



POLITECNICO
MILANO 1863

POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE
TESI DI LAUREA MAGISTRALE

ANALISI DEGLI IMPATTI LEGATI ALLE
OPERAZIONI DI DECOMMISSIONING DELLE
PIATTAFORME O&G OFFSHORE

Tesi di Laurea Magistrale a cura di:

Federico Nardo (900306)

Relatore:

Prof. Arianna Azzellino

Correlatori:

Dott. Giuseppina Colaleo

Anno Accademico 2020/2021

Un profondo ringraziamento a chi mi ha supportato in questo lungo percorso, come studente, come professionista e come persona.

A mio fratello Riccardo, compagno di sventure e di risate.

A mia madre Silvia, la persona che mi è stata vicino più di chiunque altro in tutti gli anni di studi, tramandandomi la passione per la conoscenza.

A mio padre Enrico, per avermi dimostrato coi fatti il valore della perseveranza e della tenacia.

A me stesso, per tutto l'impegno ed i sacrifici fatti per raggiungere questo traguardo.

Federico

Abstract

La gestione al termine della vita utile delle piattaforme O&G offshore, ultimo baluardo di un sistema costruttivo, economico e sociale insufficientemente orientato alle questioni climatico-ambientali, rappresenta una delle maggiori sfide che nel contesto di sviluppo moderno dovrà affrontare nell'immediato futuro. Pur se la normativa internazionale vigente proibisce l'abbandono, in particolare nel panorama europeo, ammette la possibilità di sottoporre a valutazione progetti, alternativi alla rimozione totale, fondati sui principi di riuso sostenibile di tali infrastrutture. Nel presente elaborato si propone un'analisi LCA preliminare circa le operazioni di rimozione totale, smaltimento e riciclo dei materiali di risulta, corredata da valutazioni di impatto ambientale e proponendo un progetto alternativo alle operazioni di rimozione, basato su una tecnologia di accrescimento minerale, completo di indagini di applicabilità economica per l'investimento che tale progetto comporterebbe.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Le Piattaforme nel Mondo	5
1.2	Scopo dell'elaborato	10
I	Background Teorico	12
2	Il <i>Decommissioning</i> delle Piattaforme	14
3	La Normativa di Riferimento	18
3.1	Il Quadro Internazionale	19
3.2	La Normativa Europea	22
3.3	La Normativa Italiana	25
4	Principi di Produzione e Riciclo dell'Acciaio	28
4.1	Acciaio Primario: il Ciclo Integrale	29

4.2	Acciaio Secondario: il Ciclo Elettrico	31
4.3	Il Peso dell'Acciaio: Impatti e Costi	32
5	Artificial Reef: Ecologia e Potenziali Impatti	36
6	La Tecnologia di Accrescimento Minerale	42
6.1	L'Elettrolisi	43
6.2	Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale	45
7	RELife: Il Metodo	50
8	Analisi LCA: l'Analisi del Ciclo di Vita	54
8.1	<i>Goal and Scope Definition</i>	56
8.1.1	La Multifunzionalità	60
8.1.2	<i>Foreground e Background System</i>	61
8.1.3	Unità Funzionale e Qualità dei Dati	63
8.2	<i>Life Cycle Inventory</i>	64
8.3	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>	66
8.4	<i>Life Cycle Interpretation</i>	70
9	Analisi DCFA: l'Analisi del Flusso di Cassa Attualizzato	73
II	Lo Studio	77
10	Materiali e Metodi	79
10.1	Inquadramento dello Studio	79
10.1.1	Rimozione Totale della Piattaforma	82
10.2	Analisi LCA	84

	Indice
10.2.1 Goal and Scope Definition	84
10.2.2 Life Cycle Inventory	90
10.2.3 Life Cycle Impact Assessment	115
10.2.4 Life Cycle Interpretation	118
10.2.5 Controllo di Sensitività	126
10.3 Analisi Critica, Limiti e Considerazioni Finali	131
11 Valutazioni di Impatto sulla Componente Biologica	133
12 Progetto Alternativo	145
12.1 Analisi DCFA	146
12.1.1 Primo Scenario di Valutazione Economica	154
12.1.2 Secondo Scenario di Valutazione Economica	155
13 Discussione e Limiti dello Studio	156
14 Conclusioni	159
III Appendici	163
A Diagrammi di Sankey	164
Bibliografia	171

Indice delle Figure

1.1	Emissioni di gas climalteranti, espressi in termini di CO2 equivalente per kWh di energia prodotta (IPCC - SRREN)	2
1.2	Il costo attuale netto medio della produzione di energia elettrica nel corso della vita utile dell'impianto <i>Leveli- zed Cost of Energy</i> , LCOE (REN21, Renewables 2020 Global Status Report)	3
1.3	Potenza elettrica globale disattivata (rosso) e installata (blu) nel mondo, riferita al 2017 (EC - PV Status Report 2019)	4
1.4	Potenza elettrica europea disattivata (rosso) e installata (blu) nel mondo, riferita al 2017 (EC - PV Status Report 2019)	5
1.5	Esempio di piattaforma Jack-Up.	6

1.6	Confronto tra una piattaforma semisommersibile ed un drillship	7
1.7	Distribuzione mondiale delle piattaforme petrolifere offshore. [72]	8
1.8	Rappresentazione schematica di una piattaforma petrolifera. [18]	9
2.1	Shema delle alternative possibili per la dismissione delle piattaforme offshore.	17
4.1	Rappresentazione della filiera di produzione di acciaio a partire dal minerale di ferro	31
4.2	Rappresentazione della filiera di produzione di acciaio secondario o riciclato	32
4.3	Emissione di anidride carbonica legata alla produzione di acciaio via ciclo integrale (blu) ed elettrica (verde), in differenti regioni del mondo [34]	34
5.1	Stelle marine giganti, Pisaster Gigantean, attrirate dai mitili sulla struttura sommersa delle piattaforme offshore in California.. . . .	37
6.1	Confronto fra una cella galvanica, a destra, ed una cella elettrolitica, a sinistra. In questo caso i due elettrodi sono composti da piombo (Pb) e dal relativo ossido (PbO ₂). . .	45
6.2	Rappresentazione schematica delle reazioni elettrolitiche che avvengono presso anodo e catodo [22]	48

8.1	Rappresentazione schematica delle fasi di uno studio LCA	56
8.2	Rapporto tra tipologia di studio ed ambito decisionale . . .	59
8.3	Rapporto tra tipologia di studio e principi modellistici . . .	59
8.4	Esempio del processo di espansione per la soluzione della multifunzionalità [38].	60
8.5	Esempio di allocazione per la soluzione della multifunzionalità [38].	61
8.6	Rappresentazione schematica dei confini di sistema di un ipotetico studio LCA [38]	63
8.7	Focus sulla fase di valutazione degli impatti	67
8.8	Suddivisione delle categorie di impatto in base al loro effetto ed alla distanza emissione-impatto	70
8.9	Focus sulla fase di interpretazione dei risultati.	71
10.1	Piattaforma "Viviana 1"	80
10.2	Localizzazione geografica della piattaforma "Viviana 1" e sede dello studio	81
10.3	Piattaforma "Ada 3"	82
10.4	Rappresentazione schematica del sistema di processo legato alla produzione dell'acciaio a partire dal rottame . . .	85
10.5	Rappresentazione schematica del sistema di processo legato alla produzione a ciclo integrale dell'acciaio a partire dal minerale di ferro	86
10.6	Principali flussi in ingresso ed uscita dal forno per coke . .	91
10.7	Principali flussi in ingresso ed uscita dal sinterizzatore . .	94

10.8	Principali flussi in ingresso ed uscita dall’altoforno . . .	97
10.9	Principali flussi in ingresso ed uscita dal BOF	100
10.10	Flussi di massa della filiera produttiva di acciaio vergine .	103
10.11	Nave-gru a braccio mobile	104
10.12	Pontone di trasporto	104
10.13	Rimorchiatore Navale	104
10.14	Mezzo di supporto	105
10.15	Cronoprogramma delle operazioni di rimozione della mo- notubolare come descritto nel progetto di valutazione relativo alla piattaforma Ada3	106
10.16	Principali flussi in ingresso ed uscita dal forno elettrico .	112
10.17	Flussi di massa della filiera produttiva di acciaio secondario	115
10.18	Categorie di impatto considerate all’interno del metodo di caratterizzazione ILCD2011	116
10.19	Diagramma di Sankey per la categoria di impatto <i>Clima- te Change</i>	118
10.20	Analisi dei contributi per la categoria di impatto <i>Climate Change</i>	119
10.21	Analisi dei contributi per la categoria di impatto <i>Human Toxicity, Cancer Effects</i>	121
10.22	Analisi dei contributi per la categoria di impatto <i>Land Use</i>	122
10.23	Analisi dei contributi per la categoria di impatto <i>Marine Eutrophication</i>	123

10.24 Analisi dei contributi per la categoria di impatto <i>Particulate Matter</i>	124
10.25 Analisi dei contributi per la categoria di impatto <i>Water Resource Depletion</i>	125
10.26 Analisi dei contributi in termini percentuali dello studio .	126
10.27 Piattaforma Bonaccia NW	127
10.28 Flussi di massa della filiera produttiva di acciaio secondario relativamente alla composizione dei materiali reperiti da Bonaccia NW	128
10.29 Analisi dei contributi dello studio riferito a Bonaccia NW	129
10.30 Analisi dei contributi in termini percentuali dello studio riferito a Bonaccia NW	130
10.31 Analisi dei contributi in termini percentuali dello studio riferito a Bonaccia NW	131
A.1 Diagramma di Sankey per la categoria di impatto <i>Climate Change</i>	165
A.2 Diagramma di Sankey per la categoria di impatto <i>Human Toxicity, Cancer Effects</i>	166
A.3 Diagramma di Sankey per la categoria di impatto <i>Land Use</i>	167
A.4 Diagramma di Sankey per la categoria di impatto <i>Marine Eutrophication</i>	168
A.5 Diagramma di Sankey per la categoria di impatto <i>Particulate Matter</i>	169

A.6 Diagramma di Sankey per la categoria di impatto *Water*
Resource Depletion 170

Indice delle Tabelle

5.1	Indicatori di impatto per l'identificazione dei criteri ambientali per la valutazione di impatto delle attività di decommissioning [72].	41
6.1	pH di saturazione dei diversi composti di calcio e magnesio in acqua di mare [22].	48
10.1	Tabella lunga e larga	88
10.2	Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione del coke	92
10.3	Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione di materiale metallico sinterizzato	95
10.4	Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione di ghisa	98

10.5	Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione dell'acciaio	101
10.6	Fattori di emissioni utilizzati per i mezzi navali coinvolti nelle operazioni di <i>decommissioning</i> [kg / t _{fuel}]	108
10.7	Inventario dei materiali ricavabili dalla rimozione dalla piattaforma Ada3, secondo le stime di ENI S.p.A.	109
10.8	Composizione merceologica dei materiali ricavabili dalla rimozione dalla piattaforma Ada3, secondo le stime di ENI S.p.A.	110
10.9	Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione dell'acciaio	113
10.10	Risultati della fase di caratterizzazione degli impatti per le categorie di impatto considerate	116
10.11	Risultati della fase di caratterizzazione degli impatti per le categorie di impatto considerate	124
10.12	Composizione merceologica dei materiali ricavabili dalla rimozione dalla piattaforma Bonaccia NW, secondo le stime di ENI S.p.A.	127
11.1	Potenziali effetti ambientali delle attività di rimozione della piattaforma offshore riferiti agli 11 descrittori di buono stato previsti dalla direttiva 2008/56/CE	139
12.1	Stima dei costi legati al progetto di rimozione completa .	148

12.2	Calcolo del budget massimo di spesa per la realizzazione del progetto alternativo	150
12.3	Calcolo dei costi operativi massimi ammissibili sulla base del budget effettivo ipotizzato per la realizzazione del progetto alternativo	151

CAPITOLO *1*

Introduzione

Il panorama energetico internazionale risulta, ad oggi, fortemente dipendente dalle energie cosiddette fossili, derivanti ovvero da fonti energetiche create grazie alla trasformazione nel corso di milioni di anni della biomassa sepolta nella crosta terrestre in combustibili quali carbonio, petrolio e gas naturale, composti dotati di alto potere calorifico e caratterizzati da un elevato tenore di carbonio all'interno della struttura molecolare.

Conformemente agli impegni di sviluppo sostenibile assunti dai diversi stati membri dell'UNFCCC e sottoscritti all'interno degli accordi internazionali, prima a Kyoto nel 2005 e poi a Parigi nel 2015, la sfida che si

troveranno ad affrontare, non solo il settore energetico ma l'intero mercato mondiale, sarà quella della riconversione dell'attuale sistema energetico fossile, attraverso l'introduzione di tecnologie volte a sfruttare in maniera più efficiente le fonti energetiche rinnovabili, complici anche i costi sempre più competitivi di tale forma di energia (fig.1.1 e fig.1.2).

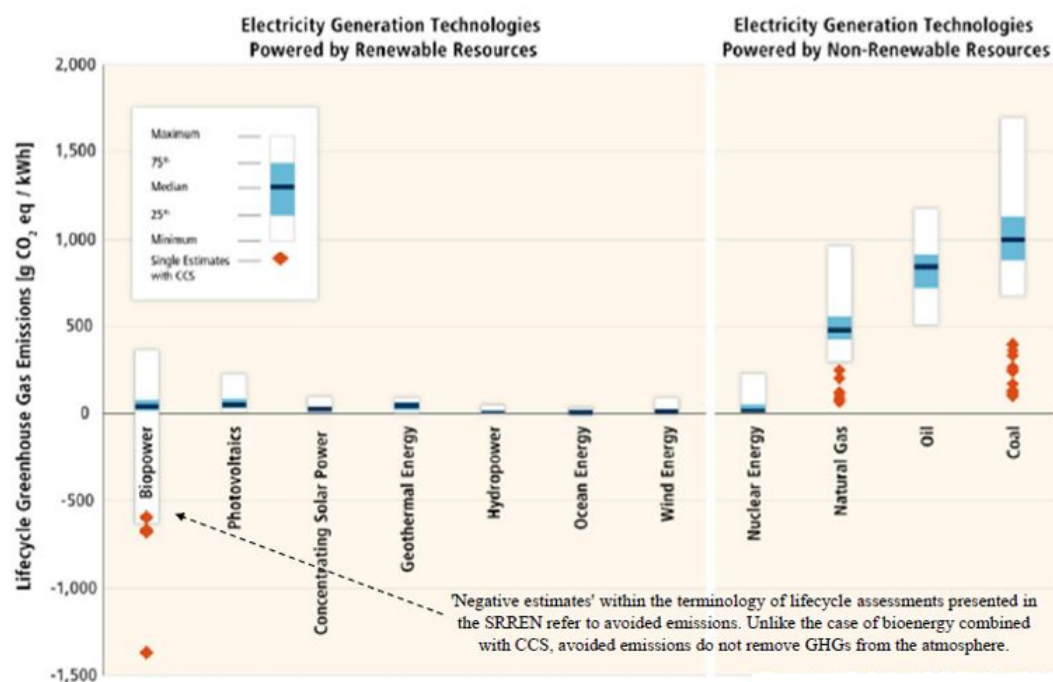


Figura 1.1: Emissioni di gas climalteranti, espressi in termini di CO₂ equivalente per kWh di energia prodotta (IPCC - SRREN)

