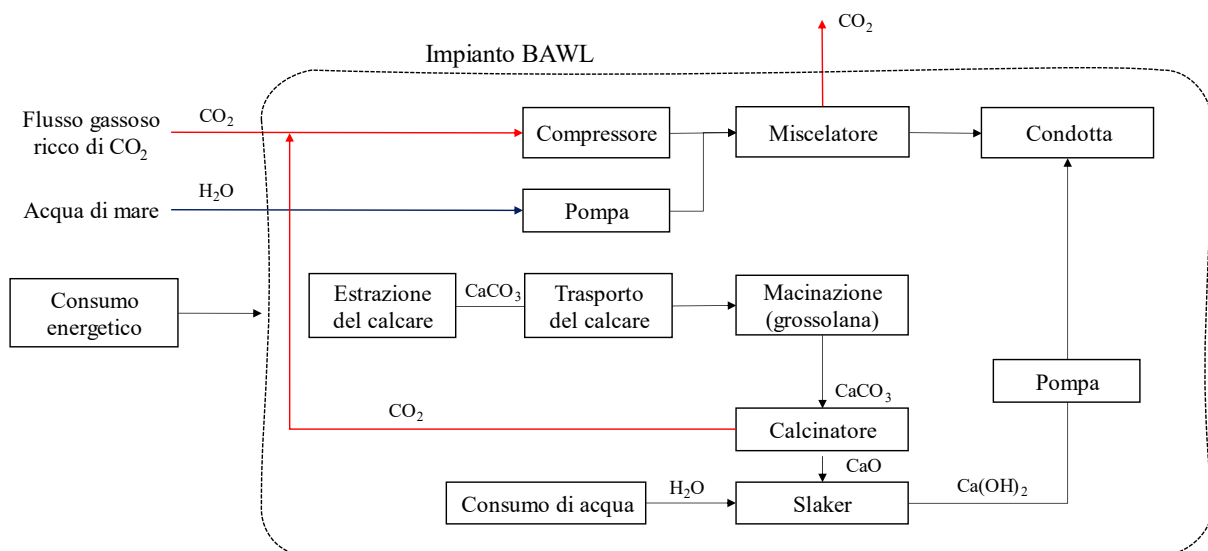


Figura 2.7 – Schema dell'impianto BAWL per la configurazione D.

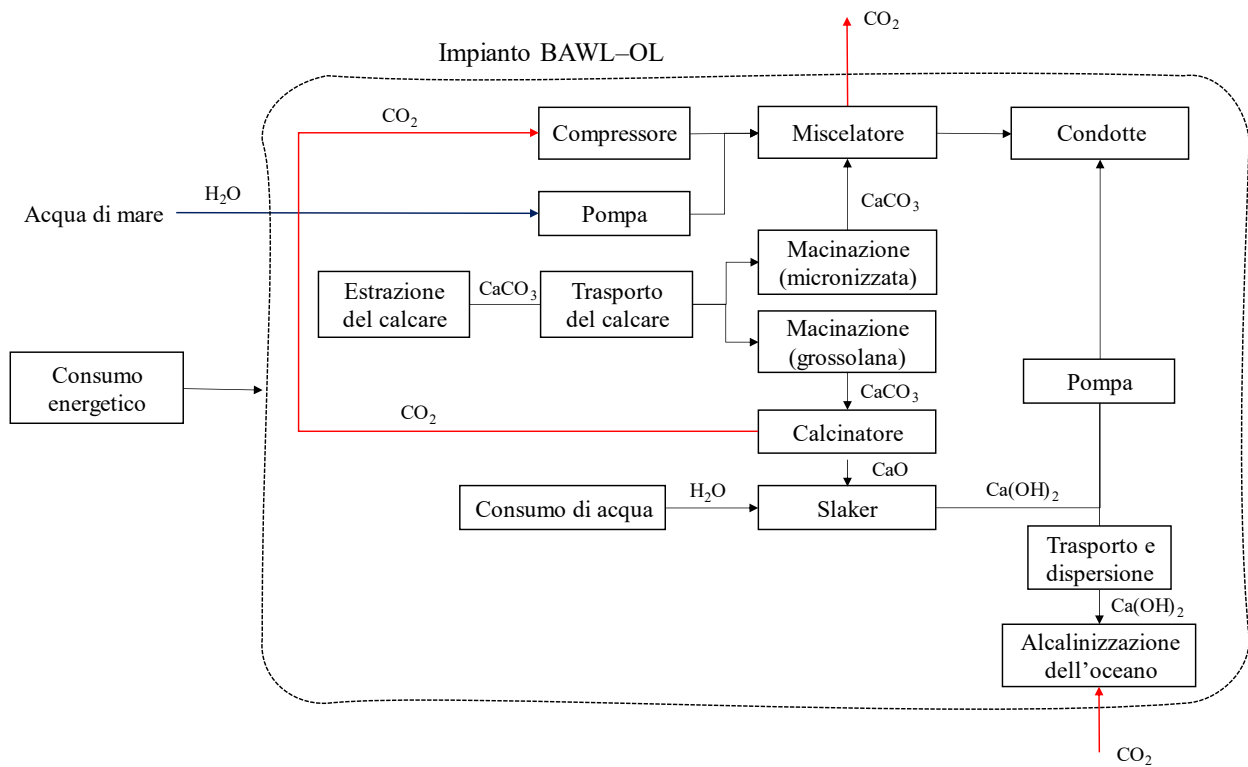


Figura 2.8 – Schema dell'impianto BAWL-OL per le configurazioni A+OL, B+OL e C+OL.

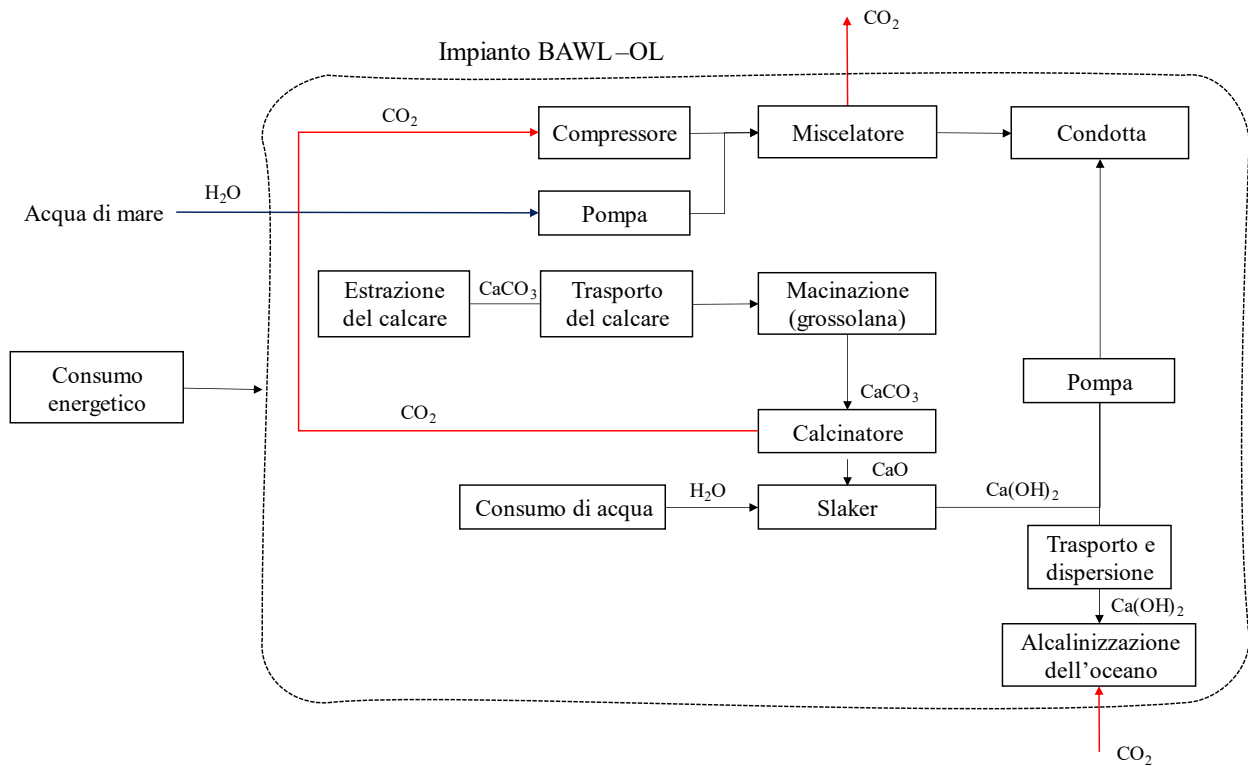


Figura 2.9 – Schema dell'impianto BAWL-OL per la configurazione D+OL.

3. ANALISI DEL CICLO DI VITA

L'analisi del ciclo di vita (in inglese Life Cycle Assessment - LCA) è una metodologia utilizzata per la valutazione dei potenziali impatti ambientali (ad esempio l'uso delle risorse e le conseguenze ambientali delle emissioni) che si verificano durante l'intero ciclo di vita di un prodotto o di un servizio. Non si considera solo il processo (o l'impianto) ma l'intera catena di fornitura, dall'acquisizione delle materie prime fino alla produzione, all'uso, al trattamento di fine vita, al riciclaggio e allo smaltimento finale. Questo approccio è definito “*cradle-to-grave*”, ovvero dalla culla alla tomba, e tiene conto di tutto il ciclo di vita del prodotto. I potenziali impatti ambientali vengono valutati facendo un inventario degli input (materie prime, energia e risorse ambientali) e degli output (emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti).

Le principali applicazioni dell'LCA sono le seguenti:

- fornisce un supporto alle decisioni durante la fase di progettazione del prodotto;
- applica un confronto tra diverse configurazioni di processo al fine di individuare l'alternativa meno impattante;
- consente di individuare le fasi più impattanti del sistema.

La metodologia LCA è quindi uno strumento utile per promuovere lo sviluppo sostenibile, cioè uno sviluppo che "soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri" (WCED, 1987).

In questo elaborato, la metodologia LCA viene applicata come strumento per la valutazione dei potenziali impatti ambientali della tecnologia BAWL nelle diverse configurazioni presentate nel precedente Capitolo 2.

3.1 Struttura della metodologia LCA

La metodologia LCA è una procedura standardizzata a livello internazionale definita da norme ISO (International Standards Organization) 14040 (2006) e 14044 (2018). Essa è composta da quattro fasi che fanno parte di un processo iterativo, in quanto le ipotesi formulate vengono riviste quando si raccolgono ulteriori informazioni durante lo studio. Nella Figura 3.1 sono rappresentate le quattro fasi della metodologia LCA, che sono:

- **Fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione**, in cui vengono definiti l'obiettivo dello studio, l'unità funzionale (UF), i confini del sistema, le ipotesi e i limiti dello studio che verranno discussi nel paragrafo 3.2;

- **Inventario degli elementi coinvolti nel ciclo di vita** (in inglese Life Cycle Inventory - LCI), cioè la collezione del sistema di dati, sviluppato nel Capitolo 4;
- **Analisi dell'impatto del ciclo di vita** (o Life Cycle Impact Assessment - LCIA), ovvero la valutazione dei potenziali impatti ambientali, presentata nel Capitolo 5;
- **Fase di interpretazione**, che riguarda la comprensione dell'analisi dell'inventario e la valutazione degli impatti in accordo con l'obiettivo e lo scopo finale stabiliti.

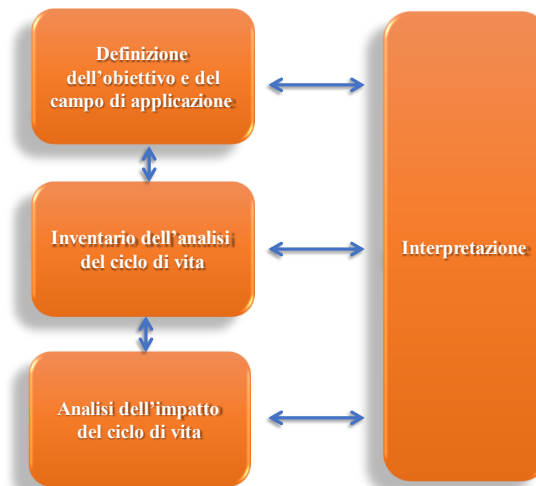


Figura 3.1 – Struttura della metodologia LCA

3.2 Fase di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

Nel seguente capitolo sono descritti i principali punti che fanno parte della prima fase della metodologia LCA dove vengono definiti gli obiettivi del lavoro, l'unità funzionale, i confini del sistema e le categorie d'impatto con la quale vengono valutate le configurazioni.

Definizione dell'obiettivo

Il presente studio ha l'obiettivo di analizzare la tecnologia BAWL per valutarne l'effettiva applicazione come tecnologia CCS o come sistema di CDR insieme al processo di OL. Attraverso uno studio LCA si vuole confrontare le diverse configurazioni di BAWL proposte nel capitolo precedente (casi: A, B, C, D senza e con OL) e valutare la variazione degli impatti per ciascuno. In particolare, si vuole valutare l'efficienza di stoccaggio del processo BAWL al netto delle emissioni dei gas ad effetto serra calcolati con l'approccio dell'analisi del ciclo di vita. Inoltre, si vuole valutare

l'efficienza di rimozione di CO₂ del processo BAWL combinato con OL. Successivamente, è stata svolta un'analisi di sensitività considerando i principali parametri del sistema.

Unità funzionale

L'Unità Funzionale (UF) è il prodotto che rappresenta la funzione su cui fondare l'analisi e il confronto tra le configurazioni analizzate. UF è l'unità di riferimento di uno studio LCA a cui tutti i dati in ingresso ed in uscita raccolti nell'inventario e i potenziali ambientali valutati sono riferiti. L'unità funzionale considerata dovrebbe essere appropriata all'obiettivo primario della tecnologia stessa, come ad esempio in un processo di rimozione di CO₂ atmosferica l'unità funzionale consigliata è 1 tonnellata di CO₂ rimossa (Terlouw et al., 2021).

Nel caso BAWL si utilizza 1 kg di CO₂ stoccata da fonte esterna, cioè senza considerare quella da calcinatore, ed è utile per compararla in futuro con altre tecnologie di stoccaggio come, per esempio, lo stoccaggio geologico (Lacy et al., 2015) oppure quello sottomarino attraverso capsule in vetro (Caserini et al., 2017; Fu et al., 2021). Mentre, nel caso del BAWL-OL si considera come unità funzionale 1 kg di CO₂ generata per la produzione di Ca(OH)₂ (per l'utilizzo nel processo OL) e stoccata dall'impianto BAWL.

Confini del sistema

I confini del sistema definiscono le unità di processo, ovvero le fasi di cui è composto il processo studiato da includere nell'analisi. I confini devono essere fissati nel modo più ampio possibile al fine di considerare tutti i processi coinvolti seguendo un approccio “dalla culla alla tomba”, per esempio includendo i processi di estrazione delle materie prime e di produzione di materiali ausiliari (intermedi), i quali sono utilizzati solo indirettamente nella fabbricazione del prodotto finale.

Nel presente lavoro gli impianti studiati, BAWL e BAWL-OL, sono stati schematizzati (come illustrato nella Figura 3.2 e nella Figura 3.3) e racchiudono tutti i processi e gli input entranti.

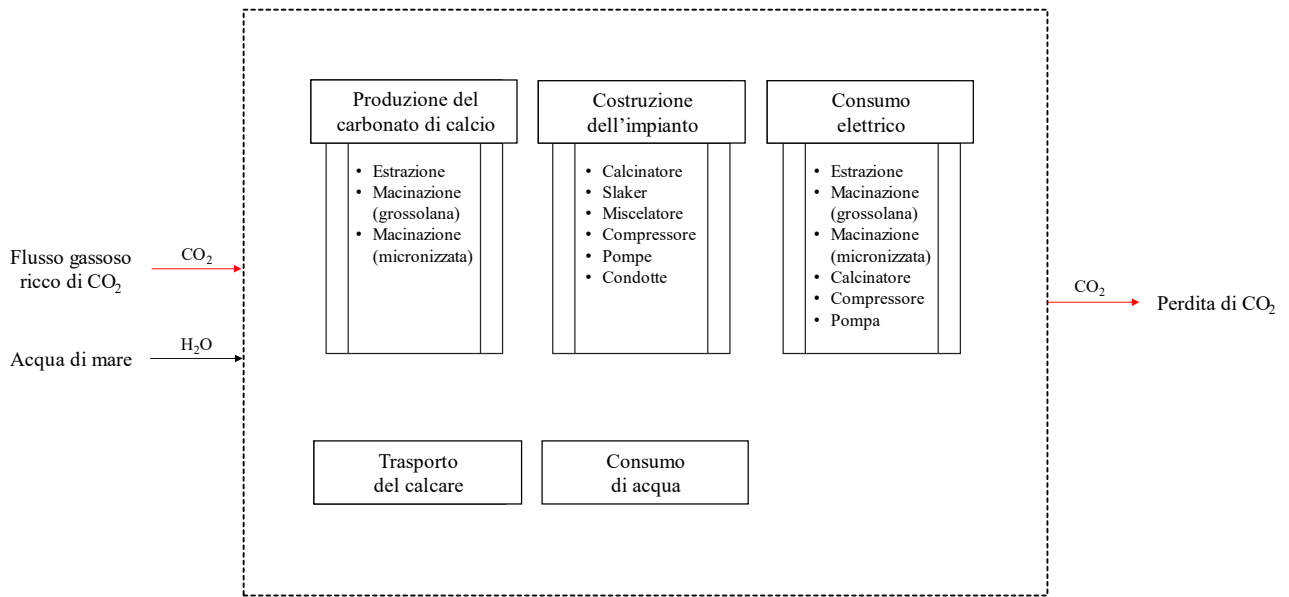


Figura 3.2 – Schema del processo (impianto BAWL).