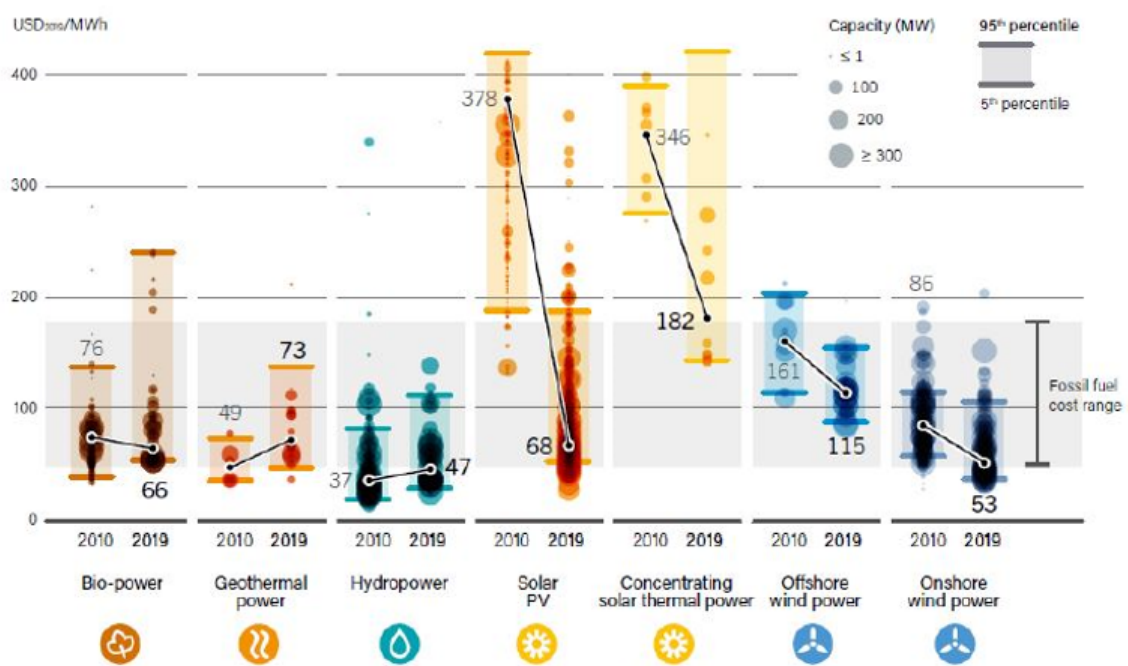


Figura 1.2: Il costo attuale netto medio della produzione di energia elettrica nel corso della vita utile dell'impianto Levelized Cost of Energy, LCOE (REN21, Renewables 2020 Global Status Report)

È proprio nell’ottica di sviluppo sostenibile e decarbonizzazione, passaggio obbligato per il raggiungimento del noto obiettivo socio-economico delle zero emissioni nette di gas climalteranti, che si delineano i principali punti chiave di una transizione energetica di tale portata, uno dei quali è rappresentato dallo smantellamento o, preferibilmente, il riutilizzo delle infrastrutture legate al “vecchio” sistema energetico ¹.

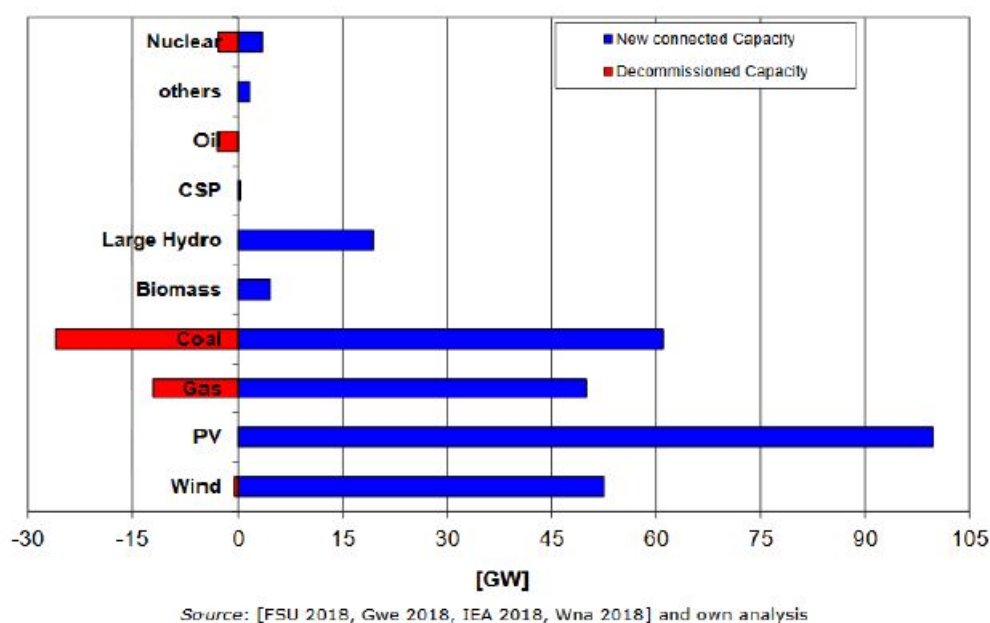


Figura 1.3: Potenza elettrica globale disattivata (rosso) e installata (blu) nel mondo, riferita al 2017 (EC - PV Status Report 2019)

¹Come si nota, in riferimento alle fig.1.3 e fig.1.4, nel panorama europeo, a differenza di quello mondiale, è in atto una vera e propria sostituzione delle centrali a combustibili fossili (carbone e petrolio) con centrali di generazione di potenza da fonti rinnovabili quali fotovoltaico, eolico e biomassa. Particolare menzione deve essere fatta per le centrali a gas, considerate tecnologia ponte per la transizione energetica e, grazie all’elevata presa di carico in tempi brevi, buona integrazione per le fonti energetiche rinnovabili, per loro natura variabili e non programmabili: ci si aspetta in tal senso un incremento della potenza installata legata alle centrali a turbogas.

1.1. Le Piattaforme nel Mondo

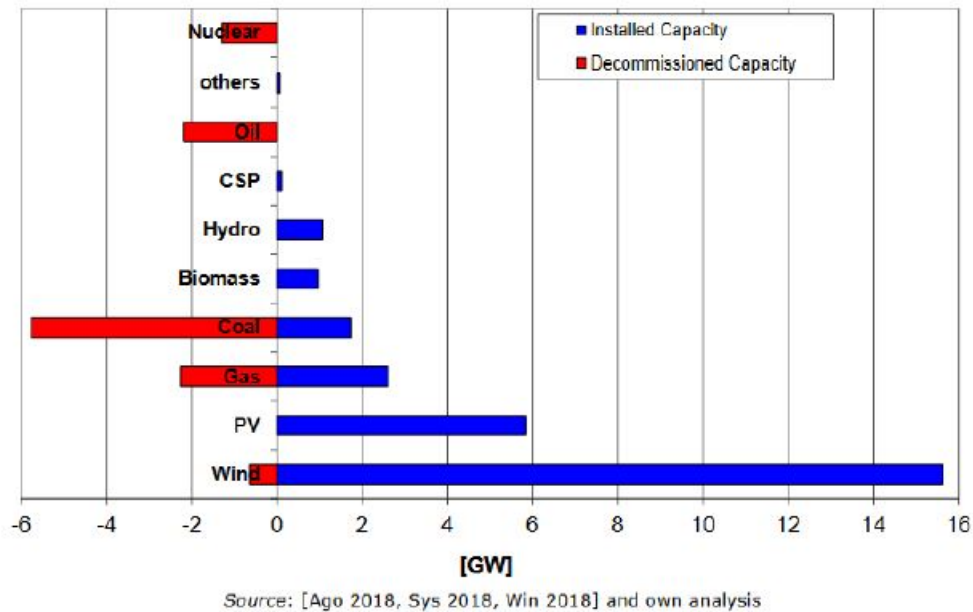


Figura 1.4: Potenza elettrica europea disattivata (rosso) e installata (blu) nel mondo, riferita al 2017 (EC - PV Status Report 2019)

1.1 Le Piattaforme nel Mondo

Nonostante i primi pozzi petroliferi sommersi furono perforati da piattaforme costruite nelle acque dolci del Grand Lake St. Marys in Ohio, intorno al 1890, utilizzando semplici piattaforme palificate, data la modesta profondità del bacino artificiale, solamente nei primi decenni del '900 si riuscì a vedere i primi pozzi petroliferi sommersi in acqua salata nella zona del Canale di Santa Barbara in California, seguiti dalle perforazioni nelle zone di marea lungo la costa del Golfo del Texas e della Louisiana, in seguito allo sviluppo delle chiatte mobili in acciaio per la perforazione nelle zone costiere salmastre del golfo all'inizio degli anni '30. Dopo diversi tentativi, fu solo a partire dagli anni '50 che

1.1. Le Piattaforme nel Mondo

si iniziò effettivamente a perforare fuori dalla vista della terra, grazie alla realizzazione di grosse strutture ispirate dai forti Maunsell britannici, costruiti durante la seconda guerra mondiale e considerati i predecessori diretti delle moderne piattaforme offshore: nel 1954 venne realizzata in Texas la prima piattaforma petrolifera jackup, che prevedeva tre gambe a traliccio azionate elettromeccanicamente e successivamente, nel 1963, la prima perforatrice oceanica semisommersibile.

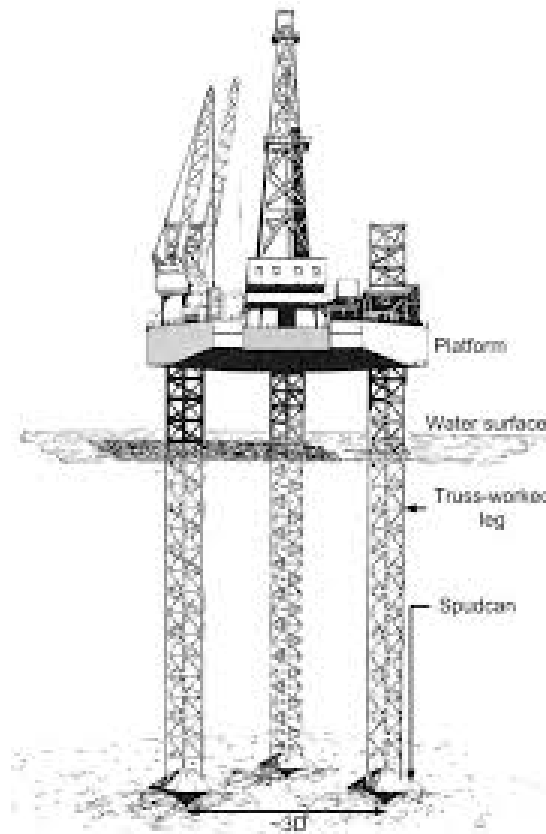


Figura 1.5: Esempio di piattaforma Jack-Up.

Attualmente, sono presenti circa 6.500 piattaforme marine, di cui più di 4.000 situate nel Golfo del Messico, 950 in Asia e 600 in Europa, in particolare nell'area del Nord-Est Atlantico e nel Mare del Nord; circa 130 di quest'ultime si trovano nel Mar Mediterraneo, impegnate nel-

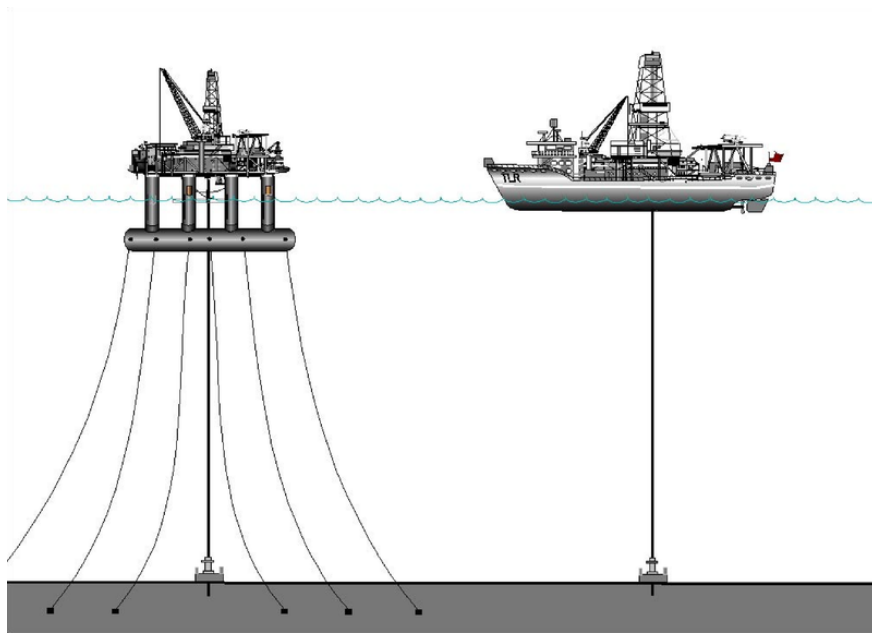


Figura 1.6: Confronto tra una piattaforma semisommersibile ed un drillship

l'estrazione prevalentemente di gas, localizzate lungo le coste centro-settentrionali del Mar Adriatico, nel Mar Ionio e nello Stretto di Messina: in tali aree, a partire dal 1960 sono state installate più di 110 strutture di estrazione, costituiscono la più alta concentrazione di piattaforme offshore dell'intero Mediterraneo (fig.1.7). Si stima che globalmente circa 600 di queste strutture giungeranno a fine vita nei prossimi 5 anni e che circa altre 2.000 dovranno affrontare il medesimo destino entro il 2040 [72].

Generalmente, una piattaforma petrolifera fissa offshore è composta dal deck, la piattaforma vera e propria dove si svolgono tutte le principali attività di estrazione e sede delle attrezzature e del personale, il jacket ovvero la struttura reticolare posta sotto il pelo libero a sostegno del deck, alle cui estremità sono ancorate le gambe portanti, le fondamenta della struttura giacciono sul fondale marino, permettendo il sostegno

1.1. Le Piattaforme nel Mondo

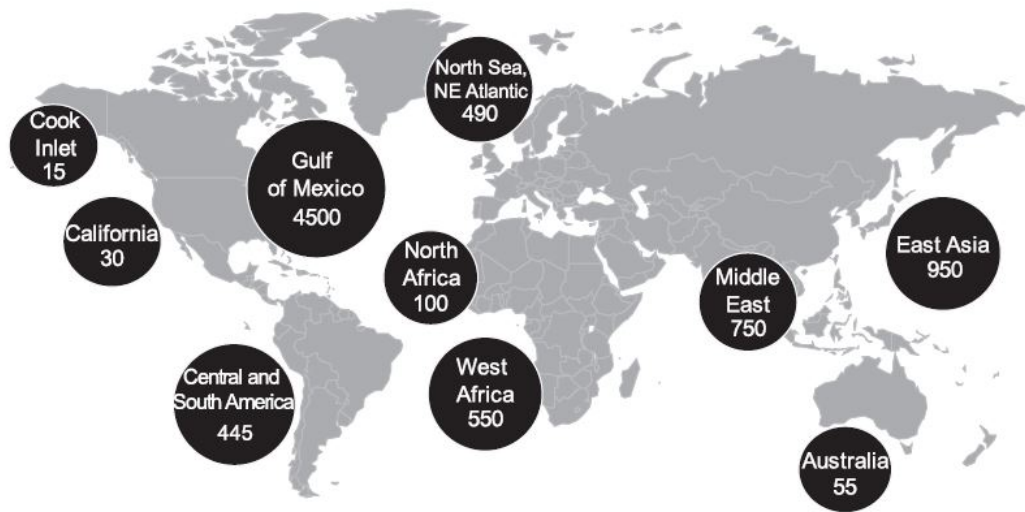


Figura 1.7: *Distribuzione mondiale delle piattaforme petrolifere offshore. [72]*

complessivo della piattaforma ed infine le condotte di aspirazione consentono l'estrazione di petrolio e gas dal giacimento sottostante (fig.1.8). Le dimensioni ed il peso complessivi della piattaforma dipendono in larga parte dalle condizioni ambientali in cui la stessa si trova ad operare, variando tra le 200 e le 50.000 tonnellate.