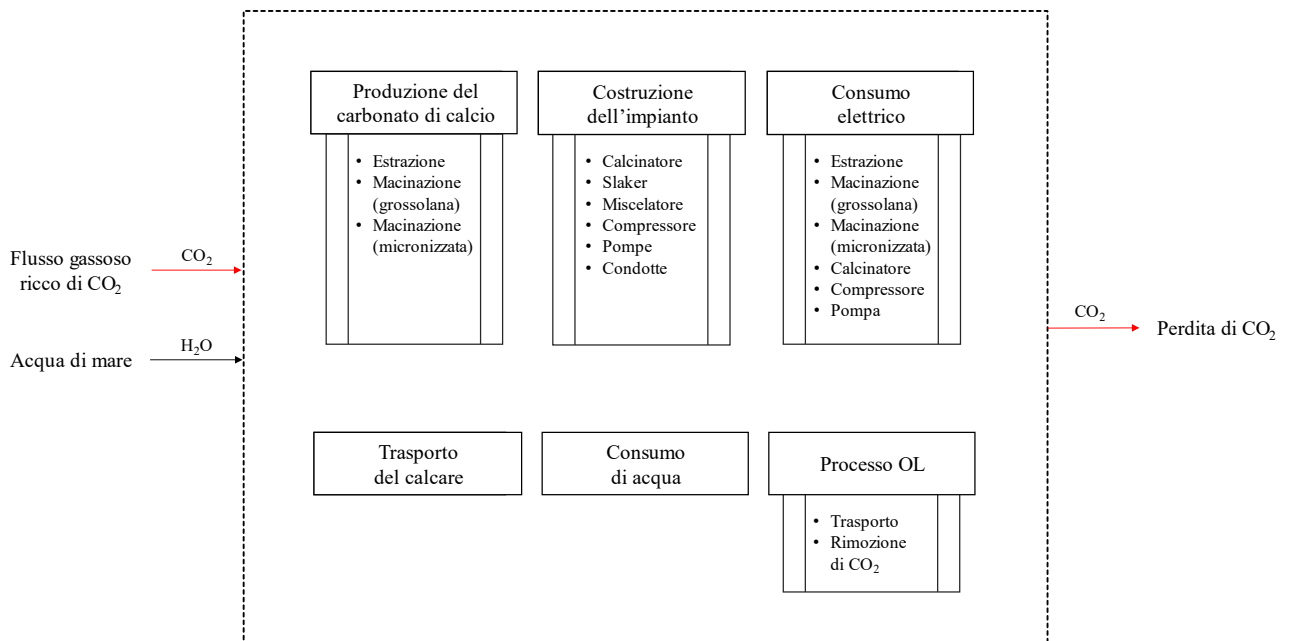


Figura 3.3 – Schema del processo (impianto BAWL-OL).

Categorie di impatto considerate, rispettivi indicatori e metodi di caratterizzazione

In questo studio sono state considerate 16 categorie di impatto che rappresentano diversi impatti sull'ambiente e sulla salute umana. Per la valutazione dell'impatto delle diverse categorie di impatto, riassunte in Tabella 3.1, è stato usato la metodologia EF Method (versione 3.0), definito da "Environmental Footprint initiative" (Allacker et al., 2017). Si tratta delle categorie attualmente

utilizzate negli studi sull'impronta ambientale dei prodotti (Product Environmental Footprint - PEF), come definito nella raccomandazione "EC" della Commissione Europea sull'uso di metodi comuni per misurare e comunicare le prestazioni ambientali del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni (EC, 2013).

Per ogni categoria d'impatto sono stati considerati gli indicatori e i modelli di caratterizzazione sviluppati dal Centro comune di ricerca per la Commissione europea e inclusi nella raccomandazione della Commissione europea (EC, 2013). Le categorie di impatto con i relativi indicatori e modelli di caratterizzazione sono riassunte nella Tabella 3.1. La metodologia per la valutazione degli impatti è implementata in SimaPro 9.3.0.3. Nel presente studio viene utilizzato il software SimaPro, programma utilizzato per conseguire efficienti studi di LCA in linea con le norme ISO.

Tabella 3.1 : Categorie d'impatto del metodo EF method considerate nello studio.

	Categoria d'impatto	Indicatore di categoria di livello	Modello di valutazione dell'impatto
1	Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	Modello basato sui potenziali di riscaldamento globale in un arco temporale di 100 anni (IPCC, 2013)
2	Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	Modello basato sui potenziali di riduzione dello strato di ozono in un arco di tempo infinito (WMO, 1999)
3	Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	Human Health effect (Dreicer et al., 1995)
4	Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS (Van Zeim et al., 2008)
5	Assunzione di materiale particolato	disease inc.	PM method (Fantke et al., 2016)
6	Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)
7	Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)
8	Acidificazione	mol H ⁺ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006; Posch et al., 2008)
9	Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	EUTREND (Struijs et al., 2009)
10	Eutrofizzazione marina	kg N eq	EUTREND (Struijs et al., 2009)
11	Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006; Posch et al., 2008)
12	Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)
13	Uso del suolo	Pt	Set di fattori di caratterizzazione (FC) ricalcolati dal JRCa partire da LANCA® v 2.2 come modello di riferimento. (Bos et al., 2016)
14	Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	Available Water Remaining (Boulay et al., 2016)
15	Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	ADP per i vettori energetici, basato su van Oers et al. (2002) come implementato in CML, v. 4.8 (2016).
16	Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	ADP per i vettori energetici, basato su van Oers et al. (2002) come implementato in CML, v. 4.8 (2016).

Descrizione delle categorie di impatto

➤ Cambiamento climatico

Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) misura la forzante radiativa a seguito di un'emissione di un'unità di massa di un determinato gas serra nell'atmosfera attuale, integrato su un arco temporale di 100 anni, rispetto a quello del biossido di carbonio (IPCC, 2013).

➤ Assottigliamento della fascia di ozono

Misura il potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) calcolando gli effetti distruttivi sullo strato di ozono stratosferico su un orizzonte temporale di 100 anni (WMO, 1999).

➤ Radiazioni ioniche - salute umana

Le radiazioni ionizzanti per la salute umana considerano gli effetti negativi sulla salute umana dovuti al rilascio di radioattività e quantificano l'impatto delle radiazioni ionizzanti rispetto all'isotopo dell'uranio 235 (Dreicer et al., 1995).

➤ Formazione fotochimica di ozono - salute umana

Considera la formazione di ozono al livello del suolo della troposfera causata dall'ossidazione fotochimica di composti organici volatili (COV) e monossido di carbonio (CO) in presenza di ossidi di azoto (NO_x).

➤ Assunzione di materiale particolato

Il modello usato è quello sviluppato, nel 2016, dalla Task Force (TF) UNEP-SETAC sul particolato (PM) (Fantke et al. 2016). Esso mira a valutare i danni alla salute umana derivanti dalle emissioni outdoor e indoor di PM_{2,5} primario e secondario nelle aree urbane e rurali. Il modello valutato non fornisce un fattore di caratterizzazione (FC) per il flusso elementare "PM₁₀", perché la frazione PM_{2,5} è considerata la principale responsabile degli impatti sulla salute umana. Tuttavia, alcuni inventari del ciclo di vita includono solo il PM₁₀ e non il PM_{2,5}. Pertanto, viene fatta un'ipotesi dell'impatto derivante dalle emissioni di PM₁₀ (cioè un relativo FC), per evitare di ignorare alcune delle emissioni incluse nell'inventario. In linea con quanto fatto per la precedente raccomandazione, il FC per il PM₁₀ è calcolato moltiplicando per il 23% il FC del PM_{2,5}. I flussi elementari delle particelle PM_{0,2} e PM_{0,2-2,5} non erano inclusi nel modello originale. Pertanto, per evitare di trascurare l'emissione di particelle molto piccole, è assegnato il FC del PM_{2,5} come indicatore a questi flussi (e ai relativi sotto-companti).

➤ **Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni ed effetti cancerogeni)**

La sua unità di misura è la *Comparative Toxic Unit for humans* (CTUh) ed esprime l'aumento stimato della morbilità nella popolazione umana totale (Rosenbaum et al., 2008).

➤ **Acidificazione**

La categoria di impatto dell'acidificazione tiene conto del rilascio di ioni di idrogeno causato dalle emissioni di NO_x, NH₃ e SO_x.

➤ **Eutrofizzazione (acqua dolce, marina e terrestre)**

L'eutrofizzazione è dovuta al rilascio nell'ambiente di sostanze nutritive (principalmente azoto e fosforo) che accelerano la crescita di alghe e altra vegetazione nell'acqua. La degradazione del materiale organico consuma ossigeno al punto da renderlo carente nell'acqua, provocando la morte dei pesci. L'eutrofizzazione terrestre considera solo le emissioni nell'aria di NH₃ e NO_x emessi nell'aria, poiché la concentrazione di azoto è il fattore limitante negli ecosistemi.

➤ **Ecotossicità - acqua dolce**

La sua unità di misura è la *Comparative Toxic Unit for ecosystems* (CTUe) e misura l'effetto tossico sulle specie acquatiche d'acqua dolce in una colonna d'acqua. Esprime una stima della frazione di specie potenzialmente colpite integrata nel tempo e nel volume in relazione all'unità di massa di una sostanza chimica emessa (Rosenbaum et al., 2008).

➤ **Uso del suolo**

Il modello di base utilizzato per il calcolo dei fattori di caratterizzazione (FC) per l'uso del suolo è il modello LANCA LCIA (Bos et al. 2016). Il modello LANCA fornisce cinque indicatori per valutare gli impatti dovuti all'uso del suolo: resistenza all'erosione, filtrazione meccanica, filtrazione fisico-chimica, rigenerazione delle acque sotterranee e produzione biotica. Tali indicatori sono stati raggruppati e ridimensionati, al fine di ottenere un indice di qualità del suolo adimensionale, che tenga conto delle diverse proprietà valutate dal modello. Il modello assegna sia fattori di caratterizzazione globali che differenziati spazialmente a livello di Paese.

➤ **Uso delle risorse idriche**

I fattori di caratterizzazione per la valutazione della carenza idrica sono stati implementati sulla base del modello AWARE (UNEP 2016). Il modello AWARE prende in considerazione diversi livelli di risoluzione, tuttavia, per la raccomandazione EF, viene adottata solo la scala nazionale.

➤ **Uso delle risorse – combustibili fossili**

Come suggerito da van Oers et al. (2002) e implementato nel metodo CML a iniziare dalla versione 2009, viene definita una categoria d'impatto separata per i combustibili fossili, in base alla loro funzione di vettori energetici. I fattori di caratterizzazione (FC) per i combustibili fossili sono espressi come MJ/MJ, cioè il fattore di caratterizzazione è uguale a 1 per tutte le risorse fossili.

➤ **Uso delle risorse – minerali e metalli**

Per l'uso delle risorse come minerali e metalli, il modello utilizzato è l'Abiotic Resource Depletion, versione "*ultimate reserves*", descritto in van Oers et al. (2002), basato sui metodi di Guinée et al. (2002). I fattori di caratterizzazione (FC) sono indicati come Abiotic Depletion Potential (ADP), quantificati in kg di antimonio equivalente (Sb-eq) per kg di estrazione. I fattori di caratterizzazione raccomandati sono quelli del metodo CML, versione 4.8 (2016).

Fonte dei dati e qualità

La maggior parte dei dati raccolti per l'inventario sono forniti dai progettisti del sistema, dai risultati degli studi su BAWL (Caserini et al., 2021b; Caserini et al., 2022) e la restante parte è stata realizzata con il supporto del database Ecoinvent (versione 3.5).

4. INVENTARIO DEL CICLO DI VITA

Nella fase di inventario (in inglese Life Cycle Inventory – LCI), che rappresenta la seconda fase della metodologia LCA, il sistema viene modellato tramite unità di processo con flussi di massa ed energia in ingresso e in uscita. Gli input delle unità di processo possono provenire dall'ambiente, dalla tecnosfera o da un'altra unità stessa. Allo stesso tempo, gli output possono essere input di un'altra unità, un prodotto o un'emissione nell'ambiente (emissione nell'aria, nell'acqua, nel suolo o un rifiuto da trattare).

In questa sezione vengono presentati i dati di inventario di ciascuna unità di processo per le diverse configurazioni trattate in questo lavoro riportando le fonti dei dati, i processi Ecoinvent utilizzati per la modellazione e le ipotesi fatte. Le unità di processo presentate in questo capitolo sono indicate nello schema del processo in Figura 3.2 e in Figura 3.3 presentate nel paragrafo 3.2.

In questo capitolo si presentano i dati di inventario per un impianto BAWL che cattura e stocca 100.000 tonnellate di CO₂ da fonte esterna situato in Italia. Per la fonte esterna di CO₂ si è considerato un impianto di produzione di idrogeno da gas naturale mediante il processo di *steam methane reforming*. Il flusso gassoso in uscita dal *steam methane reformer* e inviato all'impianto BAWL è composto per il 14% in volume di CO₂.

4.1 Flusso gassoso e acqua dall'oceano

Il flusso gassoso è un gas ricco di CO₂ proveniente da un processo industriale situato nelle vicinanze e viene inviato all'impianto BAWL per catturare e stoccare CO₂ contenuto nel flusso. L'impianto BAWL è stato modellizzato affinché sia in grado di catturare e stoccare annualmente 100.000 tonnellate di CO₂ da fonte esterna, insieme al corrispettivo di CO₂ prodotta dal processo di calcinazione (Tabella 4.1). Per l'impianto BAWL-OL viene stoccato ugualmente un flusso di 100.000 tCO₂, ma in questo caso verrà generato internamente all'impianto per la produzione di Ca(OH)₂ utile all'alcalinizzazione degli oceani.

Tabella 4.1 : Dati di Inventario dei flussi annuali di CO₂ stoccata.

Configurazione	BAWL			
	A	B	C	D
CO ₂ stoccata da fonte esterna [t]	100.000	100.000	100.000	100.000
CO ₂ da calcinazione [t]	42.857	53.846	85.185	127.273
CO ₂ totale stoccata [t]	142.857	153.846	185.185	227.273

L'impianto BAWL necessita di un quantitativo di acqua proveniente dall'oceano per permettere la cattura e lo stoccaggio di CO₂. è stato assunto un rateo di 2.000 m³ di acqua di mare necessari per lo stoccaggio di una tonnellata di CO₂ (Caserini et al., 2021b).

In Tabella 4.2 sono presenti i dati relativi al consumo di acqua di mare per le diverse configurazioni. Per le configurazioni BAWL-OL i valori non variano.

Tabella 4.2 : Dati d'inventario per il flusso gassoso e acqua dall'oceano

Voce nell'Inventario	Processo su Ecoinvent	Unità	BAWL			
			A	B	C	D
Acqua dall'oceano	<i>Water, salt, ocean</i>	<i>m³/UF</i>	2,9	3,1	3,7	4,5

4.2 Produzione del carbonato di calcio

Il processo di produzione del carbonato di calcio è suddiviso in tre fasi che sono estrazione, macinazione grossolana e macinazione micronizzata.

La prima fase tiene conto dei processi di estrazione del calcare dalla miniera, il prodotto di questa unità è un particolato di CaCO₃ con un diametro medio di massimo 200 μm (Kellenberger et al., 2007). La fase di escavazione è stata modellizzata utilizzando il modulo di Ecoinvent “*Limestone, unprocessed, limestone quarry operation*” che include i consumi di materiale ed energia necessari per l'escavazione, per esempio il quantitativo di esplosivo, i combustibili per il funzionamento dei macchinari, la trasformazione del suolo da area forestata a sito estrattivo minerario.

Successivamente il carbonato di calcio subisce una riduzione delle dimensioni delle particelle a seconda della sua applicazione: 1-10 μm per il miscelatore e più grossolane per la produzione di idrossido di calcio. I quantitativi dei due diversi flussi variano per ciascuna configurazione (Tabella 4.3). Per i casi dell'impianto BAWL-OL, i quantitativi di CaCO₃ sono nettamente superiori a causa di una maggior richiesta di materiale necessario alla produzione di Ca(OH)₂ per il processo di OL.

Per ciascuna delle unità di processo della fase di macinazione grossolana e fine è stato azzerato l'input riguardante il consumo di energia elettrica poiché è stato incluso nell'unità di processo “Consumo energetico” (paragrafo 4.6) che raggruppa i principali consumi energetici durante la fase di funzionamento dell'impianto. Il modulo di Ecoinvent “*Limestone, crushed, washed, production*”, privato dei consumi di energia elettrica e del calcare in ingresso perché già inclusi nell'inventario del processo, è stato utilizzato per la modellizzazione della macinazione delle particelle più grossolane. Il modulo include i processi necessari per la triturazione del particolato fino alle dimensioni di 14-40

mm di diametro (Kellenberger et al., 2007), il flusso di CaCO_3 generato viene poi inviato al calcinatore.

Infine, la macinazione micronizzata è l'ultima fase che rappresenta un trattamento di sminuzzatura, il quale genera un prodotto finale di dimensioni micrometriche affinché il CaCO_3 , una volta inserito nel miscelatore, si disciolga completamente in acqua lungo la condotta che trasporta lo "slurry" nelle profondità marine. Le dimensioni finali di quest'ultimo particolato sono di 10 μm , 2 μm o 1 μm , a seconda della configurazione in esame, come descritto nel Capitolo 2. Per quest'ultima fase, macinazione micronizzata, è stato creato un nuovo processo che include le seguenti voci: nastro trasportatore, macchinari industriali pesanti ed emissioni in atmosfera di materiale particolato. Per i valori delle precedenti voci sono state considerati i moduli "Limestone, crushed, for mill, production" e "Limestone, milled, loose, at plant", presenti nel database Ecoinvent.

Tabella 4.3 : Dati dell'inventario del quantitativo di carbonato di calcio (CaCO_3) necessario per ciascun processo in ciascuna configurazione. (kg CaCO_3/UF)

Configurazione	Unità di misura	BAWL				BAWL-OL			
		A	B	C	D	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Estrazione	kg CaCO_3/UF	2,6	2,6	2,8	2,9	4,8	4,9	5,0	5,1
Macinazione grossolana	kg CaCO_3/UF	0,9	1,2	1,9	2,9	3,2	3,5	4,2	5,1
Macinazione micronizzata	kg CaCO_3/UF	1,6	1,4	0,8	-	1,6	1,4	0,8	-

4.3 Trasporto del calcare

La progettazione di un impianto BAWL deve essere svolta per minimizzare gli impatti. Al fine di minimizzare le emissioni dovute al trasporto del calcare estratto, il posizionamento dell'impianto BAWL deve essere strategico, ovvero vicino alla costa, ad una miniera di calcare e in prossimità dell'impianto i cui fumi vengono trattati per catturare e stoccare CO_2 tramite il processo BAWL. Il presente lavoro è stato svolto per un'analisi generica di un impianto in Italia, dove lo studio di Caserini et al. (2022) riporta un'ampia disponibilità di miniere lungo la zona costiera che è conveniente per il posizionamento dell'impianto. Nell'analisi di sensitività è stata considerata la Norvegia come altra possibile localizzazione geografiche dell'impianto BAWL. Si è assunto che il calcare estratto dalla cava venga trasportato in camion fino all'impianto per un tratto di 10 km.