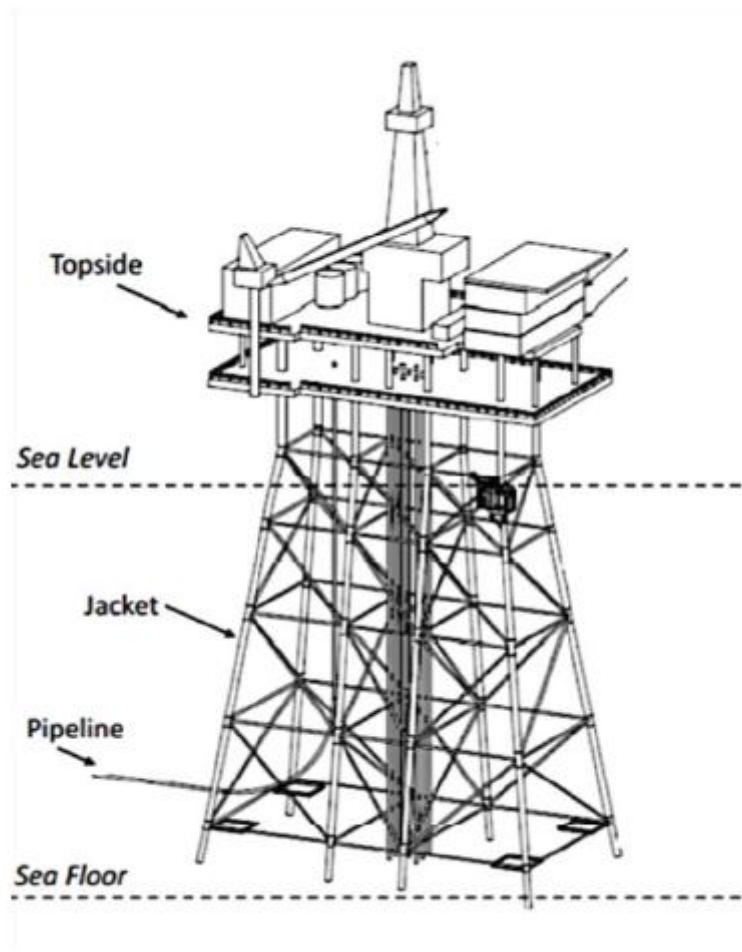


Figura 1.8: *Rappresentazione schematica di una piattaforma petrolifera. [18]*

1.2 Scopo dell'elaborato

In virtù dell'imminente transizione energetica, nell'ambito di questo elaborato verrà svolta un'indagine di valutazione degli impatti orientata verso le moderne tecniche di analisi LCA ², relativamente al futuro delle strutture marine di estrazione petrolifera fisse, le cosiddette piattaforme offshore, ormai prossime allo stato di End-of-Life ³, presentandone stato di fatto, conformazione e le diverse opzioni di *decommissioning* attuabili in riferimento al panorama italiano. L'analisi sarà applicata alla piattaforma denominata "Viviana 1", sita nel Mare Adriatico e coinvolta nel progetto PlaCE: tale iniziativa di natura nazionale è volta all'esplorazione di tecnologie e soluzioni innovative d'avanguardia per il riutilizzo ecosostenibile di piattaforme offshore, conformemente alla strategia europea denominata "*Blue Growth*", volta a supportare la crescita sostenibile del settore marino e marittimo, basata su tre azioni cardine: sviluppo dei settori ad alto potenziale di miglioramento della sostenibilità, come acquacoltura, turismo costiero, biotecnologie marine, energia marina ed attività mineraria in acque profonde; sviluppo delle conoscenze, diritti e sicurezza nell'ambito della blue economy; sviluppo di strategie di bacino, per assicurare provvedimenti su misura e favorire la cooperazione tra stati. Le soluzioni prese in considerazione nell'ambito del progetto PlaCE includono tecniche di acquacoltura integrata, sistemi integrati di generazione e gestione delle energie rinnovabili, sistemi di supporto per

²Life Cycle Assessment, si faccia riferimento al Capitolo 8

³Nel Life Cycle Thinking, End-of-Life indica il termine della vita utile di un prodotto

1.2. Scopo dell'elaborato

la valutazione di sostenibilità delle attività delle piattaforme ed infine la tecnica di accrescimento minerale ⁴, intese come strategia di estensione della vita utile delle piattaforme offshore.

⁴Lo scopo delle tecniche di accrescimento minerale è la formazione di depositi calcarei per via elettrolitica, solitamente condotti in acqua salina, ed applicate sperimentalmente per il ripristino o protezione di strutture sommerse, ma anche per la creazione di scogliere contro l'erosione dei litorali



Parte I

Background Teorico

Nella presente sezione dell'elaborato si intende fornire le conoscenze teoriche necessarie alla piena comprensione dello studio proposto in seguito e cardine dell'intero progetto di tesi. Gli argomenti trattati comprendono la definizione dei termini e delle operazioni necessarie alla dismissione delle piattaforme, la presentazione del quadro normativo nazionale ed internazionale, i fondamenti teorico-concettuali sia delle tecniche di estensione della vita utile delle strutture offshore sia delle metodologie di studio eseguite.

CAPITOLO 2

Il *Decommissioning* delle Piattaforme

Con il termine *decommissioning* si intende l'insieme di operazioni volte alla dismissione ed eventuale smantellamento delle piattaforme petrolifere, una volta esaurite le scorte di combustibile presenti nel giacimento su cui sono state realizzate. Generalmente le operazioni standard di *decommissioning* prevedono distinti destini per il *deck*, la parte superficiale della piattaforma e sede delle attività della piattaforma, ed il *jacket*, la parte sommersa di sostegno ed ancoraggio al fondale: la prima, composta da strutture modulari, attrezzature e macchinari, può venire smontata e trasportata in cantieri appositi a terra per il riciclo dei materiali od il parziale riuso; la parte reticolare della struttura viene invece recisa alla

base, a livello del fondale marino, abbattuta e trasportata ai centri per il riciclo dei rottami o restaurata per una nuova installazione.

Le operazioni di taglio del *jacket* possono essere effettuate con l'ausilio di mezzi meccanici o con esplosivi, in base alla tipologia della struttura e le relative dimensioni. Il taglio con mezzi meccanici, quali getti d'acqua abrasivi o lame a filo diamantato, vengono impiegate nel 35% dei casi e comportano maggiori tempistiche, costi e rischi per il personale, tuttavia, nel complesso risultano meno impattanti nei confronti dell'ecosistema rispetto all'utilizzo di esplosivi e cariche detonanti, il cui impiego può facilmente essere letale per la fauna marina in prossimità della piattaforma [18].

In sintesi, le fasi di rimozione generalmente comprendono: la chiusura di tutti i pozzi ed il taglio dei supporti, la rimozione sicura dei condotti di aspirazione, così come quella della piattaforma dalle fondamenta, il trasporto dei rottami e delle strutture nei siti appositi, come anche il monitoraggio ambientale del sito per escluderne la possibile contaminazione. I costi di tali operazioni risultano essere dell'ordine di decine di miliardi di euro e gli *stakeholder* coinvolti nella gestione delle piattaforme, legalmente vincolati ad eseguire le procedure di dismissione delle infrastrutture inattive, sono alla forte ricerca di soluzioni alternative al decommissioning completo, in modo da evitare, ridurre o ritardare i costi rimozione. Il riutilizzo di queste strutture inoltre risulta essere conforme alla transizione internazionale verso il recente modello economico

sostenibile, definito *Green Economy*¹, proponendo tecniche di *decommissioning* alternative al *business as usual*, che potrebbero apportare innovazioni decisive per gli scenari futuri di sviluppo del settore [53].

Esistono tuttavia alternative allo smantellamento della struttura, basate su tecniche già mature e convalidate che coinvolgono sostanzialmente il *jacket*, permettendo di evitare alcuni degli aspetti negativi legati alla rimozione completa in termini economici, ambientali e paesaggistici [65].

Nel corso della vita utile, le piattaforme sono diventate parte dell'ecosistema marino, fornendo infine veri e propri servizi ecosistemici come habitat artificiale [17]. Per queste ragioni, sono state sviluppate soluzioni di *artificial reef* che prevedono l'utilizzo dell'articolata struttura di cui si compone il jacket delle piattaforme: il reefing, altresì detto *Rigsto-Reef*, consiste nell'adeguata sistemazione in situ del reticolo portante della piattaforma, in modo che continui a svolgere la funzione, assunta nel corso di decenni, di habitat artificiale per la fauna marina. Sono disponibili 4 possibili alternative per l'implementazione delle operazioni di reefing, che in aggiunta alle opzioni di rimozione completa e abbandono della struttura tal quale, rappresentano un ventaglio di 6 possibilità distinte tra cui scegliere in funzione prevalentemente delle dimensioni e della profondità dell'installazione: rimozione completa, toppling, reefing orizzontale in situ, reefing altrove, abbandono della struttura tal

¹Si definisce green economy il modello teorico di sviluppo economico basato sull'analisi bioeconomica del sistema in cui, oltre ai benefici economici, vengono presi in considerazione anche l'impatto ambientale, i potenziali danni ambientali prodotti dall'intero ciclo di trasformazione delle materie prime a partire dalla loro estrazione, passando per il loro trasporto e trasformazione in energia e prodotti finiti fino ai possibili danni ambientali che produce la loro definitiva eliminazione o smaltimento.

quale, altri utilizzi (fig.2.1) [1, 72]).

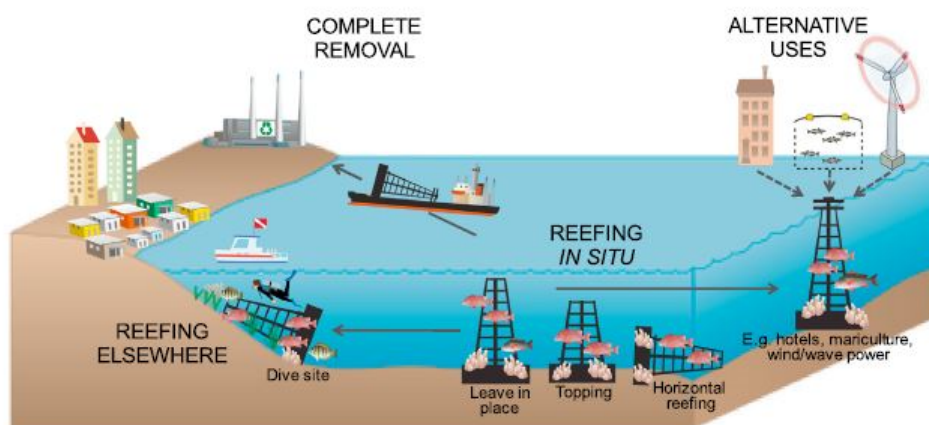
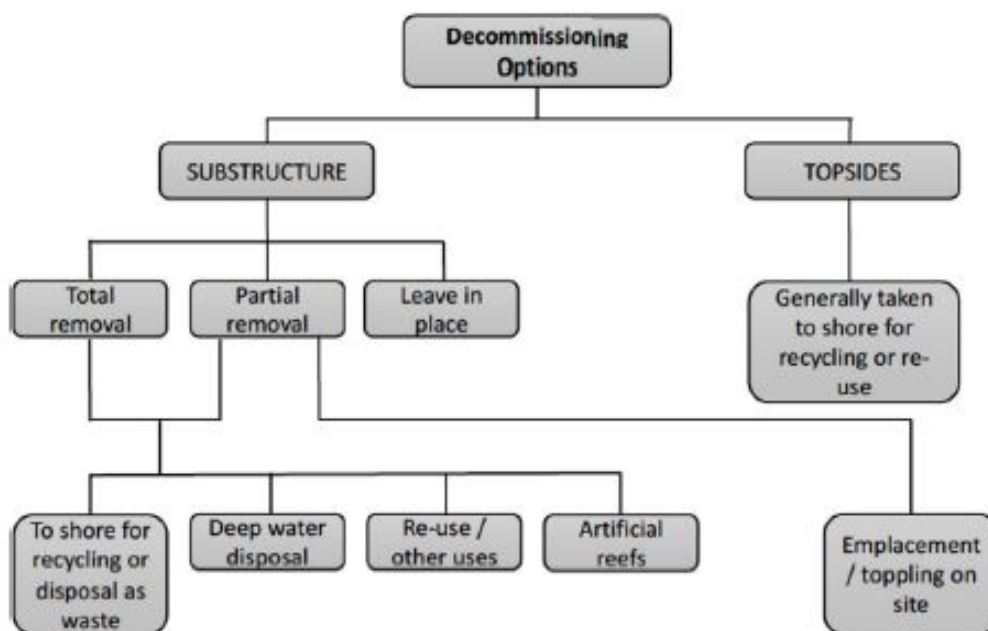


Figura 2.1: Shema delle alternative possibili per la dismissione delle piattaforme offshore.

CAPITOLO 3

La Normativa di Riferimento

La problematica del *decommissioning* si concretizza una volta che le piattaforme operative raggiungono la fine della loro vita utile, cioè quando il giacimento per cui sono state costruite è prossimo ad esaurirsi.

Il termine *decommissioning*, ovvero l'insieme delle operazioni volte alla dismissione, pur essendo già stato sperimentato nel mondo in varie occasioni, non risulta essere stato ancora definito né trattato adeguatamente da alcuna legislazione, rendendolo spesso oggetto di confusione coi termini smaltimento, rimozione nonché abbandono, utilizzato spesso come alternativa del termine: queste tuttavia sono solo alcune delle molte possibilità di *decommissioning* tra cui poter scegliere.

3.1. Il Quadro Internazionale

È un dato di fatto che, storicamente, il contesto legislativo internazionale abbia favorito la rimozione completa delle piattaforme, nonostante molte non vennero progettate per poter essere rimosse [75].

La legislazione globale in materia di piattaforme estrattive risulta complessa e molto variegata, presentando differenze sostanziali tra regimi internazionali, regionali e nazionali.

Non risulta invece normato il quadro delle operazioni concernenti il *ree-fing* artificiale, definito come strutture artificiali sommerse, variabili in dimensioni e materiali, atte a riprodurre alcune delle caratteristiche delle barriere naturali [75].

3.1 Il Quadro Internazionale

Per quanto riguarda il panorama internazionale, i riferimenti normativi cardine sono la *United Nation Convention on the Law of the Sea*, detta anche UNCLOS, e la *London Convention and Protocol*, pur non essendo mai specificato il termine *decommissioning* in nessuno di essi.

All'interno della UNCLOS, adottata nel 1984, viene assegnata rilevante importanza alla libera fruizione delle acque internazionali e della possibilità di navigazione, identificando di conseguenza nelle strutture legate alle piattaforme petrolifere un fattore di rischio per le imbarcazioni, così come anche un elemento impattante per ecosistemi e paesaggio marino. In tale documento vengono definite aree marittime di interesse, suddividendo orizzontalmente e verticalmente gli oceani ed identificando così aree e colonne d'acqua di competenza: si stabilisce quindi che le aree

3.1. Il Quadro Internazionale

comprese nelle prime 12 miglia nautiche dalla costa risultano di competenza nazionale; dalle 12 alle 200 miglia nautiche dalla costa si identifica la *Exclusive Economic Zone*, con i conseguenti diritti di esplorazione e sfruttamento.

In termini di impatti, la normativa UNCLOS sancisce la responsabilità statale degli impatti derivanti dalle attività concesse nelle aree di competenza, come anche la necessità dell'adozione di opportuni strumenti legislativi per la regolazione, prevenzione e riduzione dei potenziali impatti, insieme alla redazione obbligatoria di un documento per la loro valutazione, obbligo concernente anche l'ambito delle operazioni di dismissione delle piattaforme.

Più nello specifico, nell'art. 60 dell'UNCLOS si cita:

"Any installations or structures which are abandoned or disused shall be removed to ensure safety of navigation, taking into account any generally accepted international standards established in this regard by the competent international organisation. Such removal shall also have due regard to fishing, the protection of the marine environment and the rights and duties of other states. Appropriate publicity shall be given to the depth, position and dimensions of any installations or structures not entirely removed."

Obblighi estesi dal successivo art. 80 ad ogni tipo di isola artificiale, strutture e installazione.

Nell'articolo si fa inoltre riferimento alle normative internazionalmente

3.1. Il Quadro Internazionale

accettate e valide stabilite dall'organizzazione internazionale competente, rappresentata, in materia di diritti ed obblighi marittimi, dall'organo *Maritime Safety Committee* facente parte dell'istituzione *International Maritime Organization*: nel 1989 venne pubblicato il testo di riferimento, non legalmente vincolante, denominato “*Guidelines and Standards for the Removal of Offshore Installations and Structures on the Continental Shelf and in the Exclusive Economic Zone*”, in cui viene espressa la necessità di valutazioni *ad hoc* basate sul rischio per la sicurezza della navigazione, rateo di deterioramento della struttura, effetti anche potenziali sull'ecosistema marino, costi, fattibilità tecnica e rischio di infortuni legate alle operazioni di rimozione. I criteri di valutazione si riferiscono anche alla valutazione delle diverse possibilità di riuso delle strutture o altre ragionevoli giustificazioni che consentirebbero la permanenza della struttura *in loco*. In questi termini, nel caso in cui venissero identificate delle ragionevoli alternative di riuso, l'obbligo di rimozione andrebbe a decadere.

All'interno del *London Convention and Protocol* si fa riferimento a due distinti provvedimenti, ovvero la convenzione “*Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter*” del 1972 ed il protocollo “*Protocol to the London Dumping Convention*” del 1996.

La convenzione è volta al controllo dell'inquinamento dell'ambiente marino attraverso la regolamentazione dei flussi di materiale in acque libere, strutture antropiche comprese, con finalità di deposito e smaltimento,

3.2. La Normativa Europea

suddividendoli in materiali proibiti (*Annex I*), materiali consentiti previa autorizzazione specifica (*Annex II*) e sostanze consentite previa autorizzazione generica.

Nel protocollo viene specificato che con deposito e smaltimento si intende ogni accumulo di materiale, rifiuti o strutture, compreso il loro abbandono e ribaltamento *in situ*, intendendo lo spazio oceanico attraverso la mera finalità di scarica.

Stante quanto riportato, risulta evidente che la dismissione *in situ* delle piattaforme offshore rappresenti una violazione sia delle linee guida definite dalla UNCLOS sia degli accordi definiti nell'ambito della *London Convention and Protocol*, a meno che non vengano previste azioni di riuso delle strutture in quanto alternativa alle operazioni di *de-commissioning* classico, come ad esempio la creazione di un sistema di *artificial reef*¹, nonostante permanga il fatto che le regolamentazioni internazionali favoriscano la rimozione completa delle strutture.

3.2 La Normativa Europea

In Europa, la legislazione in materia di dismissione delle infrastrutture estrattive offshore fa riferimento alla *Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic*, chiamata anche Convenzione OSPAR, siglata a Parigi nel settembre del 1992. Il documento richiede la prevenzione ed eliminazione dell'inquinamento derivante dalle installazioni offshore, proibendone altresì l'abbandono in mare: viene sancito l'obbligo di rimozione della maggior parte della struttura, con

¹Si veda paragrafo 2.4

3.2. La Normativa Europea

possibilità di eventuale deroga in caso di approvazione internazionale da parte del segretariato dell'OSPAR, rendendo quantomeno difficile che trovino spazio progetti di riuso alternativo e sostenibile delle vecchie strutture in dismissione [75].

Nello specifico, l'Allegato III della Convenzione OSPAR, vieta l'abbandono di ogni tipologia di infrastruttura o manufatto, anche solo parzialmente, nell'ottica di prevenzione degli effetti negativi provenienti dalle attività umane sull'ambiente ed ecosistema marino, come si legge nell'art. 8 dell'Allegato III:

"No placement of a disused offshore installation or a disused offshore pipeline in the maritime area for a purpose other than that for which it was originally designed or constructed shall take place without authorisation or regulation by the competent authority of the relevant Contracting Party. Such authorization or regulation shall be in accordance with the relevant applicable criteria, guidelines and procedures adopted by the Commission in accordance with subparagraph (d) of Article 10 of this Annex. This provision shall not be taken to permit the dumping of disused offshore installations or disused offshore pipelines in contravention of the provisions of this Annex."

Deroga a tali disposizioni può avvenire solo previa richiesta e concessione da parte delle autorità competenti, sulla base di studi e valutazioni specifiche al caso in esame; tuttavia non può venire autorizzato alcun progetto di riuso che coinvolga strutture contenenti sostanze inquinanti o

3.2. La Normativa Europea

pericolose per l'ambiente o la salute umana, impegnandosi a rimuoverle con metodi idonei a prevenirne lo sversamento o la diffusione nell'ambiente.

Come definito nell'art. 10 dell'Allegato III, alle parti dell'accordo si richiede inoltre la definizione delle infrastrutture offshore e relative condotte in disuso:

"For the purposes of this Annex, it shall, inter alia, be the duty of the Commission: (a) to collect information about substances which are used in offshore activities and, on the basis of that information, to agree lists of substances for the purposes of paragraph 1 of Article 4 of this Annex; (b) to list substances which are toxic, persistent and liable to bioaccumulate and to draw up plans for the reduction and phasing out of their use on, or discharge from, offshore sources; (c) to draw up criteria, guidelines and procedures for the prevention of pollution from dumping of disused offshore installations and of disused offshore pipelines, and the leaving in place of offshore installations, in the maritime area; (d) to draw up criteria, guidelines and procedures relating to the placement of disused offshore installations and disused offshore pipelines referred to in Article 8 of this Annex, with a view to preventing and eliminating pollution."

3.3 La Normativa Italiana

La normativa nazionale italiana vede indicate nel D.M. 15/02/2019 “linee guida per la dismissione mineraria delle piattaforme per la coltivazione di idrocarburi in mare e delle infrastrutture connesse”² le norme da seguire in materia, stabilendo le procedure per la dismissione mineraria delle piattaforme e delle infrastrutture connesse già utilizzate per la coltivazione da giacimenti di idrocarburi esauriti o comunque non in grado di assicurare ulteriormente la produzione definita nell’ambito delle concessioni minerarie, definendo inoltre le attività di chiusura dei pozzi, vietandone l’abbandono ed autorizzando al progetti di riuso alternativo, come si legge nell’art. 4:

"Chiusura mineraria dei pozzi

- 1. Un pozzo sterile, o esaurito o comunque non utilizzabile, o non suscettibile di assicurare ulteriormente produzione in quantità commerciale, deve essere chiuso secondo la procedura prevista dal decreto del Presidente della Repubblica 24 maggio 1979, n. 886, e dalle indicazioni del Ministero dello sviluppo economico.*
- 2. Nell’ambito delle operazioni di chiusura mineraria di cui al comma precedente la colonna di rivestimento, le colonne intermedie e la colonna di produzione devono esse-*

²GU Serie Generale n.57 del 08-03-2019

re rimosse al di sotto del fondo marino mediante taglio e recupero.

- 3. L'abbandono delle piattaforme e delle infrastrutture connesse è vietato.*
- 4. In deroga al comma 3, può essere autorizzato da parte dell'amministrazione competente un riutilizzo alternativo, quando siano accertati i requisiti e le garanzie di cui all'art. 8, comma 2 e all'art. 11, commi 4, 5 e 6, o una rimozione parziale delle piattaforme o delle infrastrutture connesse."*

Quest'ultimo caso è conseguibile solamente dopo attente verifiche ed analisi volte ad accertare i requisiti e le garanzie stabilite nell'ambito del decreto stesso all'art. 8.

Nell'ambito dell'art. 11, si definisce che, a valle della documentazione presentata a supporto del progetto di riuso della piattaforma che ne attesti la sostenibilità economica ed ambientale insieme ad un documento di carattere tecnico descrittivo finalizzato alla definizione dello stato attuale degli impianti e delle strutture sia emerse che sommerse ivi compresa descrizione del quadro ambientale comprensivo degli aspetti paesaggistici e culturali corredato da documentazione fotografica, la deroga all'obbligo di rimozione può essere concessa dall'amministrazione competente dopo l'interpellanza dei soggetti interessati.

I progetti di riutilizzo alternativo all'attività estrattiva, compiutamente definiti all'interno del Titolo II della normativa, deve prevedere un'ana-

3.3. La Normativa Italiana

lisi dei potenziali conflitti d'uso per le rotte marittime ed aree protette, un progetto di dismissione post-riutilizzo e recupero ambientale, analisi degli effetti ambientali sia della fase cantieristica sia dell'attività di esercizio ed eventuale procedura di valutazione di impatto ambientale, ai sensi della normativa quadro ambientale vigente³.

³D.lgs. 152/06

CAPITOLO 4

Principi di Produzione e Riciclo dell'Acciaio

L'acciaio è un prodotto essenziale che trova applicazioni in svariati campi, dall'edilizia fino all'automotive, costituendo inoltre un elemento essenziale nel campo meccanico: si stima che l'utilizzo pro-capite per il cittadino medio europeo si attesti intorno alle 12 tonnellate [34]; l'Unione Europea infatti rappresenta il secondo maggior produttore mondiale di acciaio dopo la Cina, con una produzione annua complessiva di circa 150 milioni di tonnellate nel 2019 ¹ [34]. L'acciaio può essere definito come

¹La situazione pandemica globale causata dal COVID-19 e la conseguente emergenza sanitaria ha ridotto drasticamente la richiesta di acciaio a livello internazionale, portando , secondo le stime del

4.1. Acciaio Primario: il Ciclo Integrale

una variegata categoria di prodotti in lega ferrosa, distinguibili in base alla propria e peculiare composizione chimica, conformazione fisica, via di laminazione/galvanizzazione ed il suo grado di qualità: in generale la quantità di carbonio ne determina la durezza, ma nella sua composizione gli altri elementi, variabili in quantità, ne determinano le suddette caratteristiche fisiche, comportamentali e d'impiego. Attualmente in Europa la produzione dell'acciaio segue fundamentalmente due distinti processi di fabbricazione: il 60% viene prodotto attraverso il cosiddetto ciclo integrale mentre il restante 40% il ciclo a forno elettrico. La produzione a ciclo integrale utilizza come materie prime essenziali il minerale di ferro ed il carbon fossile, producendo quindi acciaio vergine; il ciclo elettrico si realizza attraverso la fusione del rottame ferroso, sfruttando le caratteristiche di completa riciclabilità dell'acciaio, ed ottenendo così acciaio secondario [2,3].

4.1 Acciaio Primario: il Ciclo Integrale

Nel ciclo integrale (fig. 4.1) vengono utilizzati in larga misura il carbon fossile ed alcuni minerali, sottoposti a una serie di trattamenti preliminari in modo da renderli idonei alla carica nell'altoforno. Il carbon fossile, attraverso un processo termico eseguito in appositi forni, viene trasformato in *coke* metallurgico, componente indispensabile per il processo chimico di riduzione dell'ossido di ferro in ferro metallico nell'altoforno. I minerali di pezzatura fine, attraverso il processo di sinterizzazione, vengono trasformati in agglomerati adatti alla carica nei forni; i restanti vengono

World Steel Organization, ad una contrazione del mercato mondiale dell'acciaio di oltre il 2,5%.

4.1. Acciaio Primario: il Ciclo Integrale

lavati, macinati e portati alla pezzatura adatta al processo chimico della riduzione che avviene nell'altoforno e trasforma il minerale di ferro in una lega ferro-carbonio chiamata la ghisa. All'uscita dall'altoforno la ghisa viene generalmente colata in un contenitore mobile su rotaie attraverso il quale viene trasportata all'acciaieria per la trasformazione definitiva in acciaio mediante il processo di affinazione che abbassa il contenuto di carbonio e di impurezze, principalmente zolfo e fosforo. I forni di affinazione si basano prevalentemente sul processo di conversione con ossigeno, grazie al quale gli elementi come il carbonio, il silicio, il fosforo e il manganese vengono completamente o in parte ossidati, mediante l'insufflazione di ossigeno puro attraverso una lancia, mentre le reazioni di ossidazione esotermiche forniscono al processo il calore necessario per portare il bagno di ghisa liquida alla temperatura necessaria per le successive operazioni. La carica del forno di affinazione viene bilanciata con l'aggiunta di piccole quantità di rottame, nonché di componenti che consentono di ottenere il grado di durezza e resistenza desiderato. Attraverso il ciclo integrale viene prodotto un acciaio di ottima qualità, adatto a qualsiasi tipo di impiego, in particolare la grande purezza analitica e il basso tenore di gas disciolti favoriscono la destinazione a settori nei quali la duttilità dell'acciaio è critica. Per contro, il processo è complesso, di lunga durata, e le grandi dimensioni dei convertitori richiedono la definizione di flussi di impiego continui e di grossa portata. Per il bilancio energetico complessivo del ciclo integrale, occorre sottolineare che i gas emessi come sottoprodotti nelle varie fasi vengono in larghissima parte

4.2. Acciaio Secondario: il Ciclo Elettrico

recuperati e impiegati per la produzione di energia elettrica e per l'alimentazione di altre utenze, permettendo un recupero efficiente di energia e calore [2,3].

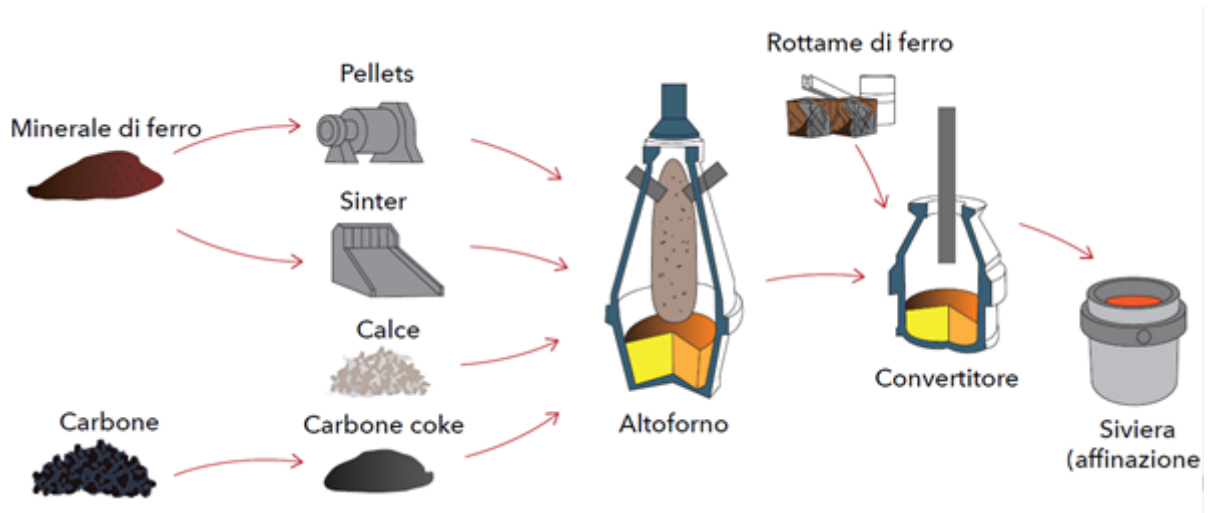


Figura 4.1: Rappresentazione della filiera di produzione di acciaio a partire dal minerale di ferro

4.2 Acciaio Secondario: il Ciclo Elettrico

Il ciclo di produzione dell'acciaio attraverso il forno elettrico (fig. 4.2) risulta essere più compatto rispetto al ciclo integrale, facendo uso direttamente di rottami di acciaio ed essendo privo di impianti e macchinari finalizzati alla produzione della ghisa ed alla sua successiva trasformazione in acciaio.