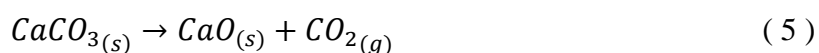
Per quantificare il trasporto sono state utilizzate i moduli del database Ecoinvent raffigurati in Tabella 4.4, le quali sono state inserite nel processo BAWL quantificando la quantità trasportata di kg di CaCO_3 per i km fatti da ciascun mezzo rapportati all'UF.

Tabella 4.4 : Tipologia di trasporto.

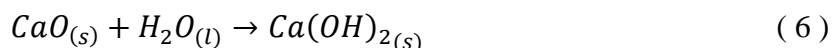
	Voce nell'Inventario	Processo su Ecoinvent	Unità
Input	Camion	<i>Transport, freight, lorry, unspecified</i>	<i>kg * km / UF</i>

4.4 Costruzione dell'impianto

L'impianto BAWL è costituito da diversi macchinari di cui viene tenuta in considerazione la loro costruzione. Dunque, il processo "costruzione dell'impianto" è suddiviso in unità di processo che rappresentano le fasi di produzione e messa in posa di macchinari o infrastrutture. Le diverse unità da cui è costituito il processo sono: calcinatore, slaker, miscelatore, compressore, pompe e condotte. Il calcinatore elettrico permette la produzione di ossido di calcio secondo la reazione endotermica (5) ad alta temperatura, tra i 900 °C e 1000 °C (Basu et al., 2011).



L'energia necessaria per la calcinazione è in gran parte la componente principale del consumo energetico di cui viene tenuto conto nell'unità di processo corrispondente (paragrafo 4.6). L'ossido di calcio prodotto dal calcinatore viene poi trasformato in idrossido di calcio in uno slaker con l'aggiunta di acqua, secondo la seguente reazione (6) esotermica.



Il calore rilasciato dal raffreddamento dell'ossido di calcio e dal processo di idratazione (*slaking*) viene utilizzato per far evaporare l'acqua che, a sua volta, viene utilizzata come flusso all'interno del calcinatore per abbassare le temperature di calcinazione, riducendo così i consumi elettrici.

Le quantità di materiale da costruzione necessario per il calcinatore e lo slaker sono state calcolate in funzione del prodotto uscente dal macchinario, ovvero kg di CaO e kg di Ca(OH)₂, e modellizzate attraverso il modulo presente nel database Ecoinvent che viene utilizzato per questo tipo di macchinario, ovvero "*Industrial machine, heavy, unspecified, production*".

Nel miscelatore (MIX), Figura 4.1, il gas ricco di CO₂ proveniente dalla fonte esterna e la CO₂ rilasciata dal processo di calcinazione vengono trattati con un'adeguata quantità di acqua di oceano (2000 m³/tCO₂) e di CaCO₃. La presenza di un generatore di bolle collocato nella parte inferiore della colonna produce bolle fini che si mescolano con un flusso discendente di acqua. Per trattare annualmente quantitativi di CO₂ come quelli espressi in Tabella 4.1 servono portate di acqua tra i 10 e 15 m³/s; considerando un tempo di residenza del flusso d'acqua all'interno del MIX di almeno 90

secondi, necessario per l'idratazione della CO₂ in acqua di mare (Zeebe et al., 1999), si ha un volume totale del MIX che varia da circa 860 a 1.370 m³ a seconda della configurazione. Utilizzando un sistema commerciale di scrubbing ad acqua (Carbonreuse 2021) con un'efficienza di cattura della CO₂ maggiore del 95%, la restante parte di gas, che non viene assorbita dall'acqua di mare, viene rilasciata in modo controllato all'esterno dalla parte superiore del MIX. Infine, avviene l'aggiunta di CaCO₃ micronizzato a valle della dissoluzione della CO₂ nell'acqua.

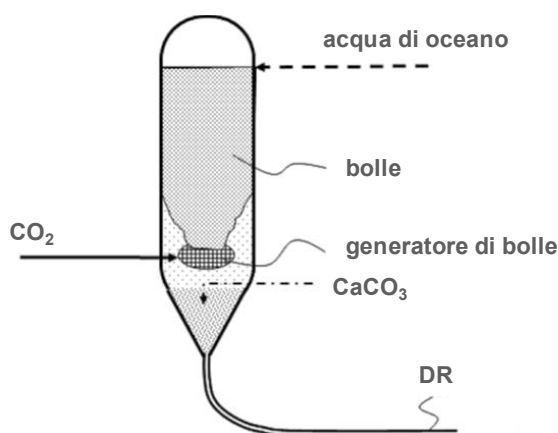


Figura 4.1 – Schema del miscelatore.

Per l'inventario dei materiali da costruzione del miscelatore è stato considerato un silos perché composto dagli stessi materiali da costruzione (principalmente calcestruzzo, cemento, ferro e fibra di vetro). Le quantità di materiale necessario sono state calcolate in base alla capienza del miscelatore. È stato modellizzato attraverso il modulo “*Tower silo, plastic, production*” in base ai m³ di acqua che il miscelatore deve trattare. Inoltre, è stata riportata all'interno del processo l'emissione in atmosfera di CO₂ a causa della non completa efficienza del miscelatore; essa consiste nel 5% della CO₂ totale inviata al miscelatore e viene conteggiata come un'emissione in aria. In Tabella 4.5 e Tabella 4.6 sono stati riportati i dati relativi al miscelatore e all'emissioni di CO₂. I valori rimangono invariati anche per le configurazioni dell'impianto BAWL-OL. Le emissioni di CO₂ sono riportate nei bilanciamenti di massa nelle Figure Figura 0.1-Figura 0.2-Figura 0.3-Figura 0.4 nell'Appendice.

Tabella 4.5 : Dati di inventario per il miscelatore.

	Voce nell'Inventario	Processo su Ecoinvent	Unità	BAWL			
				A	B	C	D
Input	Miscelatore	<i>Tower silo, plastic, production</i>	m ³ / UF	3,44 E-07	3,71 E-07	4,46 E-07	5,48 E-07

Tabella 4.6 : Dati di inventario per l'emissione di CO₂.

	Voce nell'Inventario	Emissione	Unità				
Emissione in aria	CO ₂ emessa in aria	Carbon dioxide	kg CO ₂ / UF	0,071	0,076	0,092	0,113

L'uso di un compressore per introdurre i gas nel miscelatore richiede una potenza che varia tra i 1,4 e 2,5 MW a seconda della configurazione analizzata (De Marco et al., 2022). Per la sua modellizzazione all'interno del programma è stato utilizzato il processo del database, "Compressor, gas turbine 10MW electrical" come assunto anche da Koornneef et al. (2008). Invece, il sistema di pompaggio dei flussi acquosi è composto da due pompe una per la spinta dell'acqua salina nel miscelatore e lungo la condotta (DR) e l'altra per il trasporto della soluzione contenente Ca(OH)₂ nella condotta denominata SL. Questo sistema richiede una potenza complessiva che varia da 2,3 a 3,5 MW per le diverse configurazioni (De Marco et al., 2022). La sua costruzione è stata modellizzata attraverso il processo presente nel database Ecoinvent, denominato "Pump, 40W, production".

Entrambe le unità di processo con cui viene rappresentata la costruzione del compressore e delle pompe fanno riferimento a potenze diverse da quelle necessarie all'impianto. Attraverso un rapporto tra la potenza richiesta dall'impianto e la potenza del processo del database, viene calcolato il corrispettivo di materiali necessari (Tabella 4.7).

Tabella 4.7 : Dati d'inventario per il compressore e le pompe.

				BAWL			
	Voce nell'Inventario	Processo su Ecoinvent	Unità	A	B	C	D
Input	Compressore	Compressor, gas turbine 10MW electrical	pezzi / UF	2,52 E-10	1,49 E-10	1,98 E-10	2,60 E-10
	Pompe	Pump, 40W, production	pezzi / UF	3,47 E-05	2,46 E-05	3,41 E-05	2,35 E-05

Infine, la posa delle condotte in polietilene ad alta densità (in inglese high-density polyethylene, HDPE) viene definita attraverso un processo che tiene conto del materiale plastico necessario, "Polyethylene, high density, granulate, production", e di un processo che considera l'estrusione delle tubazioni, "Extrusion, plastic pipes". Nell'impianto sono presenti la condotta DR che trasporta l'acqua salina ricca di CO₂ disciolta e particolato di CaCO₃ e la condotta SL che trasporta una soluzione acquosa ricca di Ca(OH)₂. Le due condotte hanno diametri e spessori diversi poiché trasportano portate differenti. In Tabella 4.8 e Tabella 4.9 sono presenti le caratteristiche di entrambe le condotte per i vari casi, dalla quale sono stati calcolati i quantitativi di kg di materiale polietilene

necessari per la costruzione. Noti i quantitativi di materiale necessario, sono stati calcolati i valori degli input per il processo BAWL (Tabella 4.10).

Tabella 4.8 : Caratteristiche della condotta DR nelle quattro configurazioni. (De Marco et al., 2022)

		BAWL			
Processo su Ecoinvent	Unità	A	B	C	D
Portata d'acqua	<i>t / h</i>	34.423	37.071	44.623	54.765
Diametro Esterno (DE)	<i>m</i>	3,40	3,10	2,70	2,50
Standard Dimension Ratio (SDR)	-	41	41	41	41
Diametro Interno (DI)	<i>m</i>	3,23	2,95	2,57	2,38
Velocità media del flusso	<i>m / s</i>	1,2	1,5	2,4	3,4

Tabella 4.9 : Caratteristiche della condotta SL nelle quattro configurazioni. (De Marco et al., 2022)

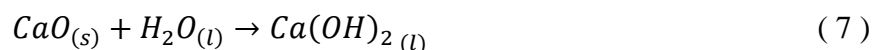
		BAWL			
Processo su Ecoinvent	Unità	A	B	C	D
Portata d'acqua	<i>t / h</i>	2.970	3.814	6.074	-
Diametro Esterno (DE)	<i>m</i>	0,98	0,86	0,89	-
Standard Dimension Ratio (SDR)	-	41	41	41	-
Diametro Interno (DI)	<i>m</i>	0,94	0,82	0,85	-
Velocità media del flusso	<i>m / s</i>	1,2	2,0	3,0	-

Tabella 4.10 : Dati d'inventario per le condotte.

				BAWL			
	Voce nell'Inventario	Processo su Ecoinvent	Unità	A	B	C	D
Input	Tubazioni	<i>Polyethylene, high density, granulate, production</i>	<i>kg HDPE / UF</i>	8,97 E-03	1,85 E-03	5,78 E-04	2,24 E-04
		<i>Extrusion, plastic pipes</i>	<i>kg HDPE / UF</i>	8,97 E-03	1,85 E-03	5,78 E-04	2,24 E-04

4.5 Consumo acqua

Il processo di idratazione della CaO nello slaker richiede un quantitativo di acqua affinché la reazione (7) avvenga.



Il quantitativo di acqua necessario viene calcolato attraverso il rapporto stechiometrico della reazione e i valori sono riportati in Tabella 4.11. Nelle diverse configurazioni studiate in questo lavoro si può notare come esse siano legate ad un differente quantitativo di acqua annuale necessario al processo. Ciò è dovuto ad una crescente richiesta della produzione di Ca(OH)₂ per le varie configurazioni.

Tabella 4.11 : Consumo annuale di acqua di rete per ciascuna configurazione, espresso in m³.

Configurazione	BAWL				BAWL-OL			
	A	B	C	D	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Consumo di acqua annuo [m ³ /anno]	16.800	21.600	34.300	51.600	57.700	62.500	75.200	92.500

Nel seguente studio, viene assunto un impianto che utilizza acqua dalla rete. Dato che l'impianto è situato in Italia, è stato usato il modulo di Ecoinvent "Tap water, market for".

4.6 Consumo energetico

Dall'analisi dei vari processi descritti precedentemente (es. "Limestone, unprocessed, limestone quarry operation"), nel database Ecoinvent i consumi elettrici vengono espressi come un consumo di energia di medio voltaggio. Pertanto, in questo lavoro, è stato usato il corrispettivo processo "Electricity, medium voltage" che rappresenta la situazione italiana nel 2017 in cui vi è una forte dipendenza dai combustibili fossili. In Tabella 4.12 sono raffigurate le percentuali del mix energetico italiano scelto.

Tabella 4.12 : Fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica in Italia.

	Percentuale [%]
Fonti fossili	54
Geotermico	2
Idroelettrico	21
Eolico	6
Importato	17

Le quantità di energia consumate durante la funzione dell'impianto sono state calcolate tenendo conto delle attività di estrazione, macinazione (grossolana), macinazione (micronizzata), calcinazione, compressione del gas e pompaggio dei fluidi. Per il processo di estrazione è stato considerato il valore di $2,73 \cdot 10^{-05}$ kWh per 1 kg di CaCO₃ disponibile sul database Ecoinvent. Lo stesso calcolo è stato fatto per il processo di macinazione grossolana attraverso il quantitativo energetico del modulo Ecoinvent, $7,20 \cdot 10^{-04}$ kWh/kgCaCO₃. L'energia necessaria per la macinazione micronizzata è stata calcolata in base ai dati in letteratura. La triturazione del particolato da 200 µm (dimensioni CaCO₃ uscente da estrazione, Kellenberger et al., 2007) a dimensioni di 10, 2 e 1 µm viene suddiviso in 2 fasi. Vi è un primo consumo energetico di $3,25 \cdot 10^{-02}$ kWh per ciascun kg di CaCO₃ che porta il

particolato a dimensioni sotto ai 200 μm di diametro (Kellenberger et al., 2007). Il secondo consumo energetico invece è stato calcolato attraverso la legge di Bond (Bond, 1961) usata in diversi articoli come Strefler et al. (2018) e Lefebvre et al. (2019). La legge di Bond è descritta dalla seguente formula:

$$W = 10W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) * 0,0036 \quad (8)$$

dove W [GJ/t] è l'energia necessaria per la frantumazione, W_i è una costante pari 14,94 kWh/t e F_{80} e P_{80} sono rispettivamente le dimensioni di partenza e finali del particolato espresse in μm . Inserendo il valore 200 μm come F_{80} e i valori delle dimensioni richieste per ciascuna configurazione come P_{80} , si ottengono i consumi energetici delle tre configurazioni, ad eccezione del caso D nel quale non avviene nessuna macinazione micronizzata.

Il consumo energetico dovuto al processo di calcinazione è stato calcolato attraverso la cinetica della reazione, dal quale si ricava che sono necessari 0,69 kWh per ogni kg di CaCO_3 inviato al calcinatore (Basu et al., 2011). Infine, l'energia consumata da compressori e pompe è stata calcolata nel lavoro di De Marco et al. (2022), tenendo conto sia delle quantità di fluidi trattati e sia delle variazioni di pressione che si vanno ad affrontare a seconda delle profondità a cui viene immesso la soluzione salina finale ricca di ioni di bicarbonato.

In Tabella 4.13 e Tabella 4.14 sono rappresentati i valori ottenuti delle quantità di energia consumate annualmente all'interno dell'impianto.

Tabella 4.13 : Energia consumata annualmente dai processi per le quattro configurazioni in un impianto BAWL.

Processo	BAWL			
	A	B	C	D
Estrazione [MWh/anno]	7	7	8	8
Macinazione (grossolana) [MWh/anno]	67	86	137	207
Macinazione (micronizzata) [MWh/anno]	11.233	17.844	14.421	-
Calcinazione [MWh/anno]	64.371	82.641	131.606	197.982
Compressore [MWh/anno]	20.150	11.905	15.836	20.808
Pompe [MWh/anno]	28.801	20.418	28.278	19.480
Totale [MWh/anno]	124.630	132.901	190.286	238.485

Tabella 4.14 : Energia consumata annualmente dai processi per le quattro configurazioni in un impianto BAWL-OL.

Processo	BAWL-OL			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Estrazione [MWh/anno]	13	13	14	14
Macinazione (grossolana) [MWh/anno]	231	250	301	370
Macinazione (micronizzata) [MWh/anno]	11.233	17.844	14.421	-
Calcinazione [MWh/anno]	221.190	239.459	288.425	354.801
Compressore [MWh/anno]	20.150	11.905	15.836	20.808
Pompe [MWh/anno]	28.801	20.418	28.278	19.480
Totale [MWh/anno]	281.618	289.889	347.274	395.473

4.7 Processo OL

Per l'analisi dell'impianto BAWL-OL attraverso la metodologia LCA, il sistema è stato modellizzato come l'impianto BAWL ma con l'aggiunta di due ulteriori fasi che rappresentano il processo OL, cioè il trasporto e lo scarico in mare di Ca(OH)_2 tramite navi e la conseguente rimozione di CO_2 dall'atmosfera.

Il processo OL, descritto nel paragrafo 2.2, è stato modellizzato attraverso due processi (Tabella 4.15) per tenere conto della tratta svolta della nave per il rilascio della Ca(OH)_2 e della rimozione di CO_2 .

Per lo scaricamento in mare è stato considerato il modulo di Ecoinvent per il trasporto via mare mediante navi commerciali, portarinfuse per carichi non liquidi con capacità pari a 51.000 tonnellate. La quantità considerata è stata calcolata in base alla quantità in kg di Ca(OH)_2 per UF, moltiplicata poi per un fattore di trasporto pari a $\frac{1}{2}$ poiché durante il trasporto la calce spenta viene scaricata, perciò, la nave non trasporta la quantità totale durante tutto il viaggio ma in media la metà della quantità iniziale. Mentre la distanza percorsa è calcolata attraverso la seguente formula (9) in funzione della quantità trasportata (kg/UF).

$$distanza = v_n * \frac{q_{\text{Ca(OH)}_2}}{r_s} * \frac{1 h}{3600 s} \quad (9)$$

Dove v_n è la velocità della nave che viaggia a 20 km/h, $q_{\text{Ca(OH)}_2}$ è la quantità trasportata per UF, ovvero 1,68 kg Ca(OH)_2 /UF, e r_s è il rateo di scarico considerato pari a 20 kg/s, 50 volte inferiore rispetto a 1 t/s assunto dallo studio Renforth et al. (2013).

L'assorbimento di CO_2 dall'atmosfera dovuto all'*ocean liming* è stato valutato in letteratura in un intervallo di 1,4 e 1,7 moli di CO_2 per mole di Ca(OH)_2 invece di 2 moli di CO_2 per mole di Ca(OH)_2 dalla stechiometria (relazione 4 del paragrafo 2.2) (Renforth et al., 2013; Keller et al., 2014).