La tecnologia del forno elettrico si è affermata proprio grazie alla minore complessità del ciclo produttivo, alla capacità di adattarsi con rapidità e flessibilità nonché alla accresciuta disponibilità di rottame di acciaio. La produzione di acciaio avviene attraverso la fusione di rottami, opportunamente preparati e selezionati, all'interno del forno elettrico. Il for-

4.3. Il Peso dell'Acciaio: Impatti e Costi

no viene definito “ad arco elettrico”, se il calore viene fornito dall’arco elettrico che si forma all’interno del crogiolo, oppure “a induzione”, se avviene il passaggio di un intenso flusso elettromagnetico tra un circuito primario e un circuito secondario, rappresentato dalla carica metallica che si vuole fondere.

I vantaggi, che compensano l’elevato consumo di energia elettrica, sono la rapidità di avvio, la maggiore possibilità di controllo dei processi di trasformazione chimica, e l’indipendenza dell’impianto da porti o altre importanti stazioni di smistamento merci.

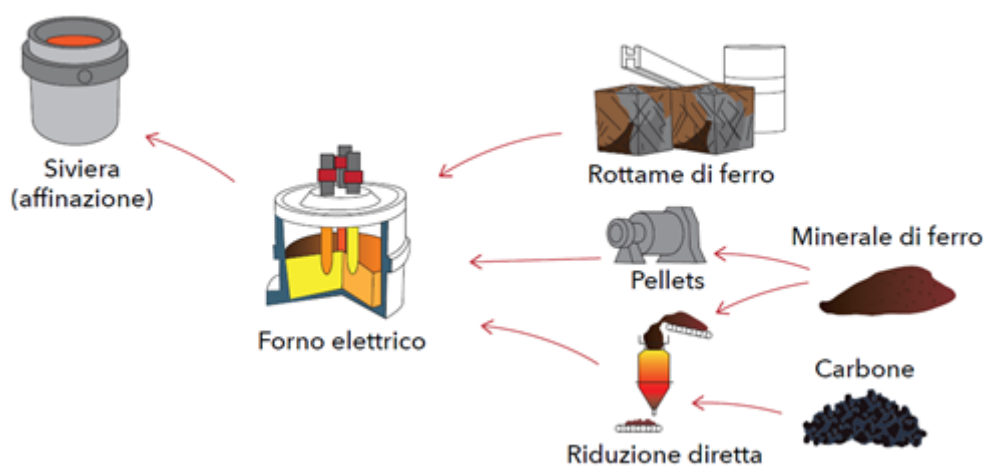


Figura 4.2: *Rappresentazione della filiera di produzione di acciaio secondario o riciclato*

4.3 Il Peso dell'Acciaio: Impatti e Costi

I cicli produttivi sopra descritti comportano rilevanti impatti ambientali ed economici, legati in parte alla linea di produzione, in parte alla catena di approvvigionamento delle materie prime necessarie ed al consumo di energia elettrica che, specialmente nel ciclo elettrico, costituisce una vo-

4.3. Il Peso dell'Acciaio: Impatti e Costi

ce determinante in entrambi gli inventari.

Punto cruciale per la realizzazione degli obiettivi economici ed ambientali dell'European Green Deal, è la riduzione delle emissioni derivanti dal settore metallurgico europeo che, nonostante sia uno dei più efficienti al mondo in termini di emissioni di CO₂, è responsabile annualmente di circa 212 milioni di tonnellate di gas serra, quasi il 6% delle emissioni complessive dell'Europa [34].

Come si osserva dal grafico riportato, complessivamente ad oggi le emissioni del settore metallurgico europeo si aggirano intorno alle 2 tonnellate di CO₂ per tonnellata di acciaio primario prodotto e 0,5 tonnellate di CO₂ per tonnellata di acciaio secondario, testimoniando una riduzione del 26% rispetto alle stime del 1990.

4.3. Il Peso dell'Acciaio: Impatti e Costi

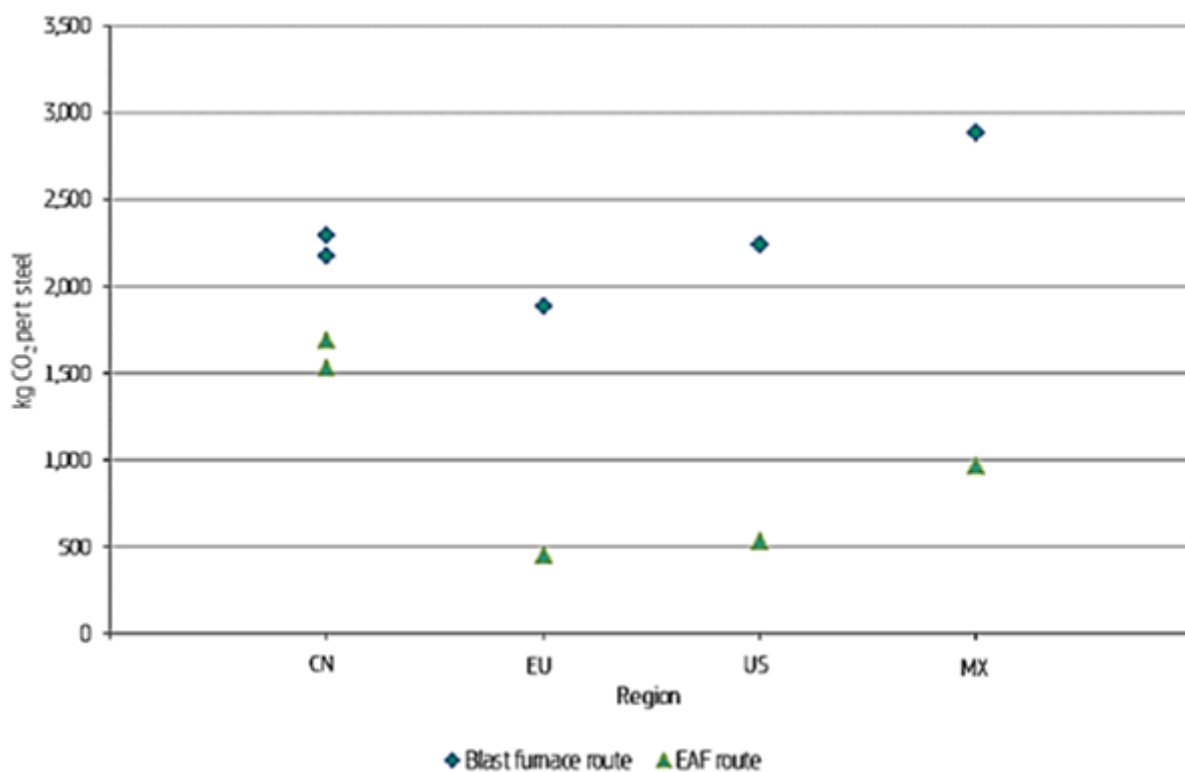


Figura 4.3: *Emissione di anidride carbonica legata alla produzione di acciaio via ciclo integrale (blu) ed elettrica (verde), in differenti regioni del mondo [34]*

Nonostante la produzione per via elettrica sia meno impattante e complessa rispetto alla tradizionale, quest'ultima risulta ancora quella predominante e non è ancora chiaro quale possa essere un realistico scenario del futuro settore metallurgico europeo [34]. L'avanzamento tecnologico dell'ultimo secolo ha permesso di ottenere efficienze di produzione di energia elettrica che hanno reso comparabili le due filiere di produzione. Nell'ultimo ventennio, inoltre, l'abbattimento dei costi della produzione di acciaio secondario ha sancito a tutti gli effetti l'attestarsi del ciclo elettrico al fianco di quello integrato, comportando un costo medio di produzione europeo rispettivamente pari a 486 e 458 euro per tonnellata

4.3. Il Peso dell'Acciaio: Impatti e Costi

prodotta [46]. La ragione dell'assottigliamento del divario economico è da imputarsi non solo al miglioramento tecnico-pratico dei macchinari impiegati ma anche alle politiche ambientali, economiche e sociali europee che, data la natura complessa ed impattante della produzione tradizionale, rendono voci quali costo della mano d'opera, la tassazione sulla CO₂ emessa² e costo delle materie prime estremamente determinanti nella valutazione delle spese di produzione.

²Si noti che all'interno della valutazione dei costi, la cosiddetta Carbon Tax nel caso del riciclo dell'acciaio diventa irrilevante grazie al contributo dei crediti generati dal riutilizzo del rottame di ferro e acciaio nella produzione

CAPITOLO 5

Artificial Reef: Ecologia e Potenziali Impatti

Il termine anglosassone *artificial reef* indica la pratica, affermata a partire dalla metà del XX secolo in Giappone, di installare su fondali marini, anche di modesta profondità, strutture sommerse di varie dimensioni in qualità di barriere coralline artificiali, con lo scopo di attrarre specie ittiche dalle aree circostanti per trovare nei nuovi ambienti un riparo dalla predazione sia perché l'insediamento di organismi sessili sulle pareti di recente immersione può dare origine a nuove risorse alimentari (fig.5.1): tali progetti traggono ispirazione da pratiche tradizionali esistenti fin dai

secoli XVII-XVIII per le quali si procedeva al pianificato affondamento di imbarcazioni in disuso o di gruppi di grosse pietre al fine di ottenere migliori rese di pesca.



Figura 5.1: *Stelle marine giganti, Pisaster Gigantean, attratte dai mitili sulla struttura sommersa delle piattaforme offshore in California..*

Circa nello stesso periodo, analoghe esperienze furono condotte nelle acque dolci e marine degli Stati Uniti posizionando strutture di ridotte dimensioni, adoperando *material of opportunity*¹ che, per loro natura, rappresentano una potenziale fonte d'inquinamento chimico.

In seguito queste strutture per la pesca professionale o sportiva sono andate progressivamente diffondendosi fino ad essere oggi presenti, seppure in maniera molto disomogenea in termini di numero di siti e di volumi immersi, lungo le coste di circa 50 nazioni o territori. In tempi relativamente recenti l'installazione mirata di corpi solidi in alcuni siti è stata utilizzata per finalità bio-ecologiche, ad esempio per facilitare l'insedia-

¹Occasionali materiali generici a basso costo

mento di determinate specie cosicché i progetti relativi a queste strutture sommerse sono da considerarsi i primi passi verso forme di “ingegneria ecologica” mirate al ripristino di aree marine biologicamente impoverite [51].

Nel corso del tempo, numerosi studi sono stati condotti sul rapporto e l'interazione tra ecosistema marino e le barriere coralline artificiali. Progetti come il *Californian Artificial Reef Program* hanno svolto un importante ruolo nel campo, migliorando la conoscenza di queste interazioni e l'effetto indotto dal reefing artificiale sulle attività di pesca; durante gli studi, sono state condotte osservazioni subacquee mensili delle piattaforme californiane offshore dei giacimenti del *Rincon Oil Field* e del *Summerland Oil Field*. Dall'analisi è emerso come tali installazioni non rappresentino più un elemento estraneo e deleterio per la fauna marina, costituendo invece un elemento rafforzativo dell'habitat del fondale, ricco di biodiversità e colonizzato da diverse varietà di mitili e molluschi [72].

Uno dei punti più controversi della teoria delle barriere artificiali è la questione attrazione-produzione: le ipotesi di effetto produttivo considerano la struttura artificiale come un habitat addizionale, a supporto di quello naturale, provvedendo ad aumentare la capacità dell'ecosistema ed incentivando la crescita delle popolazioni ittiche; l'effetto attrattivo invece spiega il miglioramento faunistico attraverso l'effetto di richiamo che eserciterebbe la struttura nei confronti delle specie più affini a tali habitat, il che non comporterebbe tanto un effettivo incremento

della popolazione netta marina quanto una maggiore concentrazione locale [18]. Aspetto chiave per chiarire l'argomento sarebbe la determinazione delle tempistiche di affluenza e permanenza delle specie nel reef, prestando sempre attenzione al fatto che le due teorie potrebbero sovrapporsi in una certa misura, non essendo mutuamente esclusive.

Ulteriori indagini e studi hanno successivamente permesso di mettere a confronto le tecniche proprie di *artificial reefing* ed i risultati delle operazioni di *reefing* delle piattaforme petrolifere offshore, individuando una sostanziale differenza specialmente nelle dimensioni degli individui adulti riscontrata indipendentemente dalla specie. Questo tipo di studi ha dimostrato come l'utilizzo di strutture in qualità di barriere artificiali, anche derivante da operazioni di *decommissioning* delle piattaforme, può avere apprezzabili influenze nel favorire il ripopolamento delle specie maggiormente soggette a sovrapesca. La maggior preoccupazione, scongiurata da successive approfondite indagini chimiche nei siti pilota, riguardo tale pratica di *decommissioning* è legata all'eventuale contaminazione da parte di elementi tipici correlati all'attività estrattiva, come metalli pesanti ed altri composti, che possono portare all'indebolimento o rallentamento delle attività riproduttive.

Insieme agli impatti e alle conseguenze ecologiche dell'*artificial reefing* (Tabella 5.1), ormai note e sotto indagine, è importante considerare anche i danni ecosistemici legati alle operazioni necessarie alla messa in opera delle suddette barriere: mentre la rimozione completa delle strutture causerebbe la perdita totale della biomassa vertebrata ed invertebrata

associata alla struttura, la rimozione parziale permette di preservare fino al 90% della fauna preesistente, con la perdita sostanziale della popolazione residente nella parte superficiale, più soggetta ad operazioni di smantellamento o *toppling* [18].

Primary consideration	Attributes/potential indicators
Habitat and biodiversity values	Abundance Biomass Species richness Diversity Ecosystem engineers Functional groups (e.g., predators, herbivores) Trophic interactions/pathways Threatened endangered Species
Biomass production	Recruitment rates Growth rates Mortality Site fidelity
Regional ecology	Spatial configuration of habitats (natural and modified) and biodiversity Oceanographic regime Life-history information (e.g., reproductive mode, larval duration) Adult movement patterns
Conservation	Area protected from trawling Historical fishing patterns-practices
Energy, emissions, recycling	Direct energy use (e.g., vehicle movements) Indirect energy use - for recycling and replacement of material Emission factors - combination of fuel efficiency and engine design Landfill
Contamination (including biocontamination)	Resuspension of seabed contaminants Transport of seabed/structure contaminants Exotic/invasive species Disease Heavy metals/bioaccumulants
Temporal dynamics	Temporal changes in biological communities Integrity of structure over time

Tabella 5.1: *Indicatori di impatto per l'identificazione dei criteri ambientali per la valutazione di impatto delle attività di decommissioning [72].*

CAPITOLO 6

La Tecnologia di Accrescimento Minerale

Le tecnologie e soluzioni all'avanguardia per il riutilizzo ecosostenibile di piattaforme offshore prossime alla fine della loro fase produttiva, che permetterebbero di posticipare la fase di decommissioning, sono diverse; tuttavia, una sperimentazione degna di nota è rappresentata dall'applicazione della tecnologia Biorock: collaudata nel 1976, rappresenta una via di accrescimento minerale per la di produzione di materiali da costruzione in mare. Tale tecnologia è stata applicata con successo alla coltivazione di frangiflutti calcarei a protezione di isole e aree costiere, favorendo al tempo stesso la ripresa delle naturali barriere coralline ed ecosistemi, danneggiati dalla pressione antropica e dai cambiamenti climatici [73].

Già 500 barriere coralline Biorock sono state costruite in 40 paesi in tutto il mondo, principalmente in piccole isole [22].