È stato assunto un valore conservativo dell'assorbimento di carbonio da parte dell'oceano pari a 1,4 moli di CO₂ per mole di Ca(OH)₂, cioè l'anidride carbonica rimossa dall'atmosfera è pari a 0,832 per kg di Ca(OH)₂. Calcolato il quantitativo di CO₂ rimosso per UF attraverso OL, è stato inserito nel programma con il segno negativo per indicare un assorbimento dall'atmosfera al contrario del segno positivo che indica un'emissione in aria. I bilanciamenti di massa della CO₂ per le quattro configurazioni dell'impianto BAWL-OL sono rappresentati nelle Figure Figura 0.5-Figura 0.6-Figura 0.7-Figura 0.8 (riportate nell'Appendice) e tengono conto della CO₂ assorbita dall'atmosfera attraverso il processo OL.

Tabella 4.15 : Dati d'inventario per il processo OL.

	Voce nell'Inventario	Processo	Unità	BAWL-OL
Input	Processo OL	<i>Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods</i>	<i>kg Ca(OH)₂ * km / UF</i>	3,93 E-04
		<i>CO₂ removed from OL</i>	<i>kg CO₂ / UF</i>	- 1,40

5. RISULTATI

In questo capitolo sono riportati e valutati i risultati ottenuti tramite il software per svolgere analisi di ciclo di vita SimaPro.

I potenziali impatti totali ambientali delle quattro configurazioni dell'impianto BAWL sono rappresentati nella Tabella 5.1. Il principale risultato è la bassa o addirittura nulla efficienza di stoccaggio, calcolata sottraendo ad 1 kg di CO₂ stoccata, il valore corrispondente di kg di CO₂ equivalenti per configurazione, espresso nella categoria d'impatto *cambiamento climatico*. Tale categoria rappresenta i kg di CO₂eq emessi dalla realizzazione e dal funzionamento dell'impianto BAWL per ogni kg di CO₂ esterna stoccata dall'impianto. Si riscontra che per le tre configurazioni A, B e C la bassa efficienza di stoccaggio risulta rispettivamente pari a 39%, 37% e 12% (Tabella 5.2). Per quanto concerne la configurazione D, essa risulta controproducente allo scopo dell'impianto, poiché lo stoccaggio di 1 kg di CO₂ comporta una produzione di 1,10 kg di CO₂eq, e dunque nessun beneficio per l'ambiente. Inoltre, per tutte le configurazioni sono state calcolate ulteriori categorie d'impatto, i quali valori sono stati scalati per poterne garantire un maggior confronto tra i casi studiati, visionabili in Tabella 5.3.

Tabella 5.1 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL.

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL			
		A	B	C	D
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	0,61	0,63	0,88	1,10
Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	7,2E-08	7,6E-08	1,1E-07	1,4E-07
Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	7,2E-02	7,6E-02	1,1E-01	1,4E-01
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	1,3E-03	1,4E-03	1,9E-03	2,3E-03
Assunzione di materiale particolato	disease inc.	1,2E-08	1,2E-08	1,5E-08	1,9E-08
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	3,0E-08	3,1E-08	4,4E-08	5,4E-08
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	4,1E-09	4,0E-09	5,3E-09	6,2E-09
Acidificazione	mol H ⁺ eq	2,6E-03	2,6E-03	3,7E-03	4,6E-03
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	1,2E-04	1,2E-04	1,8E-04	2,2E-04
Eutrofizzazione marina	kg N eq	4,3E-04	4,4E-04	6,0E-04	7,4E-04
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	4,9E-03	5,0E-03	6,9E-03	8,4E-03
Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	0,14	0,13	0,18	0,22
Uso del suolo	Pt	2,84	2,93	4,13	5,13
Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	0,37	0,38	0,54	0,68
Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	8,59	8,54	12,01	14,98
Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	7,3E-07	7,0E-07	9,2E-07	1,0E-06

Tabella 5.2 : Efficienze di stoccaggio della CO₂ dell'impianto BAWL per le quattro configurazioni.

	Configurazioni			
	A	B	C	D
IT	39%	37%	12%	-10%

Nella Tabella 5.3, i potenziali impatti totali delle quattro configurazioni sono presentati come rapporto rispetto al risultato della configurazione con il valore più alto ottenuto in quella categoria d'impatto. L'impatto totale di ciascuna categoria è quindi espresso in percentuale ed è calcolato tramite la seguente equazione:

$$(\text{Impatto totale in } \%)_n = \frac{(\text{Impatto totale})_n}{\text{Massimo}(\text{Impatto totale})_n} * 100 \quad \text{in cui } n = \{A, B, C, D\} \quad (10)$$

Il caso D risulta il più impattante in tutte le categorie d'impatto, ciò è dovuto principalmente alla grande richiesta di energia elettrica dell'impianto. Difatti, dall'analisi dei contributi conseguita e trattata nel successivo paragrafo 5.1, il consumo energetico è risultato il processo con un impatto maggiore rispetto agli altri in tutte le categorie d'impatto. Infine, si nota che la configurazione A risulta nella maggioranza delle categorie d'impatto quella più performante, fatta eccezione per *Tossicità per l'uomo – effetti cancerogeni*, *Ecotossicità – acqua dolce* e *Uso delle risorse – minerali e metalli* dove la configurazione B mostra migliori risultati. Gli impatti della configurazione A sono dal 29% al 47% inferiori rispetto alla configurazione D, mentre l'intervallo di riduzione degli impatti delle configurazioni B e C rispetto gli impatti del caso D è più ristretto, rispettivamente 32-44% e 11-20%.

Tabella 5.3 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL, rapportati al valore maggiore per ciascuna categoria di impatto ed espressi in percentuale (%).

Categoria d'impatto	BAWL			
	A	B	C	D
Cambiamento climatico	56	58	80	100
Assottigliamento della fascia di ozono	53	56	80	100
Radiazioni ioniche - salute umana	53	56	80	100
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	58	59	81	100
Assunzione di materiale particolato	62	62	83	100
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	56	58	81	100
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	65	64	85	100
Acidificazione	56	58	81	100
Eutrofizzazione - acqua dolce	54	56	80	100
Eutrofizzazione marina	58	59	81	100
Eutrofizzazione terrestre	58	60	82	100
Ecotossicità - acqua dolce	62	61	83	100
Uso del suolo	55	57	80	100
Uso delle risorse idriche	54	56	80	100
Uso delle risorse – combustibili fossili	57	57	80	100
Uso delle risorse – minerali e metalli	71	68	89	100

Dall'elaborazione dei risultati concernenti il BAWL, si è proseguito con la valutazione degli impatti delle configurazioni che combinano il processo di cattura e stoccaggio BAWL con il metodo di rimozione di CO₂ dall'atmosfera OL.

Nella Tabella 5.4 sono rappresentati i potenziali impatti ambientali delle quattro configurazioni BAWL-OL. Il principale risultato è la presenza di impatti con segno negativo per le configurazioni A+OL e B+OL, che rappresentano dunque un beneficio per la categoria *cambiamento climatico*. Questo risultato è dovuto al processo OL che, attraverso la rimozione di CO₂ dall'atmosfera, genera degli impatti che assumono valori di segno negativo, ossia rappresentano un beneficio per l'ambiente. In quanto, nella categoria *cambiamento climatico* valori con segno positivo indicano un'emissione in atmosfera mentre valori con segno negativo rappresentano una rimozione di CO₂ dall'atmosfera per i casi studiati.

Per l'impianto BAWL-OL, essendo un processo realizzato al fine di rimuovere CO₂ dall'atmosfera, viene valutata la sua efficienza di rimozione. L'efficienza di rimozione viene calcolata attraverso il rapporto tra i valori ottenuti per la categoria *cambiamento climatico* e il valore $-1,4 \text{ kgCO}_{2,\text{rimossa}}/\text{UF}$ uguale per tutte e quattro le configurazioni, quest'ultimo rappresenta il quantitativo di CO₂ rimossa

dalla tecnologia OL per ogni kg di CO₂ generato dalla produzione di Ca(OH)₂. Questo valore deriva dall'assunzione fatta sulla rimozione di CO₂ nel paragrafo 4.7, ovvero 1,4 moli di CO₂ per mole di idrossido di calcio scaricato in mare, e dal fatto che l'unità funzionale (UF), ossia 1 kg di CO₂ stoccata tramite il processo BAWL, proviene dal calcinatore elettrico per la produzione di Ca(OH)₂ da utilizzare nel processo OL, corrispondenti a 1,7 kg di Ca(OH)₂/UF.

Le efficienze relative alle configurazioni A+OL e B+OL risultano basse, 10% e 8%, come mostrato in Tabella 5.5. Mentre per le configurazioni C+OL e D+OL si ottengono delle percentuali negative che vanno a significare l'inefficienza dell'impianto, ovvero che in questi casi il processo BAWL-OL provoca nel complesso uno svantaggio per l'ambiente.

Tabella 5.4 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL-OL.

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL-OL			
		A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	-0,14	-0,12	0,13	0,35
Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	1,6E-07	1,7E-07	2,0E-07	2,2E-07
Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	1,6E-01	1,6E-01	2,0E-01	2,2E-01
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	2,9E-03	2,9E-03	3,4E-03	3,8E-03
Assunzione di materiale particolato	disease inc.	2,4E-08	2,4E-08	2,8E-08	3,1E-08
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	6,5E-08	6,6E-08	7,9E-08	8,9E-08
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	8,1E-09	8,0E-09	9,3E-09	1,0E-08
Acidificazione	mol H ⁺ eq	5,6E-03	5,7E-03	6,7E-03	7,6E-03
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	2,6E-04	2,7E-04	3,2E-04	3,7E-04
Eutrofizzazione marina	kg N eq	9,2E-04	9,4E-04	1,1E-03	1,2E-03
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,4E-02
Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	0,28	0,28	0,33	0,36
Uso del suolo	Pt	6,23	6,33	7,52	8,53
Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	0,82	0,84	1,00	1,14
Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	18,46	18,41	21,88	24,85
Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	1,3E-06	1,3E-06	1,5E-06	1,6E-06

Tabella 5.5 : Efficienze di stoccaggio della CO₂ dell'impianto BAWL-OL per le quattro configurazioni.

	Configurazioni			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
IT	10%	8%	-9%	-25%

Come fatto in precedenza per l'impianto BAWL, i risultati ottenuti per l'impianto BAWL-OL per ciascuna categoria sono stati rapportati ed espressi in percentuale per garantire confrontabilità, come riportato in Tabella 5.6. Anche in questa analisi si nota che la configurazione D+OL causa gli impatti maggiori in tutte le categorie d'impatto mentre la configurazione A+OL risulta mediamente la migliore. A seguito degli impatti per il trasporto e lo scarico in mare dell'idrossido di calcio, l'intervallo di riduzione degli impatti passando dalla configurazione D alle altre si riduce, 18-28%, 20-24% e 7-12% rispettivamente per le configurazioni A, B e C, eccetto per la categoria *cambiamento climatico*. In questa categoria di impatto, il contributo di rimozione di CO₂ da parte del processo OL accresce il divario delle varie configurazioni rispetto al caso D.

Tabella 5.6 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL-OL, rapportati al valore maggiore per ciascuna categoria di impatto ed espressi in percentuale (%).

Categoria d'impatto	BAWL-OL			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Cambiamento climatico	-40	-34	37	100
Assottigliamento della fascia di ozono	72	74	88	100
Radiazioni ioniche - salute umana	72	74	88	100
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	75	76	89	100
Assunzione di materiale particolato	77	77	90	100
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	73	74	89	100
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	79	78	91	100
Acidificazione	73	75	88	100
Eutrofizzazione - acqua dolce	72	74	88	100
Eutrofizzazione marina	75	76	89	100
Eutrofizzazione terrestre	75	76	89	100
Ecotossicità - acqua dolce	77	77	90	100
Uso del suolo	73	74	88	100
Uso delle risorse idriche	72	74	88	100
Uso delle risorse – combustibili fossili	74	74	88	100
Uso delle risorse – minerali e metalli	82	80	93	100

5.1 Analisi dei contributi

L'analisi dei contributi si riferisce alla procedura di individuazione dell'influenza di ciascuna unità di processo in riferimento ad una determinata categoria d'impatto della tecnologia analizzata. Tale analisi è stata supportata tramite rappresentazione grafica per mezzo di un grafico a barre impilate 100%. Il grafico riporta 16 barre, ognuna rappresentante le 16 categorie d'impatto analizzate, presentate nel paragrafo 3.2. Ogni barra raggiunge il valore 100% di impatto totale, che rappresenta la somma dei contributi di ciascuna unità di processo. I segmenti colorati delle barre rappresentano i contributi relativi delle unità di processo alla rispettiva categoria d'impatto. Ciò significa che più è alto il segmento dell'unità di processo, più impattante è l'unità di processo per quella categoria. In questo modo, è possibile verificare come si distribuisce il contributo di ciascuna unità di processo per ogni categoria d'impatto.

Le analisi dei contributi per le categorie d'impatto esaminate sono riportate in Figura 5.1 e nelle Figura 0.9-Figura 0.10-Figura 0.11 (riportate nell'Appendice) per le quattro configurazioni inerenti all'impianto BAWL. Nella configurazione A dell'impianto BAWL i contributi positivi maggiori sono dovuti al Consumo energetico per tutte le categorie di impatto, superando anche l'80% per le categorie *Cambiamento climatico*, *Assottigliamento della fascia di ozono*, *Radiazioni ioniche – salute umana*, *Formazione fotochimica di ozono – salute umana*, *Tossicità per l'uomo – effetti non cancerogeni*, *Acidificazione*, *Eutrofizzazione – acqua dolce*, *Eutrofizzazione marina*, *Eutrofizzazione terrestre*, *Uso del suolo*, *Uso delle risorse idriche*, *Uso delle risorse – combustibili fossili*. Per le restanti categorie, nonostante il consumo energetico sia il contributo maggiore, si hanno dei contributi consistenti da parte dei processi di produzione della CaCO_3 e di costruzione dell'impianto. Per l'ultima categoria, *Uso delle risorse, minerali e metalli*, si ha un contributo del 30% circa da parte del processo di Costruzione dell'impianto a causa della richiesta di materiale, ovvero di materie prime, per la realizzazione dell'impianto. Le analisi dei contributi delle configurazioni B, C e D non si discostano molto da quella del caso A, difatti vi è un lieve aumento del contributo da parte del consumo energetico dato da una maggiore domanda energetica.

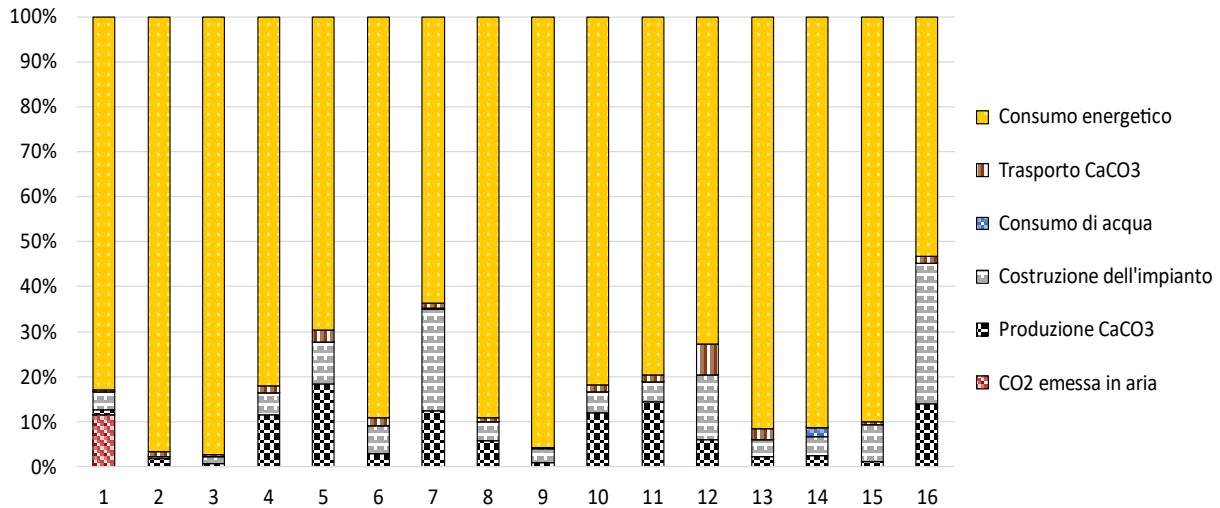


Figura 5.1 – Analisi dei contributi della configurazione A (BAWL).

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Usa del suolo; 14. Usa delle risorse idriche; 15.Usa delle risorse-combustibili fossili; 16.Usa delle risorse-minerali e metalli.)

Analogamente sono effettuate le analisi dei contributi per le configurazioni dell'impianto BAWL-OL. In Figura 5.2 è rappresentata l'analisi dei contributi della configurazione A+OL. Si nota che per la categoria *Cambiamento climatico* è presente il contributo negativo da parte del processo di OL, che risulta maggiore rispetto alla somma di tutti i contributi positivi. Infatti, l'impatto totale assume valore negativo cioè la rimozione di CO₂ è maggiore rispetto alle emissioni di gas ad effetto serra durante il ciclo di vita del processo. Per tutte le categorie d'impatto, escluso *cambiamento climatico*, la situazione è pressoché analoga a quella dell'impianto BAWL, in cui vi è una prevalenza netta del contributo dovuto al consumo energetico. Per le categorie *Formazione fotochimica di ozono – salute umana*, *Assunzione di materiale particolato*, *Tossicità per l'uomo – effetti cancerogeni*, *Acidificazione*, *Eutrofizzazione marina*, *Eutrofizzazione terrestre*, *Ecotossicità – acqua dolce*, *Usa delle risorse – minerali e metalli* è presente un contributo superiore al 10% delle unità di processo Produzione della CaCO₃ e Costruzione dell'impianto, quest'ultima maggiormente impattante per la categoria *Usa delle risorse – minerali e metalli*.