La tecnologia di accrescimento minerale consiste nella precipitazione di minerali, come carbonati, indotta da un processo elettrolitico: in corrispondenza del catodo si ha la riduzione di O_2 e H_2O , con conseguente formazione di ioni idrossili. Tale condizione, alterando il valore del pH localmente nei pressi dell'elettrolita, altera l'equilibrio calcio-carbonico provocando la precipitazione di carbonato di calcio, in qualità di aragonite¹. Si noti che, nel caso in cui il pH interfacciale superi il valore di 9.1 - 9.3, può verificarsi la precipitazione anche di idrossido di magnesio $Mg(OH)_2$, in forma di brucite [22, 73]. A concludere il tutto, come reazione anodica, condotta da un elettrolita inerte di ioni Cl^- , avviene l'ossidazione degli anioni a cloro molecolare Cl_2 .

6.1 L'Elettrolisi

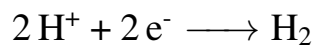
Prima di entrare nel merito della tecnica di depositi calcarei ed accrescimenti minerali, è doveroso effettuare alcune precisazioni sui fenomeni chimico-fisici che hanno luogo, chiamati reazioni elettrolitiche. L'elettrolisi è un processo elettrochimico che consiste nella produzione di trasformazioni chimiche di ossidoriduzione sotto la spinta dell'energia elettrica: si ha quindi la conversione dell'energia elettrica in energia chimica, costituendo a tutti gli effetti un processo inverso a quello che avviene nelle celle galvaniche (fig.6.1).

¹Nell'acqua di mare, in cui il rapporto Mg/Ca è di circa 6:1, l'aragonite è la forma privilegiata perché la presenza di ioni Mg^{2+} inibisce la formazione di calcite e favorisce la formazione di aragonite

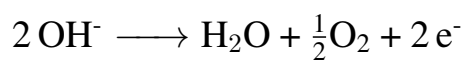
L'elettrolisi viene in genere condotta immergendo in soluzione acquosa due elettrodi, ai quali viene applicata una corrente elettrica. Gli elettrodi si suddividono, a seconda della carica portata, in anodo e catodo, il primo a carica positiva ed il secondo a carica negativa. Si noti che nell'ambito delle normali ossidoriduzioni, gli elettrodi hanno ruoli inversi: il catodo è l'elettrodo positivo ed attrae anioni e l'anodo attrae cationi; nel caso dell'elettrolisi si presenta tale inversione di funzione poiché avviene una riduzione forzata somministrando elettroni, causando di conseguenza l'inversione di carica agli elettrodi.

Si riporta, a titolo esemplificativo, le reazioni anodica e catodica che hanno luogo durante l'elettrolisi:

- Catodo



- Anodo



6.2. Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale

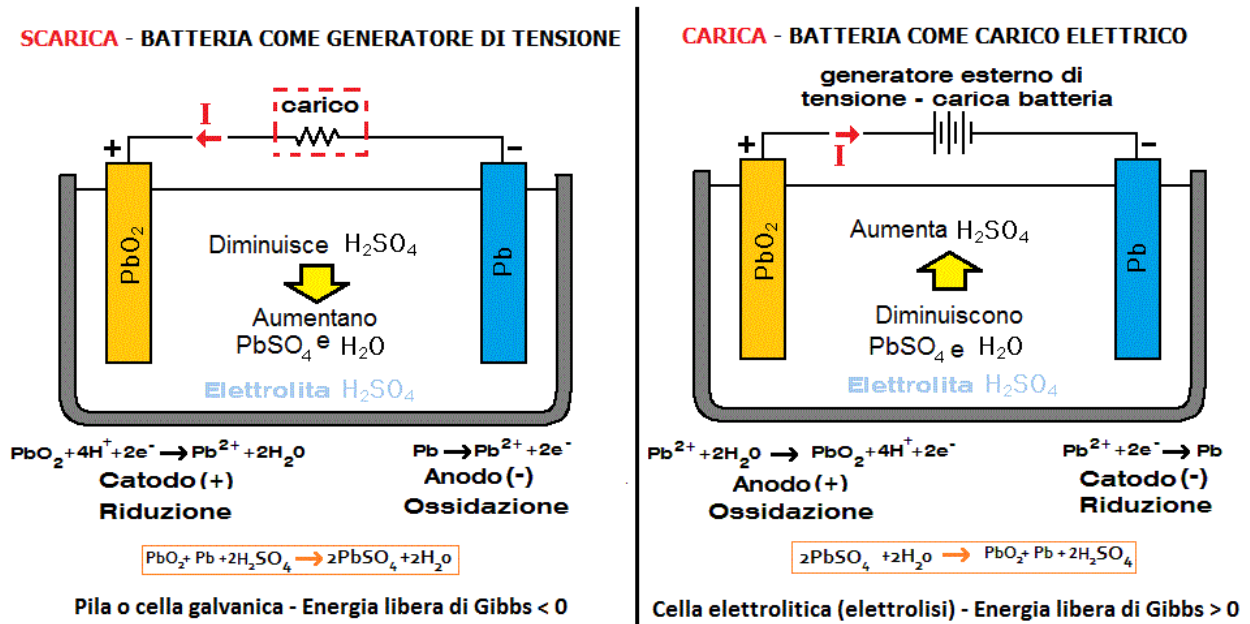


Figura 6.1: Confronto fra una cella galvanica, a destra, ed una cella elettrolitica, a sinistra. In questo caso i due elettrodi sono composti da piombo (Pb) e dal relativo ossido (PbO₂).

6.2 Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale

I depositi minerali sono un tema ben conosciuto nell'ambito dell'elettrochimica, oltre ad essere stato studiato anche come effetto collaterale derivante dalla protezione catodica delle strutture metalliche immerse in ambiente marino. La tecnica della protezione catodica venne studiata ed osservata per la prima volta nel 1824 quando venne scoperta la ridotta ossidazione del rame ad opera dell'acqua di mare, se a contatto con elementi di zinco o ferro, e la contestuale formazione superficiale di materiale solido, di origine calcarea dal colore bianco, identificati successivamente come carbonati di calcio e magnesio.

Le applicazioni di tale fenomeno vennero sviluppate solamente alla fine

6.2. Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale

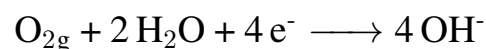
del 1970 quando, misurando le notevoli capacità strutturali di tali depositi, venne proposto il loro utilizzo in qualità di materiale edilizio: nacquero così il metodo Biorock, un sistema di accrescimento minerale a scopo protettivo contro l'ossidazione delle strutture metalliche, e Georail, che prevede l'utilizzo sedimenti, sabbie e carbonati naturali come surrogato cementizio in qualità di legante strutturale contro l'erosione delle coste e delle barriere naturali [22].

La tecnica di accrescimento minerale a scopo protettivo prevede la riduzione del potenziale elettrochimico del metallo al di sotto del campo ossidativo in modo da rendere tale fenomeno estremamente limitato, avendo trasformato l'elemento metallico da anodo, soggetto ad ossidazione, a catodo, operante la riduzione delle molecole di ossigeno o, in caso di potenziali catodici maggiori, di acqua.

- Reazione naturale di ossidazione del metallo, esplicitata come reazione anodica



- Reazione catodica di riduzione dell'ossigeno ed acqua



Come si può notare, le reazioni catodiche generano ioni idrossilici che alterano localmente il pH dell'acqua, incrementando il suo valore

6.2. Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale

all'interfaccia metallo/acqua, influenzando conseguentemente il delicato equilibrio calcio-carbonico naturale provocando la precipitazione di carbonato di calcio ed idrossido di magnesio, nel caso in cui il pH eccedesse il valore di 9.3, secondo le reazioni di seguito riportate:



Come mostrato in Tabella 6.1, la composizione del deposito minerale dipende in larga parte dal valore operativo del pH.

6.2. Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale

Compound	pH
Magnesite (MgCO_3)	7.7
Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)	9.5
Hydromagnesite ($\text{Mg}_4(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	8.2
Calcite (CaCO_3)	7.4
Aragonite (CaCO_3)	7.5
Slaked lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	12.7
Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	7.2

Tabella 6.1: *pH di saturazione dei diversi composti di calcio e magnesio in acqua di mare [22].*

Per quanto riguarda l'anodo, esso è costituito da un elettrodo inerte di ioni cloruro, ossidati a cloro molecolare

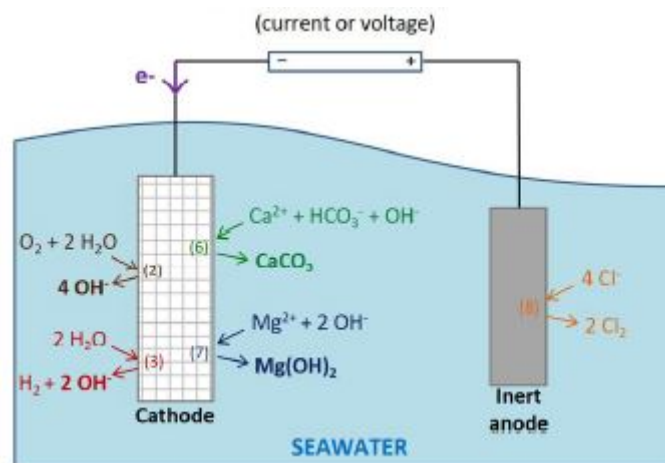
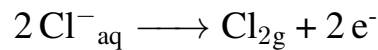


Figura 6.2: *Rappresentazione schematica delle reazioni elettrolitiche che avvengono presso anodo e catodo [22]*

Il carbonato di calcio, a seconda delle condizioni ambientali quali

6.2. Depositi Calcarei ed Accrescimento Minerale

temperatura e concentrazione di ioni, può presentarsi in diverse forme classificate in due gruppi: forme anidre come calcite, aragonite e vaterite, caratterizzate da una solida struttura cristallina, e forme idrate quali monoidrocalcite, esaidrocalcite e carbonato di calcio amorfo, più instabili dal punto di vista fisico. Si noti che la formazione di carbonati di tipo “idrocalcite” richiede la prevalente presenza di ioni magnesio in confronto a quelli calcio, con un valore del rapporto Ca/Mg di almeno 1:3, mentre generalmente nelle acque marine tale rapporto risulta essere di circa 5:1, condizione che privilegia la formazione di carbonati in qualità di aragonite, per temperature superiori a 6 C [22]. L'idrossido di magnesio invece solidifica solamente sotto forma di brucite, composto gelatinoso, dotato di scarsa capacità adesiva e per questo non rappresenta un agente di fouling nei confronti della superficie degli elettrodi [9].

CAPITOLO 7

RELife: Il Metodo

Le grandi sfide dello sviluppo energetico, economico ed ambientale con cui il settore della produzione energetica, in particolare quella di origine fossile, sarà costretta a confrontarsi direttamente nell'arco dei prossimi anni, comportano preferibilmente il riuso delle infrastrutture dedicate all'attività estrattiva, piuttosto che il riciclo e recupero dei materiali, come importante opzione di transizione energetica pulita. In conseguenza di ciò, le società petrolifere sono e saranno tenute a redigere un piano di dismissione conforme agli obiettivi di sviluppo sostenibile definiti dagli accordi internazionali. In quest'ottica il progetto RELife risponde all'esigenza degli *stakeholder* coinvolti di una valutazione tecnologica,

economica ed ambientale relativa alle diverse opzioni di *decommissioning*.

La metodologia di analisi proposta dal progetto RELife è stata applicata nell'articolo *Leporini et al, 2019* [53] a quattro casi reali di piattaforme offshore: due presenti nel Mare Adriatico e due nel Mare del Nord, confrontabili a due a due per conformazione e dimensioni.

I dati necessari per condurre l'analisi, quali peso della piattaforma, delle sue parti e la strumentazione presente sulle piattaforme offshore, sono stati desunti dalla letteratura presente.

La valutazione di impatto ambientale su cui si basa l'analisi, è stata effettuata prendendo in considerazione 15 categorie di impatto inerenti, a loro volta, a quattro principali macroaree: salute umana, ecosistemi, riscaldamento globale e sfruttamento delle risorse naturali.

Infine, i risultati ottenuti per ogni scenario sono stati confrontati tra loro e con i risultati associati al *decommissioning* classico¹, il tutto supportato da una solida valutazione economico-finanziaria attraverso la metodologia DCFA² [53].

Nonostante il progetto RELife sia stato adottato per due siti geografici distinti e basato su scenari di riconversione specificatamente scelti, la procedura di analisi può essere estesa e generalizzata a casi differenti, in modo da poter effettuare considerazioni analoghe, supportate da una metodologia assodata e consistente a quella dei casi differenti da quelli

¹Si considera che le operazioni di *standard decommissioning* abbiano come finalità sostanzialmente il riciclo e lo smaltimento in discarica dei materiali e dei macchinari rimossi.

²Discounted Cash Flow Analysis, si veda Capitolo 9

presentati.

Per poter sviluppare studi di questa natura, attraverso la metodologia RE-Life, gli autori suggeriscono di adottare la seguente prassi metodologica:

- Scelta dei siti e delle infrastrutture oggetto dello studio
- Definizione degli scenari tecnici di indagine
- Raccolta dei dati per l'analisi energetico-ambientale
- Raccolta dei dati per l'analisi economica
- Raccolta dei dati per lo scenario di *standard decommissioning*
- Sviluppo dei flussi energetici per ogni scenario
- Analisi ambientale: LCA
- Analisi economica: DCFA
- Discussione dei risultati e conclusioni

Le conclusioni dello studio devono consentire una valutazione d'insieme delle diverse operazioni legate a ciascuno scenario di decommissioning considerato, considerando gli aspetti tecnici, tecnologici ed ambientali, così come espressamente affermato nell'articolo *Leporini et al., 2019* [53]:

“[...] The RELife project for the reuse of offshore oil and gas platforms for the renewable energy production represents not only a way to lower the environmental impact of their

decommissioning phase but also an important business possibility. Therefore, a DCFA (Discounted Cash Flow Analysis) has been performed to assess the financial sustainability of the investigated scenarios [...]”

CAPITOLO 8

Analisi LCA: l'Analisi del Ciclo di Vita

La metodologia dell'Analisi del Ciclo di Vita o *Life Cycle Assessment* (LCA), viene regolamentata dagli standard internazionali ISO 14040 e 14044 e consente di valutare gli impatti ambientali di beni o servizi lungo il loro intero ciclo di vita, dalla fase di estrazione delle materie prime necessarie per la produzione dei materiali e dell'energia fino alla fase di fine vita.

L'utilizzo di tale metodologia permette di migliorare sistemi produttivi sia dal punto di vista dell'efficienza che dal punto di vista ambientale, evitando al contempo che la risoluzione di uno o più problemi relativi ad una fase del ciclo di vita porti ad un semplice trasferimento degli impatti

ad altre parti del ciclo, fenomeno noto come spostamento dei carichi ambientali o *shifting of burdens* [38].

Uno studio di LCA si articola in quattro fasi distinte:

1. *Goal and Scope Definition*: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio
2. *Life Cycle Inventory*: inventario del ciclo di vita
3. *Life Cycle Impact Assessment*: valutazione degli impatti
4. *Life Cycle Interpretation*: interpretazione dei risultati ed individuazione, attraverso appositi controlli e verifiche, dei punti più critici dell'analisi condotta permettendo, se necessario, di ricondurre la LCA sulla base delle correzioni apportate.

Alla luce di ciò, l'intero processo di analisi LCA assume le caratteristiche di un processo iterativo che richiede la mutua comunicazione tra le varie fasi (fig.8.1).