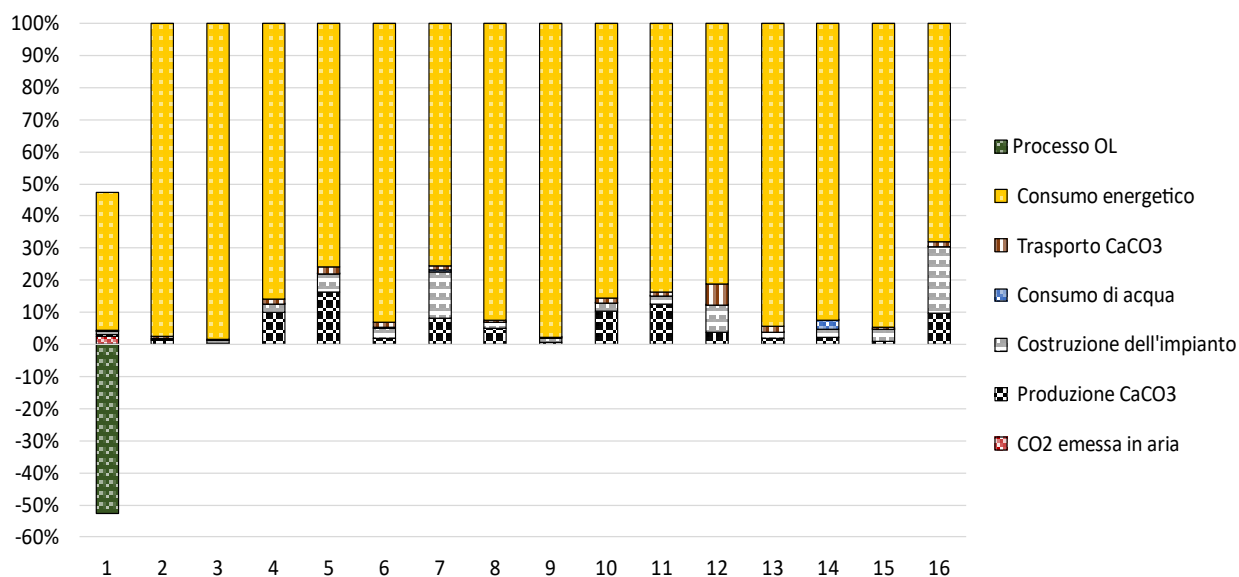


Figura 5.2 – Analisi dei contributi della configurazione A (BAWL–OL).

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Usò del suolo; 14. Usò delle risorse idriche; 15.Usò delle risorse-combustibili fossili; 16.Usò delle risorse-minerali e metalli.)

Nell'analisi delle configurazioni B+OL, C+OL e D+OL nelle Figure Figura 0.12-Figura 0.13-Figura 0.14 (riportate in Appendice) la situazione resta simile a quella del caso A+OL ad eccezione dell'aumento del contributo relativo al consumo energetico, il quale porta, nella categoria *cambiamento climatico*, ad una riduzione della differenza tra impatto negativo e positivo per il caso B+OL, e ad una situazione in cui gli impatti positivi risultano maggiori di quelli negativi, per i casi C+OL e D+OL, ovvero le emissioni sono maggiori dell'assorbimento di CO₂ tramite OL.

5.2 Focus sul cambiamento climatico

Nel presente paragrafo è stato svolto un approfondimento sulla categoria d'impatto *cambiamento climatico*. In Figura 5.3 è stata riportata l'analisi dei contributi per le quattro configurazioni dell'impianto BAWL. Il consumo energetico rappresenta più dell'80% degli impatti in tutte le configurazioni; si evidenzia un aumento del suo impatto nelle configurazioni a causa della maggior richiesta di energia da parte dell'impianto. Tale richiesta è dovuta principalmente alla domanda crescente del calcinatore che deve trattare quantitativi maggiori di CaCO₃, passando dai 93 Gg all'anno del caso A ai 287 Gg all'anno per il caso D. Un altro contributo importante per la categoria *cambiamento climatico* è l'unità di processo 'CO₂ emessa in aria', la quale rappresenta il flusso di CO₂ che non viene disciolto nel miscelatore e viene rilasciato in atmosfera, come descritto nel

paragrafo 4.4. Nei vari casi il suo contributo oscilla intorno al 10%. Infine, i restanti processi contribuiscono all'impatto totale con percentuali sempre minori passando dal caso A al caso D, complessivamente inferiori al 10%.

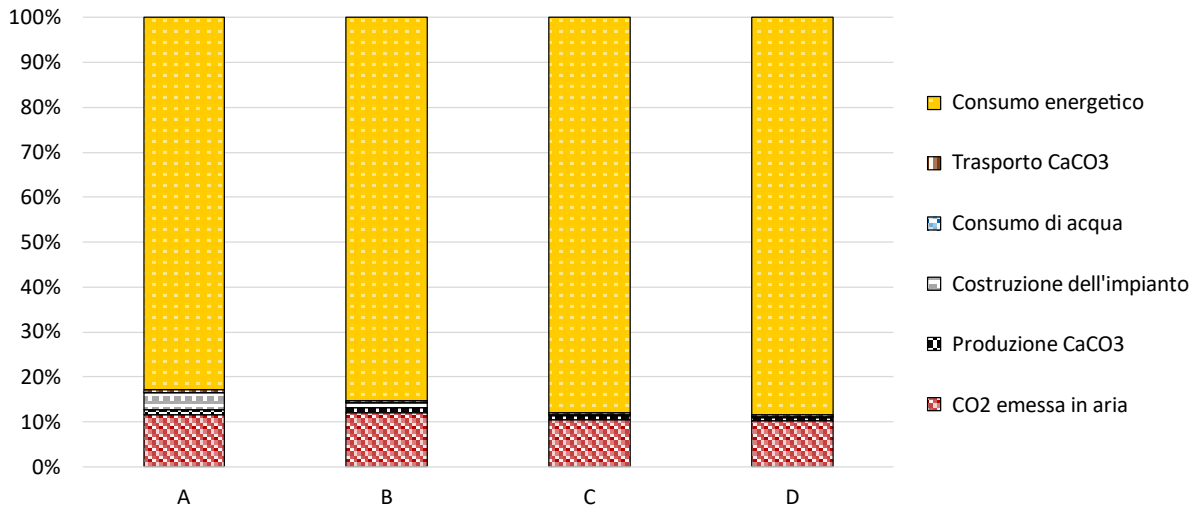


Figura 5.3 – Analisi dei contributi della categoria d'impatto 'Cambiamento climatico' (BAWL).

In Figura 5.4 sono state riportate l'analisi dei contributi per le quattro configurazioni dell'impianto BAWL-OL. In questo caso, la presenza dell'unità 'Processo OL' comporta un contributo in percentuale negativo per la categoria d'impatto esprimendo difatti il beneficio che apporta tale tecnologia nella rimozione di CO₂. I contributi negativi sono maggiori rispetto a quelli positivi per le configurazioni A+OL e B+OL, mentre nelle altre configurazioni risultano maggiori quelli positivi.

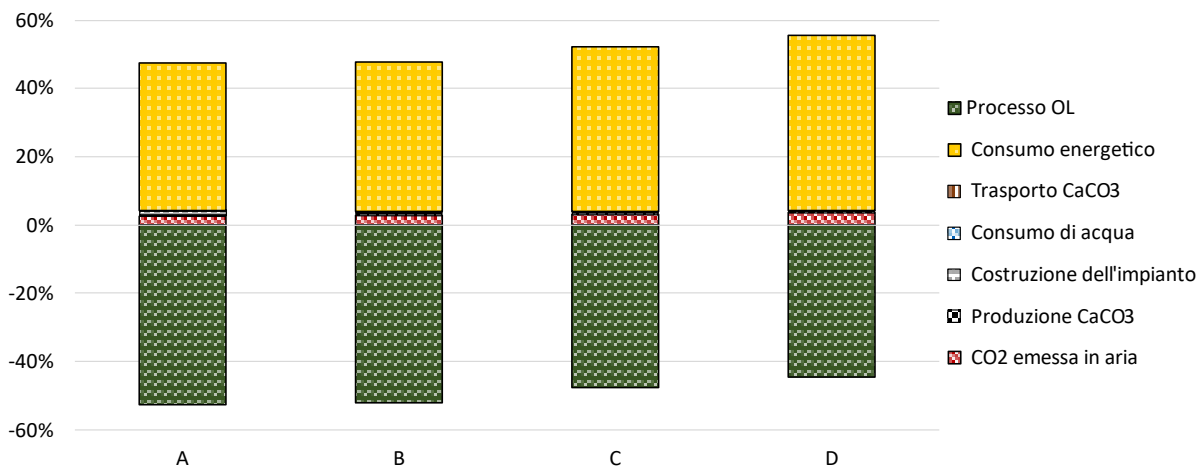


Figura 5.4 – Analisi dei contributi della categoria d'impatto 'Cambiamento climatico' (BAWL-OL).

6. ANALISI DI SENSITIVITÀ

L'analisi di sensitività è lo studio di come cambia l'impatto totale in relazione alla modifica dei parametri ritenuti maggiormente responsabili dell'impatto totale. L'analisi di sensitività è stata svolta variando la fonte di energia elettrica poiché il consumo energetico, come analizzato nel Capitolo 5, contribuisce maggiormente agli impatti totali di ciascuna configurazione studiata.

Vengono analizzate due situazioni opposte allo scenario base studiato, identificato con la sigla IT-base, passando da un mix energetico generato principalmente da fonti fossili a due mix con un maggior contributo di energia prodotta da fonti rinnovabili, come raffigurato in Figura 6.1. Il primo scenario, denominato IT-RE, tiene conto di una previsione del mix energetico dell'Italia nel 2050 prodotto per il 100% da fonti rinnovabili (Jacobson et al., 2017; TheSolutionsProject, 2022). Nel secondo scenario viene invece assunto come mix energetico quello della Norvegia secondo i dati riportati dal database Ecoinvent.

Tabella 6.1 : Fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica.

	Percentuale [%]		
	IT-base	IT-RE	NO
Fonti fossili	54	-	2
Geotermico	2	1	-
Idroelettrico	21	8	92
Eolico	6	52	2
Fotovoltaico	-	40	-
Importato	17	-	4

Per il mix IT-RE è stato realizzato un nuovo processo su SimaPro, modellizzando la produzione di 1 kWh di elettricità attraverso gli input riportati in Tabella 6.2. Mentre per il mix NO è stato utilizzato il modulo presente nel database Ecoinvent, raffigurato in Tabella 6.3. I due processi sono stati inseriti nel programma SimaPro al posto dell'unità descritta nel paragrafo 4.6, sia nel processo BAWL e sia nel processo BAWL-OL, mantenendo però gli stessi valori inerenti al consumo dell'impianto, calcolati in precedenza per ciascuna configurazione ed espressi in Tabella 4.13.

Tabella 6.2 : Dati d'inventario del processo per lo scenario IT-RE.

Processo su Ecoinvent	Valore	Unità
<i>Electricity, high voltage {IT} electricity production, hydro, reservoir, alpine region</i>	0,051	<i>kWh</i>
<i>Electricity, high voltage {IT} electricity production, hydro, run-of-river</i>	0,027	<i>kWh</i>
<i>Electricity, high voltage {ES} electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore</i>	0,140	<i>kWh</i>
<i>Electricity, high voltage {IT} electricity production, wind, >3MW turbine, onshore</i>	0,376	<i>kWh</i>
<i>Electricity, low voltage {IT} electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted</i>	0,211	<i>kWh</i>
<i>Electricity, low voltage {IT} electricity production, fotovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si</i>	0,140	<i>kWh</i>
<i>Electricity, high voltage {ES} electricity production, solar thermal parabolic trough, 50 MW</i>	0,045	<i>kWh</i>
<i>Electricity, high voltage {IT} electricity production, deep geothermal</i>	0,010	<i>kWh</i>

Tabella 6.3 : Dati d'inventario del processo Ecoinvent usato per lo scenario NO.

Voce nell'Inventario	Processo su Ecoinvent	Unità
Consumo energetico	<i>Electricity, high voltage {NO} market for</i>	<i>kWh / UF</i>

A seguito dell'utilizzo del programma sono ottenuti i risultati rappresentati nella Tabella 0.1 e Tabella 0.2 (riportate nell'Appendice) per l'impianto BAWL. Per una maggior comprensione, nella Tabella 6.4, gli impatti totali di ogni scenario (IT-RE e NO) nelle diverse configurazioni (A, B, C e D) sono indicati in percentuale rispetto allo scenario base (IT-base). L'impatto totale di ciascuna categoria di impatto per ogni scenario è calcolato con la seguente equazione:

$$(\%)_{n,m} = \frac{(\text{Impatto totale})_{n,m}}{(\text{Impatto totale})_{n,IT}} * 100 \quad \text{in cui } n = \{A, B, C, D\} \text{ e } m = \{IT - RE, NO\} \quad (11)$$

Si nota come la variazione della fonte dell'energia elettrica abbia portato a una riduzione notevole degli impatti per entrambi gli scenari in quasi tutte le categorie d'impatto, ad eccezione delle categorie *Tossicità per l'uomo – effetti non cancerogeni*, *Tossicità per l'uomo – effetti cancerogeni*, *Ecotossicità – acqua dolce*, *Uso delle risorse – minerali e metalli* dove lo scenario IT-RE riporta impatti superiori

allo scenario IT-base. Soprattutto per la categoria *Uso delle risorse – minerali e metalli* vi è un impatto nettamente superiore in tutte le configurazioni dello scenario IT-RE, pari a circa dieci volte tanto quello delle configurazioni dello scenario IT-base, dovuto alla scelta del mix energetico IT-RE caratterizzato principalmente da fonti energetiche come l'eolico (52%) e il fotovoltaico (40%), le quali richiedono l'uso di materie prima per la costruzione di questi impianti.

Quindi, nonostante entrambi i mix energetici rinnovabili comportino una riduzione degli impatti inerenti alla categoria *cambiamento climatico* e aumento dell'efficienza dell'impianto (paragrafo 6.1), per alcune categorie gli impatti sono differenti e ciò è dovuto alla diversa fonte rinnovabile su cui si basano gli scenari, ovvero la Norvegia prevalentemente idroelettrico mentre l'Italia rinnovabile si basa su eolico e fotovoltaico.

Tabella 6.4 : Risultati dell'analisi di sensibilità sugli impatti totali per tutte le quattro configurazioni di un impianto BAWL espresse in percentuale rispetto al valore della corrispondente configurazione del caso base (IT-base).

Categoria d'impatto	IT-RE				NO			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Cambiamento climatico	26%	24%	21%	21%	21%	19%	16%	16%
Assottigliamento della fascia di ozono	10%	10%	9%	9%	4%	4%	3%	3%
Radiazioni ioniche - salute umana	8%	7%	6%	6%	33%	32%	31%	31%
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	34%	32%	29%	28%	21%	18%	15%	13%
Assunzione di materiale particolato	61%	59%	55%	54%	37%	32%	27%	25%
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	109%	109%	110%	110%	20%	19%	17%	16%
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	169%	175%	181%	187%	61%	58%	55%	52%
Acidificazione	28%	25%	24%	23%	13%	11%	8%	7%
Eutrofizzazione - acqua dolce	33%	32%	31%	31%	11%	9%	9%	9%
Eutrofizzazione marina	33%	31%	28%	26%	22%	19%	16%	14%
Eutrofizzazione terrestre	34%	31%	28%	26%	24%	21%	17%	15%
Ecotossicità - acqua dolce	122%	124%	126%	126%	39%	34%	30%	28%
Uso del suolo	80%	80%	80%	79%	26%	23%	22%	21%
Uso delle risorse idriche	40%	39%	39%	39%	15%	13%	13%	13%
Uso delle risorse – combustibili fossili	17%	11%	10%	9%	15%	9%	8%	7%
Uso delle risorse – minerali e metalli	876%	959%	1034%	1147%	59%	55%	51%	45%

Anche per l'impianto BAWL-OL è stata svolta un'analisi di sensitività, i risultati degli impatti totali ottenuti (riportati nelle Tabelle Tabella 0.3 e Tabella 0.4 nell'Appendice) sono stati elaborati sotto forma di percentuali, come espresso precedentemente per il BAWL, e riportati nella Tabella 6.5. Per

la categoria *cambiamento climatico* risultano delle percentuali positive, per i casi A+OL e B+OL, e delle percentuali con segno negativo per i casi C+OL e D+OL. Le percentuali positive vanno a rappresentare un aumento degli impatti con segno negativo delle configurazioni dello scenario base (IT-base). Mentre, dato che per le configurazioni C+OL e D+OL dello scenario IT-base hanno degli impatti positivi, le percentuali con segno negativo vanno a indicare che gli impatti misurati per gli scenari IT-RE e NO, hanno segno opposto a quelli dello scenario IT-base e un valore pari alla percentuale espressa.

In generale, gli impatti dell'impianto BAWL-OL per gli scenari IT-RE e NO risultano inferiori per tutte le categorie d'impatto. Ad eccezione dello scenario IT-RE in cui si verifica, come nell'impianto BAWL, un aumento degli impatti delle categorie *Tossicità per l'uomo – effetti non cancerogeni*, *Tossicità per l'uomo – effetti cancerogeni*, *Ecotossicità – acqua dolce*, *Uso delle risorse – minerali e metalli*.

Tabella 6.5 : Risultati dell'analisi di sensibilità sugli impatti totali per tutte le quattro configurazioni di un impianto BAWL-OL espresse in percentuale rispetto al valore della corrispondente configurazione del caso base (IT-base).

Categoria d'impatto	IT-RE				NO			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Cambiamento climatico	837%	994%	-885%	-318%	885%	1051%	-948%	-344%
Assottigliamento della fascia di ozono	10%	9%	9%	9%	4%	4%	3%	3%
Radiazioni ioniche - salute umana	7%	7%	6%	6%	32%	32%	31%	31%
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	31%	30%	29%	28%	18%	16%	15%	14%
Assunzione di materiale particolato	58%	57%	55%	54%	31%	29%	27%	26%
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	110%	110%	110%	110%	18%	17%	16%	16%
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	179%	182%	184%	187%	56%	55%	53%	52%
Acidificazione	25%	24%	24%	23%	10%	9%	8%	8%
Eutrofizzazione - acqua dolce	32%	31%	31%	31%	10%	9%	9%	8%
Eutrofizzazione marina	30%	29%	28%	27%	18%	17%	16%	15%
Eutrofizzazione terrestre	30%	29%	28%	27%	20%	19%	17%	16%
Ecotossicità - acqua dolce	124%	125%	126%	126%	33%	31%	29%	28%
Uso del suolo	80%	80%	79%	79%	23%	22%	22%	21%
Uso delle risorse idriche	40%	40%	39%	39%	14%	13%	13%	13%
Uso delle risorse – combustibili fossili	13%	10%	10%	9%	11%	8%	7%	7%
Uso delle risorse – minerali e metalli	1043%	1090%	1116%	1181%	51%	48%	47%	43%

6.1 Focus sul cambiamento climatico

Dai risultati della categoria *cambiamento climatico* sono state calcolate e riportate in Tabella 6.6 le efficienze di stoccaggio dell'impianto BAWL. Gli scenari analizzati risultano più efficienti rispetto allo scenario IT-base. Il caso peggiore, la configurazione D dello scenario IT-RE, ha un'efficienza pari a 77% e corrisponde all'incirca al doppio dell'efficienza calcolata per il caso migliore dello scenario IT-base, configurazione A con un'efficienza del 39%. In entrambi gli scenari, IT-RE e NO, la configurazione B risulta la migliore con efficienze rispettivamente di 85% e 88%.

Tabella 6.6 : Efficienze di stoccaggio della CO₂ dell'impianto BAWL per gli scenari IT-RE e NO.

Scenari	Configurazioni			
	A	B	C	D
IT-RE	84%	85%	81%	77%
NO	87%	88%	86%	83%

Allo stesso modo, per l'impianto BAWL-OL sono state calcolate le efficienze di rimozione della CO₂, riportate in Tabella 6.7. Anche per questo impianto gli scenari IT-RE e NO risultano maggiormente efficienti rispetto allo scenario base. Lo scenario NO si distingue sempre come lo scenario con le migliori efficienze in tutte le configurazioni, con valori tra 85% e 89%. Per lo scenario IT-RE, la configurazione B+OL risulta avere la maggior efficienza tra le quattro configurazioni pari a 84%. Infine, anche per questo impianto la configurazione meno efficiente e maggiormente efficiente risultano rispettivamente la configurazione D+OL e B+OL per entrambi gli scenari.

Tabella 6.7 : Efficienze di rimozione della CO₂ dell'impianto BAWL-OL per gli scenari IT-RE e NO.

Scenari	Configurazioni			
	A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
IT-RE	83%	84%	81%	78%
NO	88%	89%	87%	85%

È stata svolta un'analisi dei contributi degli impatti riguardanti la categoria *cambiamento climatico* per gli scenari IT-RE e NO, affinché possa essere confrontata con l'analisi dei contributi svolta per lo scenario IT-base.

Nella Figura 6.1, attraverso un grafico, viene rappresentata l'analisi dei contributi dei tre scenari per l'impianto BAWL. La variazione del mix energetico riduce gli impatti relativi al consumo energetico, pertanto, quest'ultimo contribuirà in percentuale inferiore al 50% sull'impatto totale generato da

ciascuna configurazione (A, B, C e D) per gli scenari IT-RE e NO. Di conseguenza si può notare, come il rilascio di CO₂ in atmosfera da parte del miscelatore contribuisca maggiormente all'impatto totale, con valori che oscillano tra il 45% e 65% a seconda della configurazione.

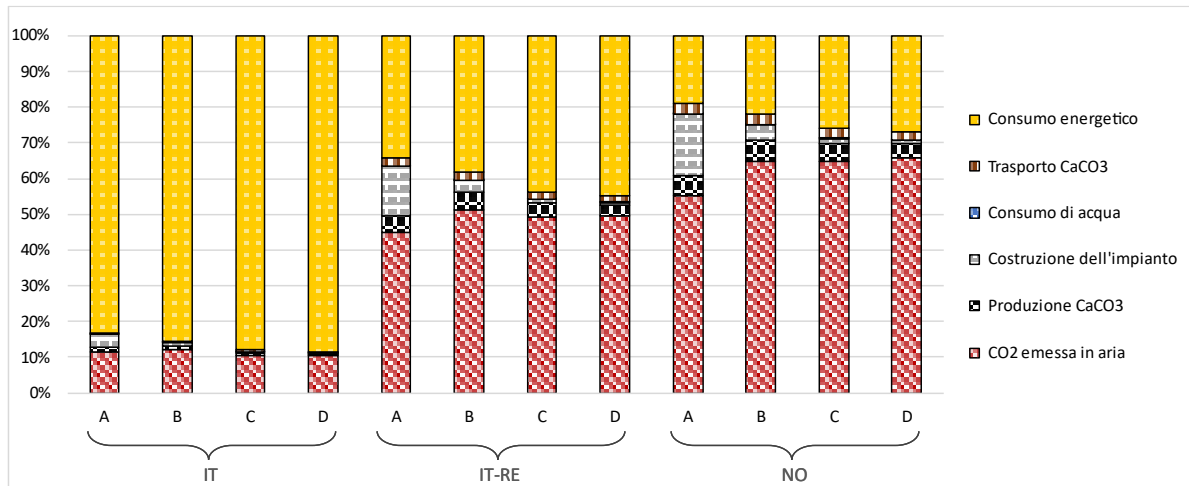


Figura 6.1 – Analisi dei contributi dell'impianto BAWL per la categoria "Cambiamento climatico".

Di seguito, anche per l'impianto BAWL-OL, è stata riportata in Figura 6.2 l'analisi dei contributi per i tre scenari. Nello scenario IT-base si ha una situazione più o meno bilanciata tra gli impatti positivi e negativi a causa di un elevato contributo positivo da parte del consumo energetico. Mentre negli scenari IT-RE e NO, il contributo positivo è notevolmente ridotto per via dell'uso di mix energetici meno impattanti, portando ad una situazione in cui prevale il contributo negativo derivante dal processo OL. Questo significa che, per gli scenari IT-RE e NO, l'impianto rappresenta sempre un beneficio per la categoria dei *cambiamenti climatici*.

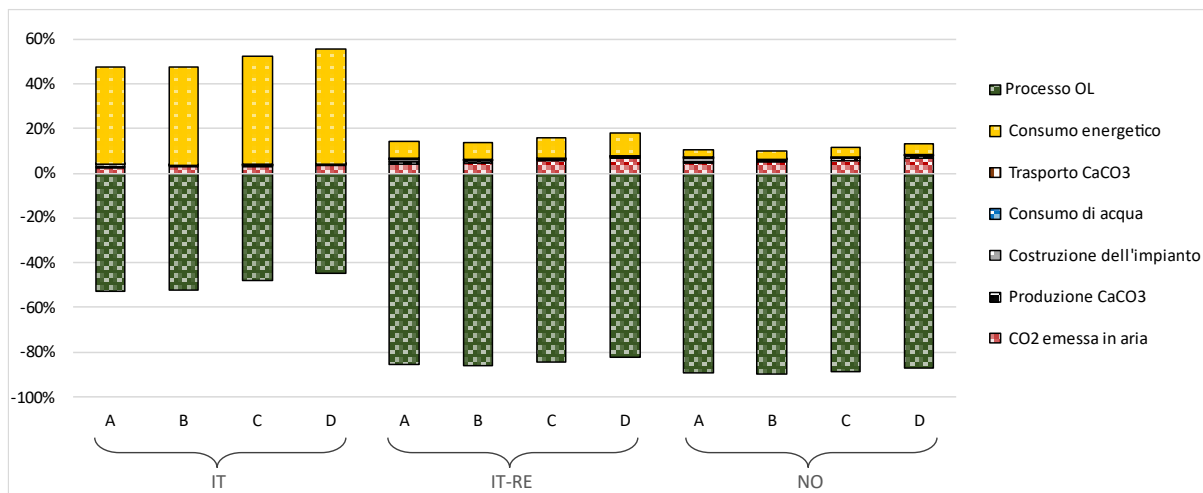


Figura 6.2 – Analisi dei contributi dell'impianto BAWL-OL per la categoria "Cambiamento climatico".

6.2 Analisi del fattore di emissione dell'elettricità

In questo paragrafo viene osservato come varia l'efficienza di stoccaggio e di rimozione rispettivamente per l'impianto BAWL e l'impianto BAWL-OL, al variare del fattore di emissione del consumo di energia elettrica.

Il fattore di emissione (FE) indica la quantità di inquinante rilasciato nell'atmosfera rispetto all'attività che l'ha emesso. Per il consumo di energia elettrica il fattore di emissione è definito come quantità di inquinante emesso per unità di energia elettrica consumata, per esempio $\text{gCO}_2\text{eq/kWh}$.

Nella Figura 6.3 è rappresentata graficamente la variazione dell'efficienza di stoccaggio dell'impianto BAWL per ciascuna delle quattro configurazioni in funzione del fattore di emissione per il consumo di energia elettrica.

Nella configurazione D, in cui viene consumata maggior energia, le emissioni calcolate con l'approccio dell'analisi del ciclo di vita risultano maggiori della quantità di CO_2 stoccata per fattori di emissioni superiori a circa $370 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$; quindi, per tali valori il sistema è inefficiente.

All'aumentare del fattore di emissione vi è un maggior divario tra le quattro configurazioni ad eccezione delle configurazioni A e B che hanno valori relativamente simili dato il simile consumo di energia (Tabella 4.13). Mentre per valori ridotti del FE si notano efficienze simili e alte in tutte le configurazioni. Ad esempio, per fattori di emissione inferiori a $25 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$, simili al FE della produzione energetica da eolico ($22 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$) e fotovoltaico ($17 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$) e ai valori del mix energetico attuale norvegese ($19 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}$) calcolati utilizzando i moduli di Ecoinvent (Tabella 6.2 e Tabella 6.3), si hanno efficienze superiori a 80%.

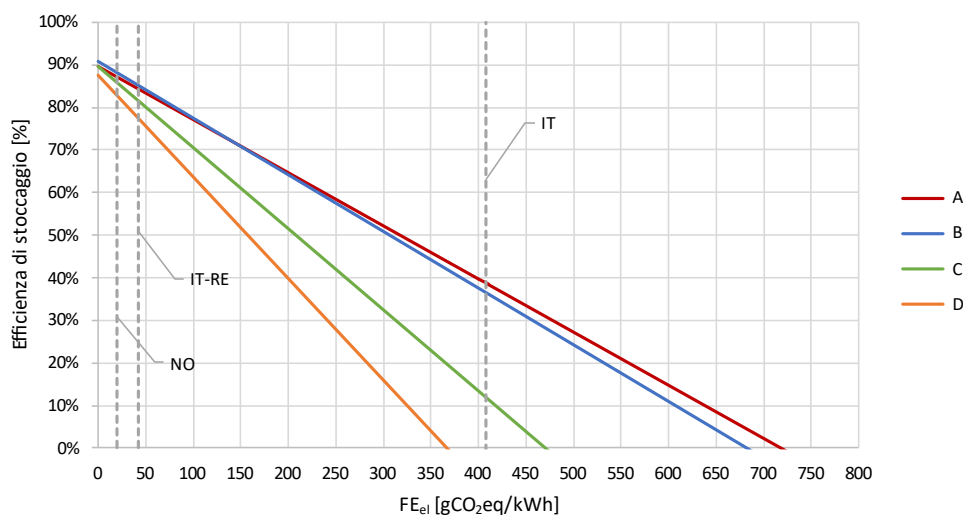


Figura 6.3 – Efficienza di stoccaggio del BAWL in funzione del fattore di emissione dell’elettricità (FE_{el}).

Nel grafico seguente, Figura 6.4, è riportato come varia l’efficienza di rimozione per le quattro configurazioni dell’impianto BAWL–OL al variare del fattore di emissione. Le linee riprodotte raffigurano le quattro configurazioni e hanno un’inclinazione maggiore rispetto all’impianto BAWL, cioè fattori di emissione più alti incidono maggiormente sull’efficienza, perché nel BAWL–OL i consumi energetici sono maggiori (Tabella 4.14). Nel caso peggiore, la configurazione D, si nota che l’azzeramento dell’efficienza si ha per valori pari a 320 gCO₂eq/kWh oltre ai quali le emissioni di CO₂ stimate con il metodo dell’analisi del ciclo di vita sono superiori a quelle rimosse tramite il processo di alcalinizzazione dei mari (OL) rendendo l’impianto inefficiente. Nell’impianto BAWL–OL, per merito del contributo rimosso dall’OL, valori del FE intorno a 25 gCO₂eq/kWh permettono il raggiungimento di efficienze di rimozione superiori a 85% per tutte le configurazioni.

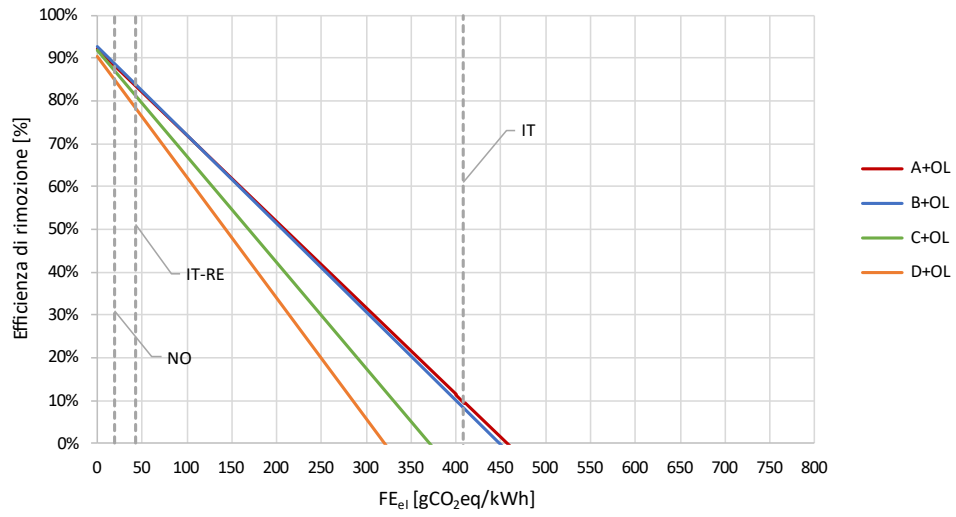


Figura 6.4 – Efficienza di rimozione del BAWL-OL in funzione del fattore di emissione dell'elettricità (FE_{el}).

7. CONCLUSIONI E FUTURE RICERCHE

In questo lavoro, i potenziali impatti ambientali sono stati valutati mediante la metodologia standardizzata dell'Analisi del ciclo di vita applicata al processo di cattura e stoccaggio di CO₂ Buffered Accelerated Weathering of Limestone (BAWL) che mima e accelera il processo naturale di dilavamento del calcare e stocca CO₂ sottoforma di ioni bicarbonato nel mare. Dall'analisi degli impatti sul cambiamento climatico, si evince che l'attuazione di un impianto BAWL con il mix di produzione di energia elettrica in Italia (Itten et al. 2014), caratterizzato ancora da una prevalenza di combustibili fossili, non è consigliabile, infatti, le efficienze di stoccaggio ottenute sono basse. Le configurazioni A, B e C mostrano delle percentuali mediocri con valori pari a 37%, 35% e 10%. Mentre la configurazione D rivela un'inefficienza da parte dell'impianto poiché la sua realizzazione e funzionamento causerebbe emissioni maggiori di gas climalteranti rispetto alla quantità di CO₂ stoccata. Per l'impianto BAWL-OL si ottiene la medesima situazione, ovvero i potenziali impatti generati nel ciclo di vita comportano una ridotta efficienza di rimozione della CO₂ dovuto principalmente al consumo di energia elettrica dell'impianto soddisfatto con un mix energetico principalmente da fonti fossili. In questo caso le configurazioni A+OL e B+OL presentano delle efficienze basse, 8% e 6%, mentre le configurazioni C+OL e D+OL risultano inefficienti poiché l'applicazione e l'attività dell'impianto tende a generare emissioni superiori a quelle rimosse attraverso il processo di OL. Tra le quattro configurazioni, la configurazione A risulta la migliore per entrambi gli impianti, BAWL e BAWL-OL risulta nella maggioranza delle categorie d'impatto quella più performante, fatta eccezione per *Tossicità per l'uomo – effetti cancerogeni*, *Ecotossicità – acqua dolce* (solo nel caso BAWL) e *Uso delle risorse – minerali e metalli* dove la configurazione B mostra migliori risultati. Al contrario, la configurazione D risulta essere quella con gli impatti maggiori in tutte e 16 le categorie.

Si deduce che la realizzazione di un impianto di stoccaggio, BAWL, o di rimozione della CO₂, BAWL-OL, necessita la presenza di una produzione di energia prevalentemente da fonti rinnovabili, per ridurre gli impatti relativi al consumo di energia che variano tra i 124.000 e i 400.000 MWh/anno. L'importanza di un buon mix energetico è maggiormente rilevante per l'impianto BAWL-OL, il quale richiede un maggior consumo di energia per trattare superiori quantità di carbonato di calcio rispetto al BAWL.

Per raggiungere efficienze superiori al 60%, gli impianti BAWL e BAWL-OL richiedono una produzione energetica caratterizzata da un fattore di emissione (FE) inferiore a 110 gCO₂eq/kWh, come quello norvegese attuale o quello assunto per l'Italia nel 2050 (Jacobson et al., 2017;

TheSolutionsProject, 2022) rispettivamente 19 e 43 gCO₂eq/kWh, dunque, permettono un miglioramento delle efficienze di stoccaggio e di rimozione per tutte le configurazioni (efficienze tra 77% e 89%). Il mix energetico norvegese, avendo un FE inferiore, comporta una migliore efficienza rispetto al mix italiano totalmente rinnovabile. Per entrambi gli impianti BAWL e BAWL–OL nello scenario norvegese (NO), la configurazione B risulta la più promettente rispetto alle altre configurazioni poiché genera degli impatti ambientali inferiori nella maggior parte delle categorie di impatto, fatta eccezione per *Radiazioni ioniche – salute umana* dove la configurazione A mostra migliori risultati. Nello scenario italiano 100% rinnovabile le configurazioni A e B risultano le migliori con valori simili in tutte le categorie, fatta eccezione per *Uso delle risorse – combustibili fossili* in cui la configurazione A mostra risultati peggiori. La configurazione D invece presenta sempre degli impatti superiori in tutte le categorie ad eccezione della categoria *Uso delle risorse – combustibili fossili*. In questa categoria si nota l'elevato impatto ambientale dovuto all'uso dei combustibili fossili per la produzione della conduttura in materiale polietilene ad alta densità, in particolare nella configurazione A caratterizzata dalla condotta più lunga.

L'utilizzo di un mix energetico rinnovabile porta ad un miglioramento dell'efficienza degli impianti ma, attraverso l'analisi del ciclo di vita, si è notato che, a seconda delle tecnologie rinnovabili in uso per la produzione elettrica, vi può essere un aumento degli impatti ambientali per altre categorie di impatto. Lo scenario italiano del 2050 (IT-RE), per esempio, presenta un mix energetico generato prevalentemente da eolico e fotovoltaico che comportano un consumo maggiore di risorse quali minerali e metalli rispetto allo scenario base e allo scenario norvegese. Pertanto, nonostante le efficienze di stoccaggio maggiori rispetto allo scenario IT-base, lo scenario IT-RE presenta degli impatti maggiori per altre categorie, come per la categoria *Uso delle risorse – minerali e metalli* nel quale i suoi valori sono dieci volte superiori.