8.1. Goal and Scope Definition

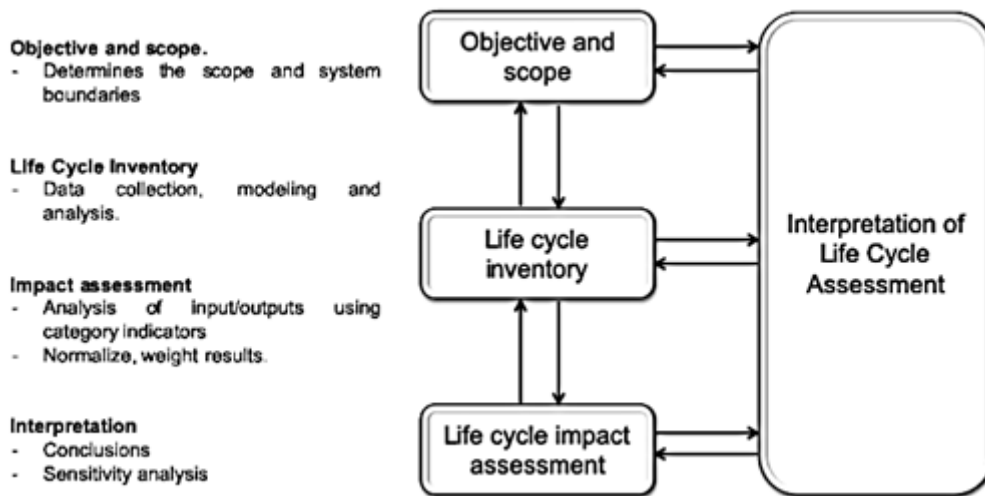


Figura 8.1: Rappresentazione schematica delle fasi di uno studio LCA

I risultati delle analisi sono presentati attraverso una serie di indicatori di impatto, in modo da valutare le ripercussioni ambientali del sistema di studio nella loro interezza: in tal senso la LCA utilizza un approccio multi-criterio.

8.1 Goal and Scope Definition

La *Goal and Scope Definition* è la prima fase dello studio LCA e ne influenza fortemente l'intero sviluppo. In questa fase è innanzitutto definito con chiarezza l'obiettivo dello studio e le ragioni che inducono a svilupparlo nonché il pubblico a cui esso è destinato. Nella *Goal Phase* viene dichiarato innanzitutto l'applicazione prevista e le ragioni che inducono a realizzare lo studio, oltre al pubblico di riferimento. Nella *Scope Phase* si individua il campo di applicazione, i confini del sistema in esame, l'unità funzionale, ovvero la quantità da utilizzare come riferimento dello studio a cui riferire gli elementi in ingresso e in uscita, oltre

ad informazioni tecniche quali la qualità dei dati, le ipotesi alla base dello studio, le problematiche e il tipo di dati da includere. In particolare, è essenziale che l'unità funzionale del sistema sia coerente con il *Goal and Scope* dello studio, individuando in modo chiaro e misurabile il riferimento per la quantificazione di tutti i dati di input e di output. È inoltre altrettanto necessario identificare e dichiarare i criteri usati per stabilire tali confini: la trasparenza è infatti un requisito fondamentale per qualsiasi analisi LCA.

Schematicamente in questa fase si individua l'ambito dell'analisi, definendo, tra gli altri:

- Il sistema oggetto dello studio
- La funzione ed i confini del sistema in esame
- L'unità funzionale¹ scelta
- Le procedure di allocazione dei carichi
- Le categorie di impatto ambientale scelte per la valutazione degli impatti
- La qualità dei dati, nonché le assunzioni, le problematiche e i limiti dello studio

Aspetto fondamentale è infine l'obiettivo dell'indagine LCA: il confronto tra due sistemi, fare riferimento ad uno standard predefinito, individuare le fasi critiche di un sistema o nella progettazione di un nuovo

¹L'unità funzionale rappresenta l'entità quantificata della funzione del sistema, a cui riferire tutti gli elementi ed i flussi

prodotto.

Più nello specifico, si possono distinguere tre differenti situazioni (fig.8.2):

- A. Lo studio di LCA verrà utilizzato come strumento di supporto alle decisioni relative al sistema in esame, ma la decisione che verrà presa non comporterà cambiamenti strutturali in altri sistemi. Lo studio è solitamente a breve/medio termine, su un orizzonte temporale di circa 5 anni, ed interessa una scala spaziale limitata e riguarda principalmente i prodotti
- B. Lo studio di LCA verrà utilizzato come strumento di supporto alle decisioni relative al sistema in esame e la decisione che verrà presa comporterà cambiamenti strutturali in altri sistemi. Lo studio è solitamente a medio/lungo termine, prevedendo un orizzonte temporale superiore a 5 anni, ed interessa un'ampia scala spaziale, prevedendo inoltre delle ricadute strategiche
- C. Lo studio di LCA è puramente di rendicontazione e non verrà utilizzato come strumento di supporto alle decisioni relative al sistema in esame. Si distingue tra gli studi che sono interessati ad includere i benefici che il sistema analizzato ha all'esterno di sé stesso (caso C1) e gli studi che hanno come obiettivo l'analisi del sistema in esame come isolato senza considerare alcuna interazione con l'esterno (caso C2)

8.1. Goal and Scope Definition

SUPPORTO ALLE DECISIONI?	SÌ	Entità delle conseguenze sugli altri sistemi	
		Nessuna o piccola	Grande
	Situazione A	Situazione B	
	NO	Situazione C (C1 se si includono le interazioni con altri sistemi; C2 se non si includono le interazioni con altri sistemi)	

Figura 8.2: Rapporto tra tipologia di studio ed ambito decisionale

È opportuno che la definizione della tipologia di studio avvenga fin dall'inizio in quanto ad essa sono associati diversi principi modellistici come anche diverse scelte metodologiche.

I principi modellistici risultano essere fondamentalmente due:

- Modellizzazione di tipo *attributional*: descrive il sistema così com'è, ipotizzando che esso sia inserito in una tecnosfera statica
- Modellizzazione di tipo *consequential*: descrive l'evoluzione del sistema in funzione delle decisioni analizzate, ipotizzando che esso sia inserito in una tecnosfera dinamica

In figura 8.3 viene mostrata la relazione esistente tra tipologia di studio e tipologia di modello.

Tipologia di studio	Tipologia di modello	Risoluzione casi di multi-funzionalità*
A	<i>Attributional</i>	Espansione dei confini del sistema modellizzata tramite il mix produttivo medio attuale
B	<i>Consequential</i>	Espansione dei confini del sistema modellizzata tramite il mix produttivo marginale a lungo termine
C1	<i>Attributional</i>	Espansione dei confini del sistema modellizzata tramite il mix produttivo medio attuale
C2	<i>Attributional</i>	Allocazione

Figura 8.3: Rapporto tra tipologia di studio e principi modellistici

8.1.1 La Multifunzionalità

Un aspetto estremamente rilevante è rappresentato dalla risoluzione della multi-funzionalità. Il problema della multi-funzionalità si presenta quando si hanno co-prodotti o riusi e ricircoli, ossia la formazione di due o più prodotti come output in un processo, che pone il problema di come suddividere tra i prodotti gli impatti causati dal processo. Le norme ISO stabiliscono che questi casi andrebbero evitati attraverso la suddivisione del sistema in tanti sottoprocessi, ognuno dei quali produce un singolo prodotto. Se ciò non è possibile, a seconda della tipologia di studio, si può procedere in uno dei seguenti modi:

- Espansione dei confini del sistema (fig8.4): ad esempio, se il sistema in esame produce i co-prodotti A e B e si è interessati agli impatti associati al solo ciclo di vita di A, è possibile espandere i confini del sistema includendo con segno opposto (ossia andando ad evitare e quindi a “sostituire”) un processo che provvede per altra via alla produzione di B

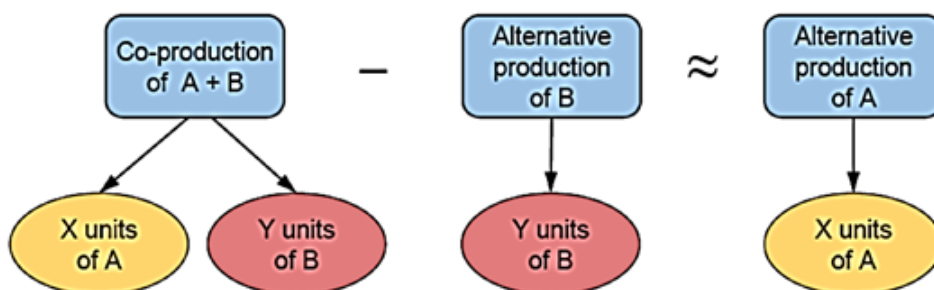


Figura 8.4: Esempio del processo di espansione per la soluzione della multifunzionalità [38].

- Allocazione (fig.8.5): ripartizione dei flussi in ingresso e in uscita del sistema in esame tra i diversi prodotti, basandosi su relazioni fisiche (che tengano conto ad esempio della massa o del contenuto energetico) o, qualora le relazioni fisiche non siano utilizzabili, basandosi su altre relazioni, ad esempio sul valore economico dei co-prodotti

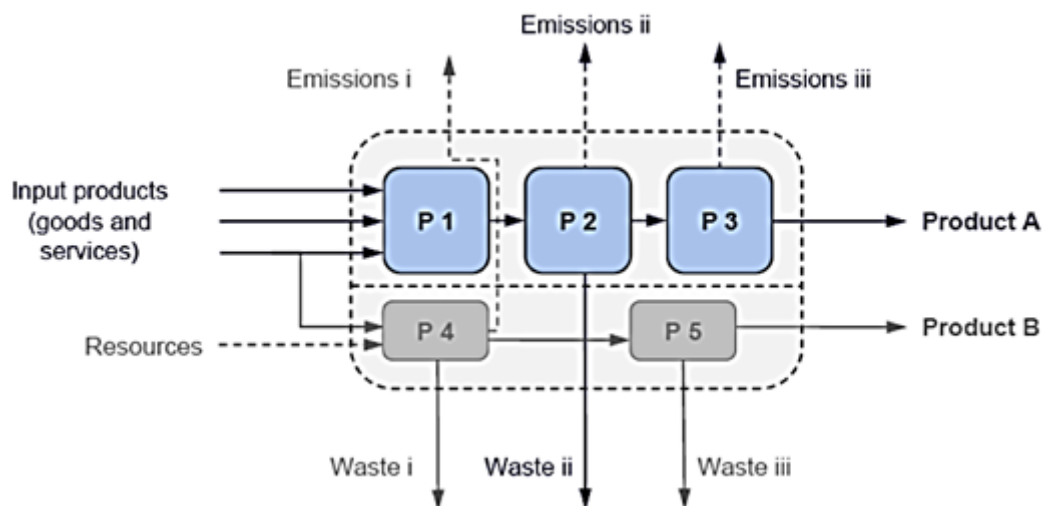


Figura 8.5: Esempio di allocazione per la soluzione della multifunzionalità [38].

8.1.2 Foreground e Background System

La definizione dei confini del sistema studiato, operazione che dipende dalle finalità della ricerca, è fondamentale in quanto incide sui risultati dello studio: studi sullo stesso sistema ma con confini diversi conducono a risultati differenti e non confrontabili. Tradizionalmente la valutazione include l'intero ciclo di vita “dalla culla alla tomba”, tuttavia è spesso specifica esigenza di chi commissiona l'analisi escludere già a priori lo studio di determinate fasi: tipiche sono le analisi “dall'ingresso dello

stabilimento alla tomba”, che partono dall’inizio del processo produttivo tralasciando le fasi di estrazione e lavorazione delle materie prime, o anche “dalla culla all’uscita dallo stabilimento”, se l’analisi viene interrotta al termine del processo produttivo.

Idealmente, la definizione dei confini del sistema di uno studio LCA dovrebbe essere effettuata in modo tale che i flussi che attraversano tali confini siano unicamente flussi elementari o il prodotto di riferimento.

All’interno dei confini dello studio, si individuano due sistemi in interazione tra loro: sistema di *foreground* e sistema di *background* (fig.8.6).

In base ai principi di specificità e controllo, si definisce:

- Sistema di *foreground*: l’insieme dei processi propri del sistema oggetto dello studio e direttamente controllati dagli stakeholder coinvolti nello studio. Essendo il fulcro dell’analisi LCA, per questo sistema è richiesta elevata precisione e qualità dei dati
- Sistema di *background*: l’insieme dei processi di contorno rispetto al sistema in studio e non influenzabili direttamente dagli stakeholder coinvolti nello studio. La richiesta qualitativa dei dati del sistema di background è meno stringente rispetto a quello di *foreground*, risultando spesso sufficienti riferimenti generici o dati medi

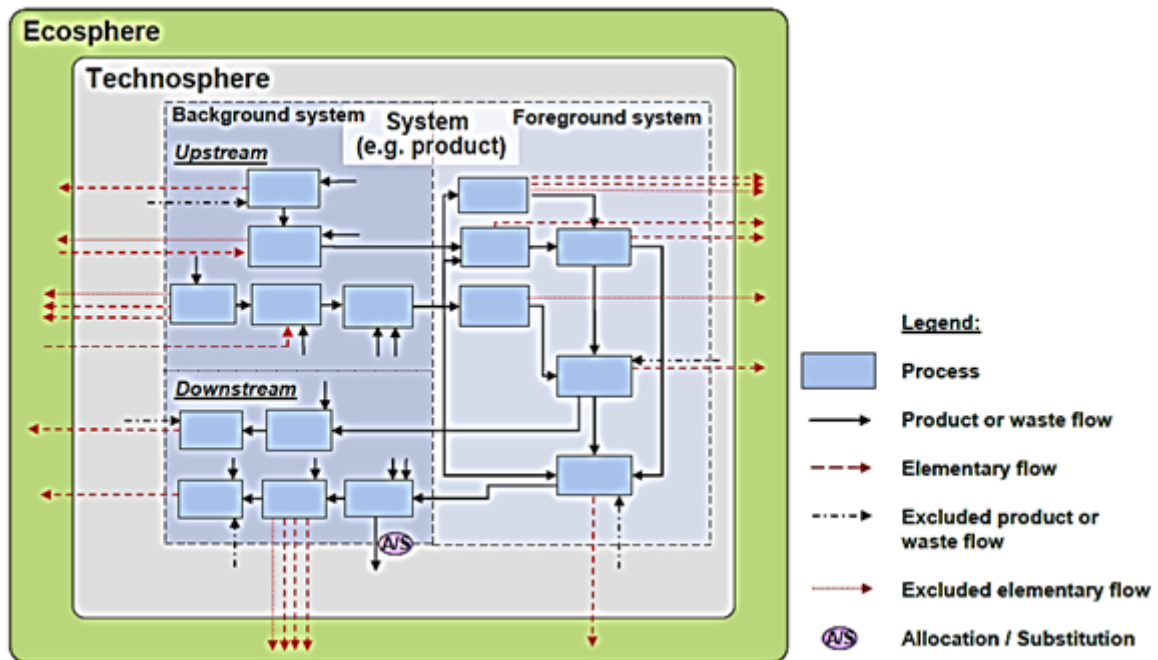


Figura 8.6: Rappresentazione schematica dei confini di sistema di un ipotetico studio LCA [38]

8.1.3 Unità Funzionale e Qualità dei Dati

L'unità funzionale rappresenta l'unità di misura di riferimento, a cui legare i flussi in entrata ed in uscita, intesa come un indice delle prestazioni svolte dal sistema ovvero del servizio reso all'utilizzatore. La scelta di tale unità deve essere coerente con l'obiettivo dello studio ed individuare in modo chiaro e misurabile il riferimento per la quantificazione di tutti i dati di input e di output: essa dipende essenzialmente dallo scopo della valutazione in quanto, assumere una certa unità funzionale, significa normalizzare il sistema studiato rispetto ad una determinata funzione.

I dati raccolti possono essere distinti in tre categorie: dati primari (provenienti da rilevamenti diretti), dati secondari (ricavati dalla letteratura,

come banche dati e altri studi), dati terziari (provenienti da stime e da valori medi). Per quanto possibile, i dati da utilizzare nella fase di inventario devono essere raccolti direttamente sul campo.