Un aspetto rilevante rilevato dall'analisi dei contributi per gli scenari IT-RE e NO è l'aumento dei contributi da parte degli altri processi, poiché la riduzione del FE dell'energia porta alla riduzione del contributo inerente al consumo energetico. L'emissione della CO₂ dal miscelatore dovuto all'efficienza di catture è risultata il contributo maggiore con valori tra il 45% e il 65% a seconda delle configurazioni. Questo è dovuto all'assunzione di un miscelatore con un'efficienza di dissoluzione della CO₂ in acqua pari al 95%. Per convalidare questa assunzione, sarebbe consigliabile un'analisi maggiore di questa efficienza attraverso studi sperimentali.

La necessità di una produzione energetica da fonti rinnovabili, affinché l'applicazione della tecnologia BAWL sia efficiente, può essere soddisfatta anche con l'implementazione all'interno

dell'impianto di tecnologie per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile (per esempio impianti fotovoltaici).

Nel presente lavoro è stato assunto un impianto in prossimità dell'industria, che genera il flusso gassoso da stoccare, e della miniera, dal quale viene estratto il calcare. Un'ulteriore analisi di sensitività potrebbe essere condotta valutando diversi mezzi di trasporto e differenti distanze.

Infine, il lavoro presenta uno studio LCA per un impianto di cattura e stoccaggio della CO₂ e di un impianto di rimozione della CO₂, sarebbe utile un confronto di questo studio con altri inerenti a tecnologie con gli stessi scopi.

8. BIBLIOGRAFIA

- Allacker, K., Mathieux, F., Pennington, D., & Pant, R. (2017). The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(9), 1441–1458. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1244-0>
- Basu, P., Achayra, B., & Dutta, A. (2011). *Study of Calcination-Carbonation of Calcium Carbonate in Different Fluidizing Mediums for Chemical Looping Gasification in Circulating Fluidized Beds*. 9. <https://dc.engconfintl.org/cfb10/36>
- Bond F.C. 1961 - Crushing and Grinding Calculations
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P. S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L. A., Hallett, J. P., Herzog, H. J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G. C., Matuszewski, M., Metcalfe, I. S., Petit, C., ... Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062–1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
- Caldeira, K., & Rau, G. H. (2000). Accelerating carbonate dissolution to sequester carbon dioxide in the ocean: Geochemical implications. *Geophysical Research Letters*, 27(2), 225–228. <https://doi.org/10.1029/1999GL002364>
- Carbonreuse (2021). Carbonreuse CO2 process. Our process. Link: <https://www.carbonreuse.fi/our-solution-1>. Recuperato a maggio, 2022.
- Caserini, S., Barreto, B., Lanfredi, C., Cappello, G., Ross Morrey, D., & Grosso, M. (2019). Affordable CO2 negative emission through hydrogen from biomass, ocean liming, and CO2 storage. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(7), 1231–1248. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9835-7>

- Caserini, S., Pagano, D., Campo, F., Abbà, A., De Marco, S., Righi, D., Renforth, P., & Grosso, M. (2021a). Potential of Maritime Transport for Ocean Liming and Atmospheric CO₂ Removal. *Frontiers in Climate*, 3, 575900. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.575900>
- Caserini, S., Cappello, G., Righi, D., Raos, G., Campo, F., De Marco, S., Renforth, P., Varliero, S., & Grosso, M. (2021b). Buffered accelerated weathering of limestone for storing CO₂: Chemical background. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 112, 103517. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103517>
- Caserini, S., Dolci, G., Azzellino, A., Lanfredi, C., Rigamonti, L., Barreto, B., & Grosso, M. (2017). Evaluation of a new technology for carbon dioxide submarine storage in glass capsules. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 60, 140–155. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.007>
- Caserini, S., Storni, N., & Grosso, M. (2022). The Availability of Limestone and Other Raw Materials for Ocean Alkalinity Enhancement. *Global Biogeochemical Cycles*, 36(5). <https://doi.org/10.1029/2021GB007246>
- de Jonge, M. M. J., Daemen, J., Loriaux, J. M., Steinmann, Z. J. N., & Huijbregts, M. A. J. (2019). Life cycle carbon efficiency of Direct Air Capture systems with strong hydroxide sorbents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 80, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.11.011>
- De Marco, S., Varliero, S., Caserini, S., Cappello, G., Raos, G., Campo, F., Grosso, M. (2022) Techno-economic evaluation of buffered accelerated weathering of limestone as a CO₂ capture and storage option. Submitted to *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*
- Deutz, S., & Bardow, A. (2021). Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. *Nature Energy*, 6(2), 203–213. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>

- Dreicer M, Tort V, Manen P. ExternE, Externalities of Energy, Vol. 5. Nuclear, Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN), edited by the European Commission DGXII, Science, Research and Development JOULE, Luxembourg, 1995.
- EC, European Commission (2013) 'Raccomandazione della Commissione, del 9 aprile 2013, relativa all'uso di metodologie comuni per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni.', Raccomandazione 2013/179/UE, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 124 del 4 maggio 2013.
- EC, European Commission (2020) REGOLAMENTO (UE) 2021/1119 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, 30 giugno 2021, istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 («Normativa europea sul clima»)
- Link: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- Fantke, P., Jolliet, O., Evans, J. S., Apte, J. S., Cohen, A. J., Hänninen, O. O., Hurley, F., Jantunen, M. J., Jerrett, M., Levy, J. I., Loh, M. M., Marshall, J. D., Miller, B. G., Preiss, P., Spadaro, J. V., Tainio, M., Tuomisto, J. T., Weschler, C. J., & McKone, T. E. (2016). Health effects of fine particulate matter in life cycle impact assessment: Findings from the Basel Guidance Workshop. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 276–288. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0822-2>
- Fu, C., Cefis, N., Cremonesi, M., Perego, U., Caserini, S., & Grosso, M. (2021). Design of glass containers for submarine carbon storage. *Packaging Technology and Science*, 35(3), 259–271. <https://doi.org/10.1002/pts.2624>
- Gentile & Tarantola. (2022). Analysis of slaked lime spreading methodologies for ocean alkalinity enhancement [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano].
- Link: <http://hdl.handle.net/10589/187644>
- Gibbins, J., & Chalmers, H. (2008). Carbon capture and storage\$. *Energy Policy*, 6.

Global CCS Institute (2021). Global status of CCS 2020

Link: www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/

Gough, C. & Upham, P. (2011). Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS or Bio-CCS). *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 1(4), 324–334. <https://doi.org/10.1002/ghg.34>

IPCC (2005) Special Report: Carbon Dioxide Capture and Storage. Link: <https://hdl.handle.net/2066/230961>

IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University. Press. doi: 10.1017/ CBO9781107415324.005.

IPCC (2018) Special Report: Global Warming of 1.5 °C. Link: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021. Cambridge University. Link: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

ISO (2006a) ‘ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework’.

ISO (2006b) ‘ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines’.

Jacobson MZ, Delucchi MA, Zack AF, et al. (2017) 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule*, 1, 1, pp. 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

Kellenberger, D., Althaus, H.-J., Künniger, T., Lehmann, M., Jungbluth, N., Thalmann, P. (2007). Life Cycle Inventories of Building Products. ecoinvent report No 7. Dübendorf: Centre for

Life Cycle Inventories. Accessible in the Reports section of version 2. of the ecoinvent database.

Keller, D. P., Feng, E. Y., & Oschlies, A. (2014). Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario. *Nature Communications*, 5(1), 3304. <https://doi.org/10.1038/ncomms4304>

Kheshgi, H. S. (1995). Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity. *Energy*, 20(9), 915–922.

Kirchner, J. S., Berry, A., Ohnemüller, F., Schnetger, B., Erich, E., Brumsack, H.-J., & Lettmann, K. A. (2020). Reducing CO₂ Emissions of a Coal-Fired Power Plant via Accelerated Weathering of Limestone: Carbon Capture Efficiency and Environmental Safety. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 4528–4535. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07009>

Koornneef, J., van Keulen, T., Faaij, A., Turkenburg, W (2008) Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.06.008>

Lacy, R., Molina, M., Vaca, M., Serralde, C., Hernandez, G., Rios, G., Guzman, E., Hernandez, R., & Perez, R. (2015). Life-cycle GHG assessment of carbon capture, use and geological storage (CCUS) for linked primary energy and electricity production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.07.017>

Lane, J., Greig, C., & Garnett, A. (2021). Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions. *Nature Climate Change*, 11(11), 925–936. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01175-7>

Lefebvre, D., Goglio, P., Williams, A., Manning, D. A. C., de Azevedo, A. C., Bergmann, M., Meersmans, J., & Smith, P. (2019). Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 233, 468–481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>

- Lenton, A., Matear, R. J., Keller, D. P., Scott, V., & Vaughan, N. E. (2018). Assessing carbon dioxide removal through global and regional ocean alkalization under high and low emission pathways. *Earth System Dynamics*, 9(2), 339–357. <https://doi.org/10.5194/esd-9-339-2018>
- Lerche Raadal, H., & Saur Modahl, I. (2022). LCA of CCS and CCU compared with no capture: How should multi-functional systems be analysed? *E3S Web of Conferences*, 349, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234903001>
- Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., Haines, M., Hake, J.-Fr., & Gale, J. (2011). Environmental evaluation of CCS using Life Cycle Assessment—A synthesis report. *Energy Procedia*, 4, 2448–2456. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.139>
- ONU (2022), Organizzazione delle Nazioni Unite. <https://unric.org/it/> ultimo accesso settembre 2022
- Pour, N., Webley, P. A., & Cook, P. J. (2018). Opportunities for application of BECCS in the Australian power sector. *Applied Energy*, 224, 615–635. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.117>
- Rau, G. H., & Caldeira, K. (1999). Enhanced carbonate dissolution: A means of sequestering waste CO₂ as ocean bicarbonate. *Energy Conversion*, 40(17), 1783–1898. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00071-0)
- Renforth, P., & Henderson, G. (2017). Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 636–674. <https://doi.org/10.1002/2016RG000533>
- Renforth, P., Jenkins, B. G., & Kruger, T. (2013). Engineering challenges of ocean liming. *Energy*, 60, 442–452. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.006>
- René Itten, Rolf Frischknecht, Matthias Stucki (2014). Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid. Paul Scherrer Institut (PSI). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10220.87682>
- Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., & Schellnhuber, H. J. (2017). A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355(6331), 1269–1271. <https://doi.org/10.1126/science.aah3443>

- Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., & Hettelingh, J.-P. (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(6), 403–416. <https://doi.org/10.1065/lca2005.06.215>
- Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E., & Hartmann, J. (2018). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- Tan, Y. (2016). Property impacts on Carbon Capture and Storage (CCS) processes: A review. *Energy Conversion and Management*, 19.
- Terlouw, T., Bauer, C., Rosa, L., & Mazzotti, M. (2021). Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: A critical review. *Energy & Environmental Science*, 14(4), 1701–1721. <https://doi.org/10.1039/D0EE03757E>
- TheSolutionsProject (2022) <https://thesolutionsproject.org/> accesso aprile 2022
- UNFCCC (2015) ‘Adoption of the Paris Agreement’
- Wang, N., Akimoto, K., Nemet, G. F., (2021). What went wrong? Learning from three decades of carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) pilot and demonstration projects. *Energy Policy* 158, 112546
- WCED (1987) ‘Our common future’.
- WMO (1999), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998
- Zakuciová, K., Rocha, J. L., & Kočí, V. (2016, febbraio 22). Life Cycle Assessment Overview of Carbon Capture and Storage Technologies. *5th Annual International Conference on Sustainable Energy and Environmental Sciences (SEES 2016)*. Annual International Conference on Sustainable Energy and Environmental Sciences. https://doi.org/10.5176/2251-189X_SEES16.23

- Zang, G., Zhang, J., Jia, J., Lora, E. S., & Ratner, A. (2020). Life cycle assessment of power-generation systems based on biomass integrated gasification combined cycles. *Renewable Energy*, *149*, 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.013>
- Zeebe, R. E., Wolf-Gladrow, D. A., & Jansen, H. (1999). On the time required to establish chemical and isotopic equilibrium in the carbon dioxide system in seawater. *Marine Chemistry*, *65*(3–4), 135–153. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(98\)00092-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(98)00092-9)

APPENDICE

Figure

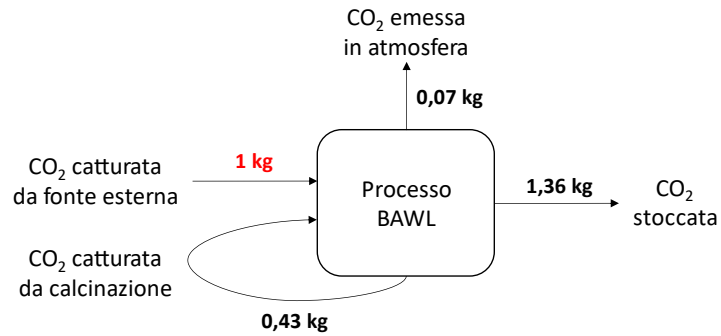


Figura 0.1 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione A del BAWL (in rosso l'unità funzionale).

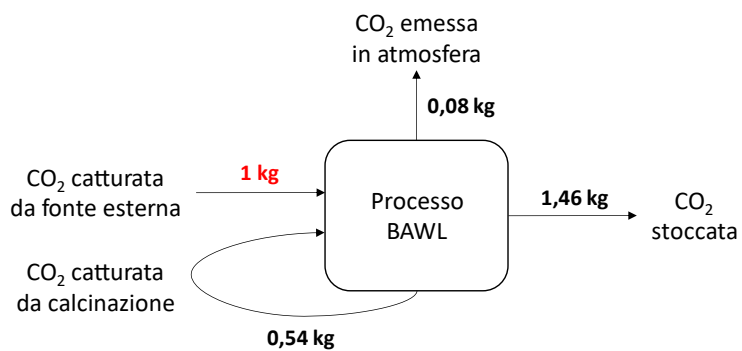


Figura 0.2 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione B del BAWL (in rosso l'unità funzionale).

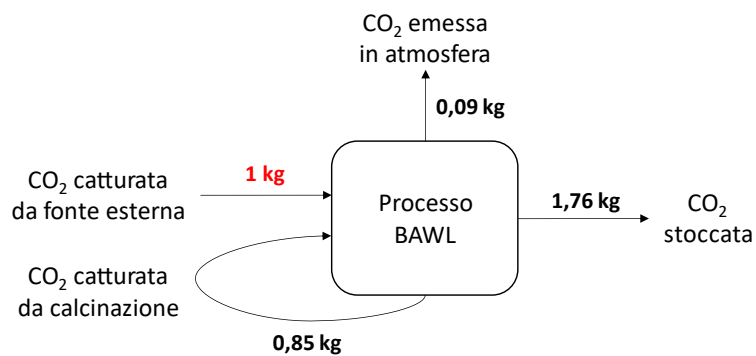


Figura 0.3 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione C del BAWL (in rosso l'unità funzionale).

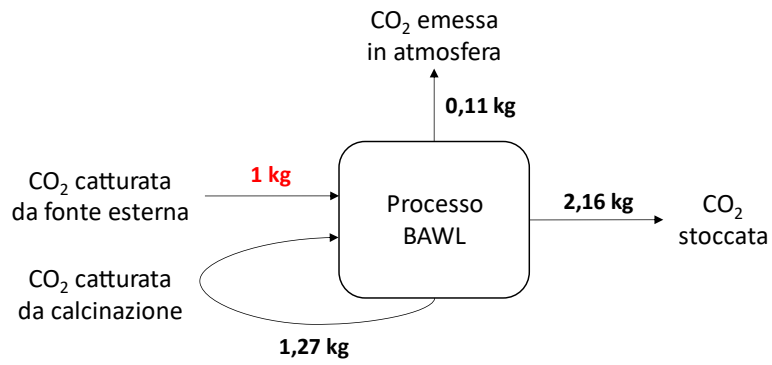


Figura 0.4 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione D del BAWL (in rosso l'unità funzionale).

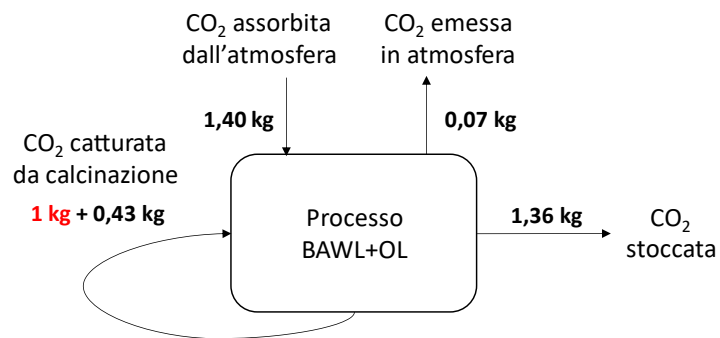


Figura 0.5 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione A+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).

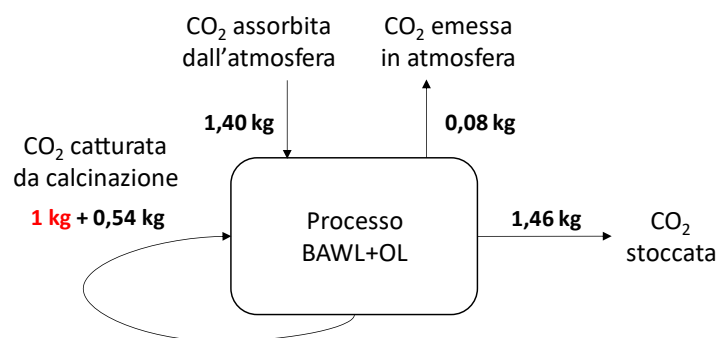


Figura 0.6 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione B+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).

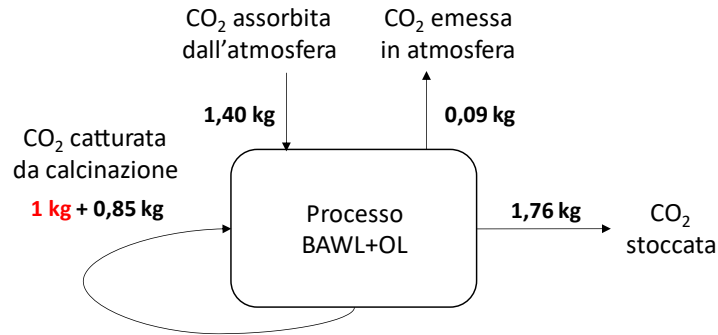


Figura 0.7 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione C+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).

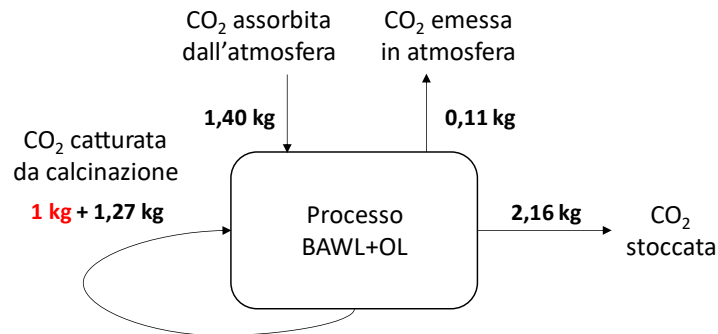


Figura 0.8 – Bilancio di massa della CO₂ nella configurazione D+OL del BAWL-OL (in rosso l'unità funzionale).

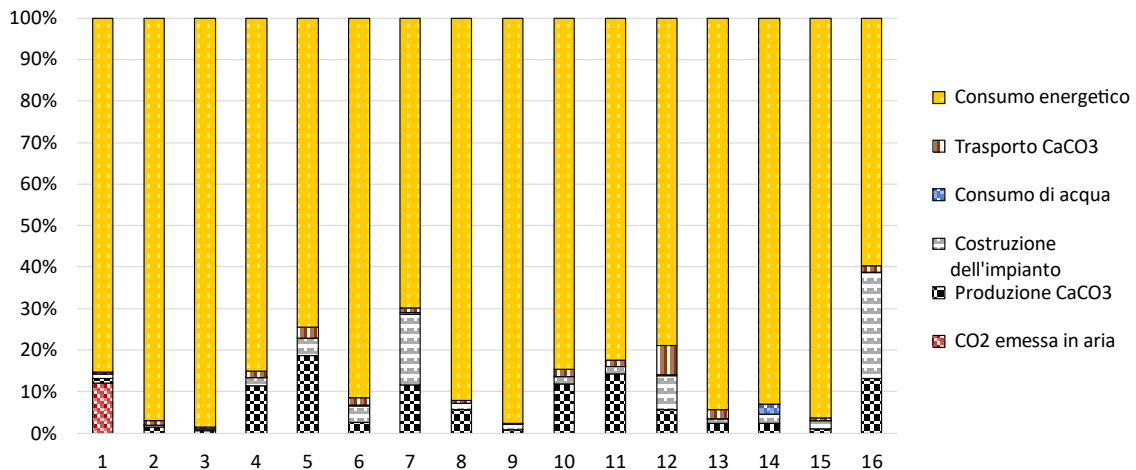


Figura 0.9 – Analisi dei contributi della configurazione B (BAWL).

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13. Uso del suolo; 14.Scarsità d'acqua; 15. Uso delle risorse-combustibili fossili; 16. Uso delle risorse-minerali e metalli.)

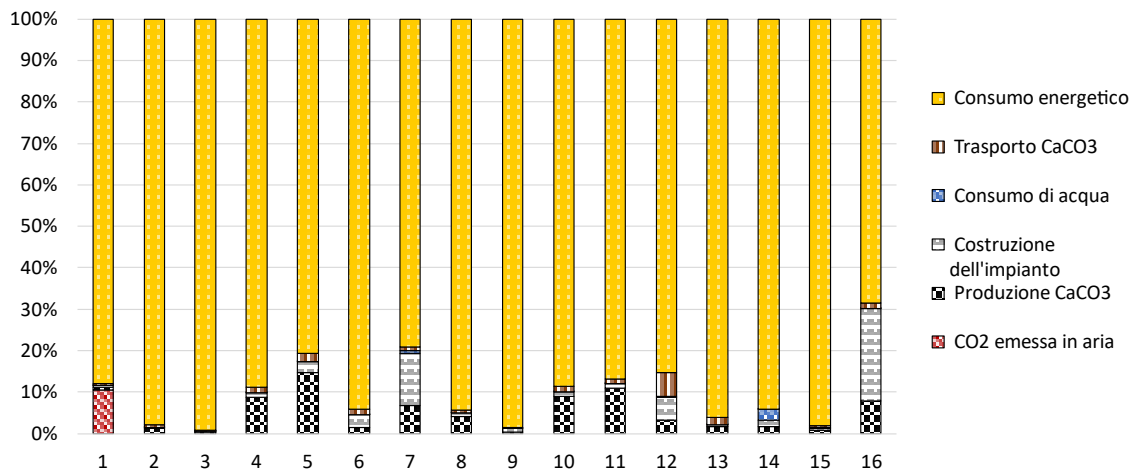


Figura 0.10 – Analisi dei contributi della configurazione C (BAWL).

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Usa del suolo; 14.Scarsità d'acqua; 15.Usa delle risorse-combustibili fossili; 16.Usa delle risorse-minerali e metalli.)

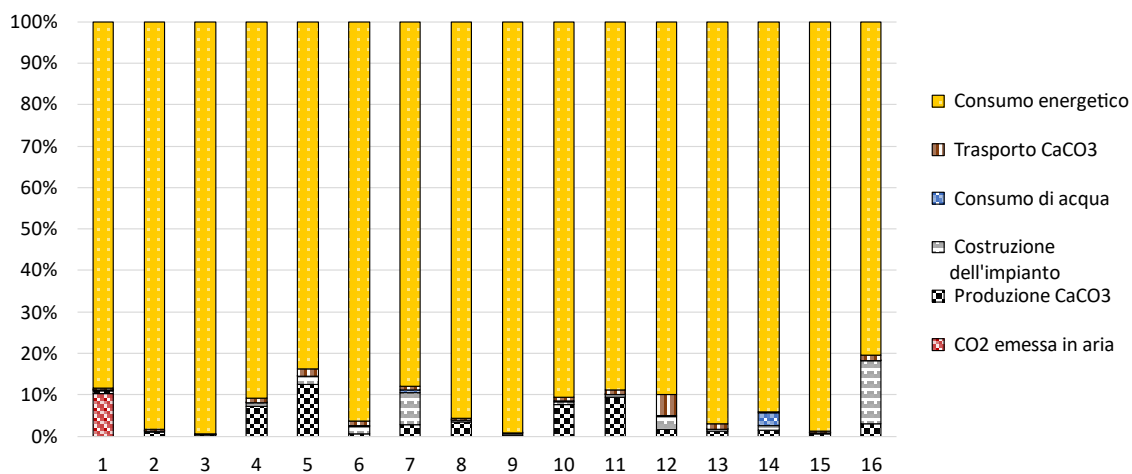


Figura 0.11 – Analisi dei contributi della configurazione D (BAWL).

(Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Usa del suolo; 14.Scarsità d'acqua; 15.Usa delle risorse-combustibili fossili; 16.Usa delle risorse-minerali e metalli.)

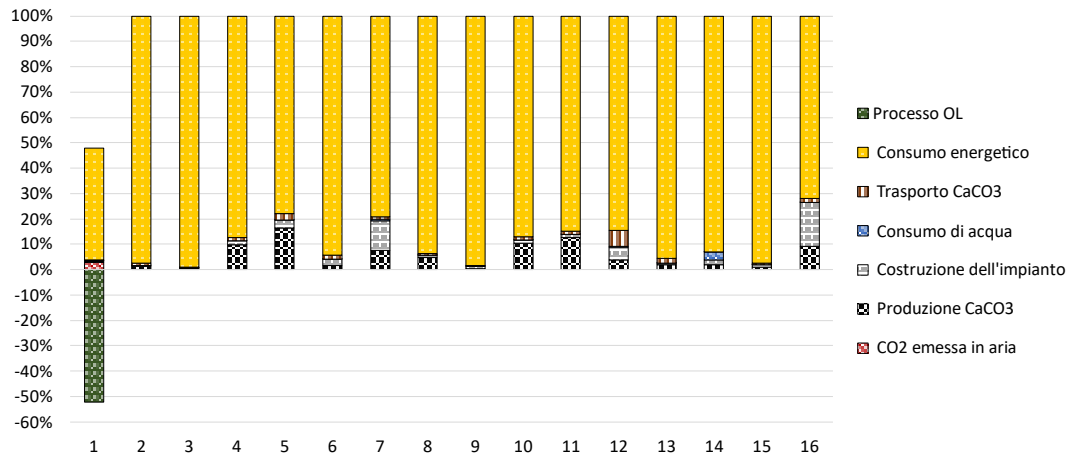


Figura 0.12 – Analisi dei contributi della configurazione B (BAWL-OL).
 (Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Uso del suolo; 14. Uso delle risorse idriche; 15.Uso delle risorse-combustibili fossili; 16.Uso delle risorse-minerali e metalli.)

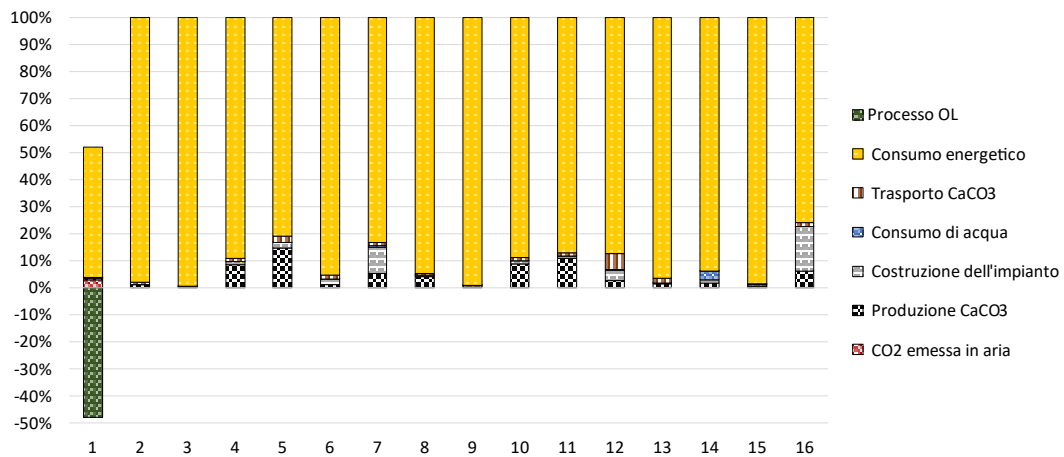


Figura 0.13 – Analisi dei contributi della configurazione C (BAWL-OL).
 (Categorie di impatto: 1.Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3.Radiazioni ioniche-salute umana; 4.Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5.Assunzione di materiale particolato; 6.Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7.Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8.Acidificazione; 9.Eutrofizzazione-acqua dolce; 10.Eutrofizzazione marina; 11.Eutrofizzazione terrestre; 12.Ecotossicità-acqua dolce; 13.Uso del suolo; 14. Uso delle risorse idriche; 15.Uso delle risorse-combustibili fossili; 16.Uso delle risorse-minerali e metalli.)

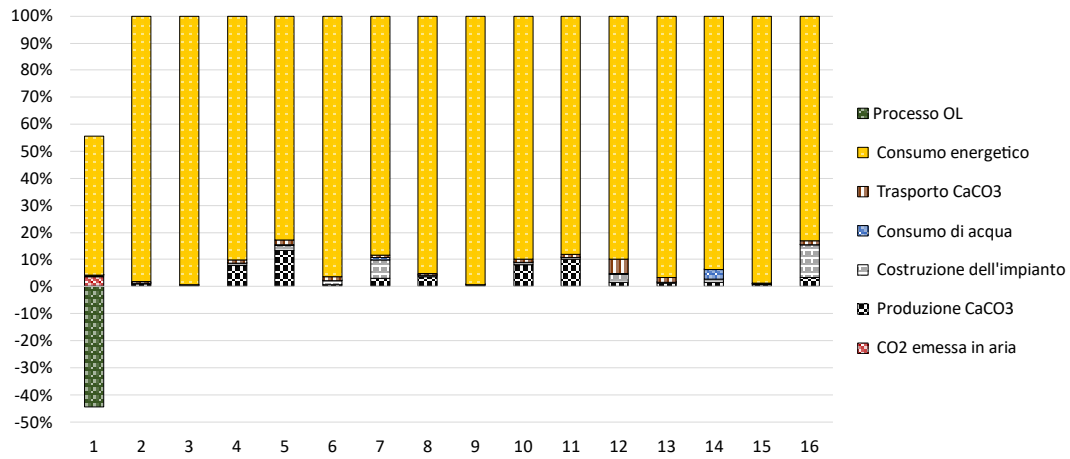


Figura 0.14 – Analisi dei contributi della configurazione D (BAWL-OL).
 (Categorie di impatto: 1. Cambiamento climatico; 2. Assottigliamento della fascia di ozono; 3. Radiazioni ioniche-salute umana; 4. Formazione fotochimica di ozono-salute umana; 5. Assunzione di materiale particolato; 6. Tossicità per l'uomo-effetti non cancerogeni; 7. Tossicità per l'uomo-effetti cancerogeni; 8. Acidificazione; 9. Eutrofizzazione-acqua dolce; 10. Eutrofizzazione marina; 11. Eutrofizzazione terrestre; 12. Ecotossicità-acqua dolce; 13. Uso del suolo; 14. Uso delle risorse idriche; 15. Uso delle risorse combustibili fossili; 16. Uso delle risorse minerali e metalli.)

Tabelle

Tabella 0.1 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL (IT-RE).

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL			
		A	B	C	D
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	0,16	0,15	0,19	0,23
Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	7,3E-09	7,5E-09	1,0E-08	1,2E-08
Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	5,8E-03	5,2E-03	6,9E-03	8,5E-03
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	4,6E-04	4,4E-04	5,5E-04	6,4E-04
Assunzione di materiale particolato	disease inc.	7,1E-09	6,8E-09	8,6E-09	1,0E-08
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	3,3E-08	3,4E-08	4,8E-08	5,9E-08
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	6,9E-09	7,0E-09	9,6E-09	1,2E-08
Acidificazione	mol H ⁺ eq	7,1E-04	6,7E-04	8,8E-04	1,1E-03
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	3,9E-05	3,9E-05	5,5E-05	6,8E-05
Eutrofizzazione marina	kg N eq	1,4E-04	1,3E-04	1,7E-04	1,9E-04
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	1,6E-03	1,6E-03	1,9E-03	2,2E-03
Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	0,17	0,17	0,23	0,28
Uso del suolo	Pt	2,29	2,34	3,28	4,07
Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	0,15	0,15	0,21	0,27
Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	1,48	0,98	1,18	1,41
Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	6,4E-06	6,7E-06	9,5E-06	1,2E-05

Tabella 0.2 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL (NO).

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL			
		A	B	C	D
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	0,13	0,12	0,14	0,17
Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	3,1E-09	3,1E-09	3,6E-09	4,0E-09
Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	2,3E-02	2,4E-02	3,4E-02	4,2E-02
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	2,8E-04	2,5E-04	2,8E-04	3,1E-04
Assunzione di materiale particolato	disease inc.	4,3E-09	3,7E-09	4,2E-09	4,6E-09
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	6,1E-09	5,8E-09	7,5E-09	8,5E-09
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	2,5E-09	2,3E-09	2,9E-09	3,2E-09
Acidificazione	mol H ⁺ eq	3,4E-04	2,8E-04	3,1E-04	3,4E-04
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	1,3E-05	1,2E-05	1,6E-05	1,9E-05
Eutrofizzazione marina	kg N eq	9,4E-05	8,5E-05	9,5E-05	1,0E-04
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	1,2E-03	1,1E-03	1,2E-03	1,3E-03
Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	0,05	0,05	0,05	0,06
Uso del suolo	Pt	0,72	0,68	0,91	1,10
Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	0,05	0,05	0,07	0,09
Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	1,30	0,79	0,91	1,07
Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	4,3E-07	3,8E-07	4,7E-07	4,6E-07

Tabella 0.3 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL-OL (IT-RE).

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL-OL			
		A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	-1,17	-1,17	-1,14	-1,10
Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	1,5E-08	1,6E-08	1,8E-08	2,0E-08
Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	1,1E-02	1,1E-02	1,3E-02	1,4E-02
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	9,0E-04	8,8E-04	9,9E-04	1,1E-03
Assunzione di materiale particolato	disease inc.	1,4E-08	1,4E-08	1,6E-08	1,7E-08
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	7,2E-08	7,3E-08	8,7E-08	9,8E-08
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	1,4E-08	1,5E-08	1,7E-08	1,9E-08
Acidificazione	mol H ⁺ eq	1,4E-03	1,4E-03	1,6E-03	1,8E-03
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	8,3E-05	8,4E-05	9,9E-05	1,1E-04
Eutrofizzazione marina	kg N eq	2,8E-04	2,7E-04	3,0E-04	3,3E-04
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	3,2E-03	3,1E-03	3,5E-03	3,8E-03
Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	0,35	0,35	0,41	0,46
Uso del suolo	Pt	4,98	5,04	5,98	6,77
Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	0,33	0,33	0,39	0,45
Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	2,41	1,91	2,11	2,34
Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	1,4E-05	1,4E-05	1,7E-05	1,9E-05

Tabella 0.4 : Impatti totali dei quattro scenari per l'impianto BAWL-OL (NO).

Categoria d'impatto	Unità di misura	BAWL-OL			
		A+OL	B+OL	C+OL	D+OL
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	-1,23	-1,24	-1,22	-1,19
Assottigliamento della fascia di ozono	kg CFC-11 eq	6,1E-09	6,0E-09	6,5E-09	6,9E-09
Radiazioni ioniche - salute umana	kBq U ₂₃₅ eq	5,1E-02	5,2E-02	6,2E-02	7,0E-02
Formazione fotochimica di ozono - salute umana	kg NMVOC eq	5,1E-04	4,8E-04	5,1E-04	5,4E-04
Assunzione di materiale particolato	disease inc.	7,7E-09	7,1E-09	7,6E-09	8,0E-09
Tossicità per l'uomo - effetti non cancerogeni	CTUh	1,2E-08	1,1E-08	1,3E-08	1,4E-08
Tossicità per l'uomo - effetti cancerogeni	CTUh	4,6E-09	4,4E-09	5,0E-09	5,3E-09
Acidificazione	mol H ⁺ eq	5,9E-04	5,2E-04	5,6E-04	5,9E-04
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	2,5E-05	2,4E-05	2,8E-05	3,1E-05
Eutrofizzazione marina	kg N eq	1,7E-04	1,6E-04	1,7E-04	1,8E-04
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	2,1E-03	2,0E-03	2,2E-03	2,3E-03
Ecotossicità - acqua dolce	CTUe	0,09	0,09	0,09	0,10
Uso del suolo	Pt	1,46	1,42	1,64	1,83
Uso delle risorse idriche	m ³ depriv.	0,12	0,11	0,13	0,15
Uso delle risorse – combustibili fossili	MJ	2,01	1,50	1,62	1,78
Uso delle risorse – minerali e metalli	kg Sb eq	6,8E-07	6,3E-07	7,2E-07	7,1E-07