Per quanto riguarda i requisiti di qualità dei dati, questi dovrebbero comprendere:

- Le fonti di dati e la loro rappresentatività
- I fattori relativi al tempo, alla geografia e alla tecnologia
- La precisione, completezza e rappresentatività dei dati
- L'incertezza dell'informazione

Si noti che negli studi comparativi, prima di interpretare i risultati, deve essere valutata l'equivalenza dei sistemi posti a confronto: tali sistemi devono essere valutati utilizzando la medesima unità funzionale e considerazioni metodologiche equivalenti, quali i confini del sistema, qualità dei dati, procedure di allocazione, modalità di decisione sui flussi in entrata ed in uscita e le procedure di valutazione degli impatti.

8.2 *Life Cycle Inventory*

La Life Cycle Inventory è la seconda fase di uno studio LCA. In questa sede si delinea una modellizzazione della realtà dello studio, identificando e quantificando inoltre tutti i flussi di input e output dei processi rientranti nei confini del sistema.

Il risultato è un inventario ed un diagramma di flusso relativi a tutto il ciclo di vita, carichi ambientali compresi. I carichi ambientali sono distinti in:

- Diretti, se sono connessi immediatamente alle attività del sistema in esame
- Indiretti, se provengono dai processi di produzione, trasporto ed utilizzo di tutto quanto (materia e/o energia) necessita alla funzione del sistema in esame
- Evitati, se connessi al risparmio di materiali ed energia legati alla attività in esame

La banca dati dei carichi ambientali è sviluppata attraverso la definizione e la quantificazione dei flussi di materia e di energia in entrata al sistema e quelli relativi alle emissioni, ai rifiuti e ad altri carichi ambientali in uscita (rumore, calore disperso, occupazione di territorio, ecc.), tenendo in conto l'intero arco del ciclo di vita del sistema in esame.

I risultati della LCI devono essere sempre interpretati sulla base dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio. Tale interpretazione può includere una valutazione della qualità dei dati ed un'analisi di sensibilità dei più significativi input e output.

8.3 *Life Cycle Impact Assessment*

La Life Cycle Impact Assessment è la terza fase dello studio LCA e consiste nella valutazione dell'importanza dei potenziali effetti ambientali lungo provocati dall'attività esaminata, sulla base dei dati raccolti ed inventariati nella fase precedente.

L'obiettivo di questa fase è quello di esprimere i risultati dell'inventario in modo da collegarli ragionevolmente con i vari tipi di effetti ambientali indesiderati, attraverso un'operazione di raggruppamento e classificazione in categorie di impatto in modo da poter valutare il contributo potenziale di ogni emissione (fig.8.7). Tale fase è composta da più step, secondo la norma ISO 14044 alcune obbligatorie ed altre opzionali:

- Scelta delle categorie di impatto, degli indicatori e dei modelli di caratterizzazione (obbligatoria)
- Classificazione, ovvero l'operazione che permette l'assegnazione dei risultati della fase di inventario agli impatti prescelti, rappresentati dalle categorie di impatto (obbligatoria)
- Caratterizzazione, operazione che permette il calcolo dell'effetto totale dalla sommatoria dei singoli effetti potenziali pesati grazie ad un fattore di conversione specifico, calcolato sulla base del modello di caratterizzazione adottato (obbligatoria)
- Normalizzazione dei risultati, con lo scopo di ottenere degli indici sintetici con cui valutare il sistema in esame nel suo complesso. La

8.3. Life Cycle Impact Assessment

normalizzazione può avvenire ad esempio sulla base del carico pro capite (opzionale)

- Raggruppamento delle categorie di impatto in gruppi omogenei dalla definizione soggettiva, definita attraverso una scala prioritaria o spaziale (opzionale)
- Pesatura degli impatti risultanti dalle diverse categorie di impatto, con l'obiettivo di giungere ad un punteggio unico finale di impatto. Come per l'operazione di normalizzazione, i pesi scelti possono essere di natura soggettiva, pur se legati a grandezze fisiche quali la distanza da un valore limite o la monetizzazione dell'impatto conseguente (opzionale)

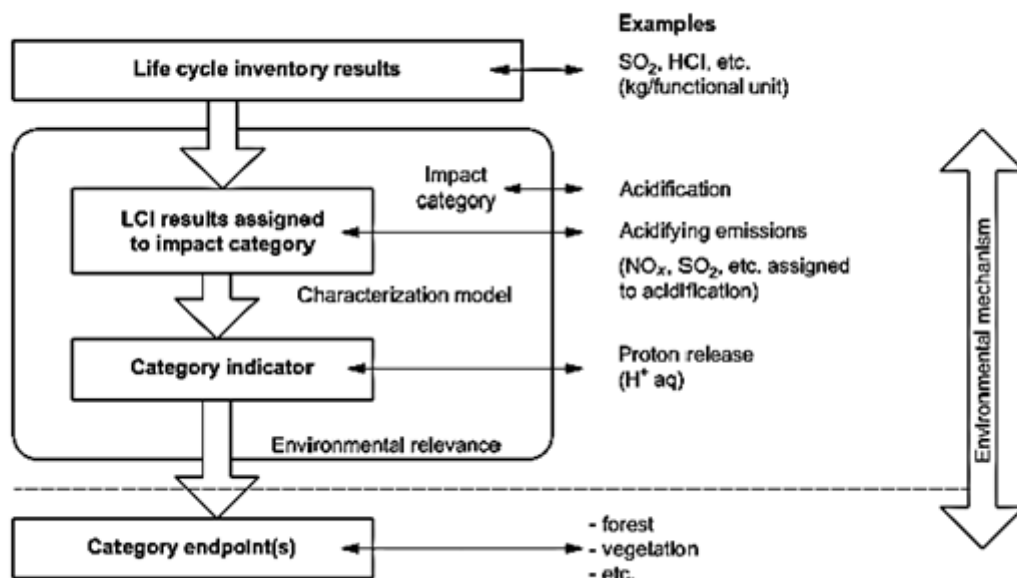


Figura 8.7: Focus sulla fase di valutazione degli impatti

8.3. Life Cycle Impact Assessment

La selezione delle categorie di impatto deve considerare gli obiettivi dello studio e le ipotesi fatte nel corso della fase di inventario, così come anche quelle per la selezione delle categorie di impatto, degli indicatori e dei metodi di caratterizzazione.

Una volta scelta una certa categoria di impatto, si deve anche scegliere l'indicatore con cui rappresentarla, anche se la scelta risulta guidata dal metodo adottato.

Le categorie di impatto, generalmente, sono riconducibili a quattro grandi aree: utilizzo di risorse naturali (*resource depletion*), effetti sulla salute dell'uomo (*human health and safety effects*), effetti sull'ecosistema (*ecological effects*) ed effetto serra (*climate change*).

Ciascun effetto ha un'interazione con l'ambiente rapportabile a diverse scale geografiche, che potrebbero essere utilizzate per un'ulteriore classificazione delle categorie di impatto:

- Globale: effetto serra, assottigliamento della fascia di ozono
- Regionale: acidificazione, eutrofizzazione, formazione di smog fotochimico
- Locale: formazione di smog fotochimico, consumo di territorio

Esistono diverse categorie di impatto che possono essere o meno tutte prese in considerazione in uno studio LCA. A ciascuna di queste categorie si collegano gli impatti ambientali che vengono quantificati attraverso gli indicatori di categoria.

Esistono due principali gruppi di scelta per gli indicatori (fig.8.8):

8.3. Life Cycle Impact Assessment

- *Midpoint - oriented*, che posizionano gli indicatori relativamente vicino al carico. Sono punti della catena causa-effetto in posizione intermedia tra i flussi elementari (i risultati della LCI) e i danni arrecati (salute umana, qualità dell'ecosistema, consumi di risorse, cambiamenti climatici), in corrispondenza dei quali i fattori di caratterizzazione possono essere calcolati per descrivere l'importanza relativa di un carico ambientale (ad es. aumento della temperatura terrestre oppure accresciuta radiazione UV a causa dell'assottigliamento della fascia di ozono stratosferico). Hanno il vantaggio di fare riferimento principalmente ad informazioni scientifiche e ad evidenze ben provate, seppure le ricerche inerenti tali campi sono in continua evoluzione; il livello di soggettività e incertezza è limitato
- *Endpoint - oriented*, che posizionano gli indicatori relativamente vicino agli obiettivi finali, alla fine delle catene causa-effetto, e sono definiti come problematiche di diretto interesse della società, cioè categorie di danno, quali salute umana, qualità dell'ecosistema, risorse naturali, cambiamento climatico (ad es., numero di specie viventi morte per il cambiamento climatico, oppure numero di persone morte per cancro alla pelle). Hanno il vantaggio di presentare le informazioni in modo chiaro e facilmente comprensibile; il livello di soggettività e incertezza è elevato

8.4. Life Cycle Interpretation

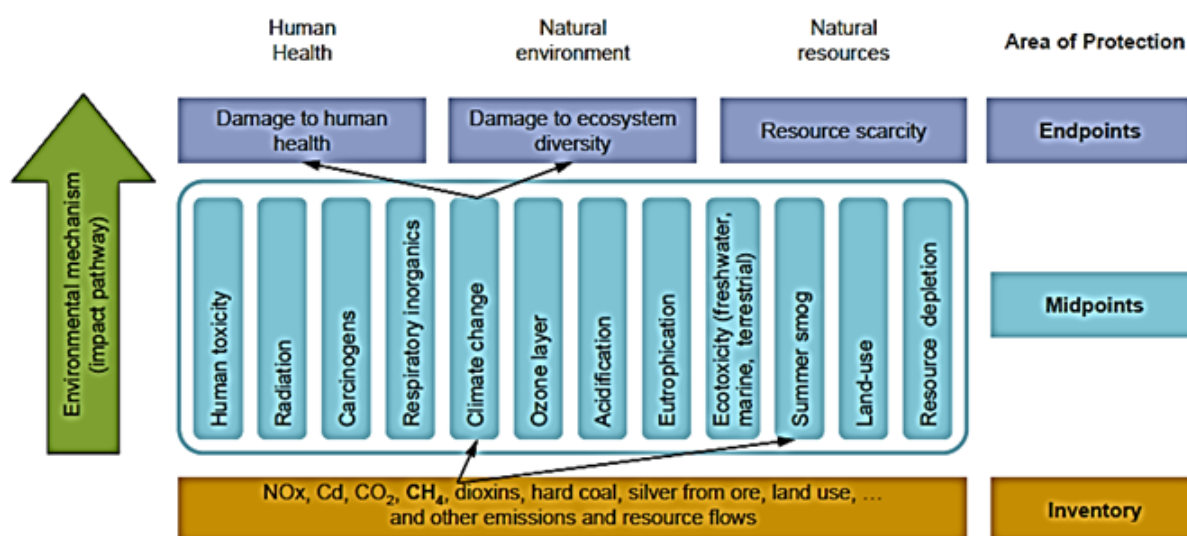


Figura 8.8: *Suddivisione delle categorie di impatto in base al loro effetto ed alla distanza emissione-impatto*

Sebbene la procedura ideale sarebbe quella di ridefinire le categorie di impatto *ad hoc* per ogni studio di LCA, per rendere i risultati confrontabili internazionalmente ed accorciare i tempi di redazione dello studio, spesso ci si basa su metodi di caratterizzazione, indicatori e categorie di impatto già sviluppati ed utilizzati, per i quali ne è riconosciuta la fondatezza e correttezza. È opportuno, comunque, che ognuno scelga il metodo più adatto al proprio studio in base agli obiettivi dello studio, al pubblico a cui esso si rivolge e l'attinenza al contesto di riferimento.

8.4 Life Cycle Interpretation

La parte conclusiva della valutazione del ciclo di vita è definita dall'analisi ed interpretazione dei risultati ottenuti nelle fasi precedenti. In questa fase vengono sviluppate analisi critiche dei risultati al fine di trarre delle conclusioni e fornire raccomandazioni per il miglioramento delle presta

8.4. Life Cycle Interpretation

zioni ambientali del sistema analizzato, in armonia con i contenuti della *goal and scope definition*. Solitamente questa fase consente di individuare e apportare puntuali modifiche oppure l'adozione di opportune azioni necessarie alla riprogettazione dell'intero sistema. L'analisi dei contributi permette di individuare, a valle della fase di valutazione, quali siano le attività rivestono un ruolo rilevante nella determinazione dell'impatto complessivo del sistema in studio. Grazie a queste informazioni, risulta possibile definire i processi per cui è essenziale garantire precisione e correttezza delle informazioni collezionate in fase di inventario.

Prima di formulare conclusioni e fornire raccomandazioni è comunque necessario effettuare dei controlli, in particolare il controllo di completezza, il controllo di sensibilità e il controllo di coerenza, così come anche una valutazione dell'incertezza (fig.8.9).

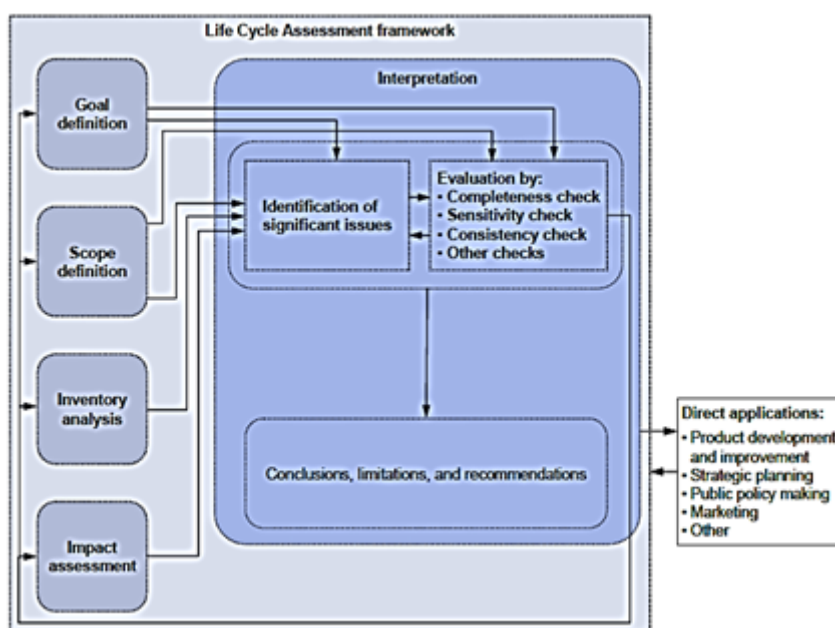


Figura 8.9: Focus sulla fase di interpretazione dei risultati.

Le verifiche effettuate sullo studio condotto sono sostanzialmente tre:

- Controllo di Completezza (*Completeness Check*), in modo da definire il grado di completezza dell'inventario
- Controllo di Sensibilità (*Sensitivity Check*), per determinare l'affidabilità dello studio e le sue conclusioni
- Controllo di Coerenza (*Consistency Check*), in modo da valutare la coerenza interna dello studio, tra le assunzioni, metodi e dati utilizzati

CAPITOLO 9

Analisi DCFA: l'Analisi del Flusso di Cassa Attualizzato

L'analisi del flusso di cassa attualizzato o DCFA¹, solitamente rientra nei metodi finanziari per la valutazione aziendale: tali metodi sono ritenuti i più razionali ai fini della valutazione in campo aziendale, in quanto fanno propria la logica con cui vengono “prezzate” le attività finanziarie. La *Discounted Cash Flow Analysis* determina quindi il valore di una azienda o di un'operazione finanziaria sulla base del valore attuale dei flussi di cassa che la medesima si presume possa generare negli esercizi

¹*Discounted Cash Flow Analysis*

futuri. Pregio di tali metodi è quello di evidenziare la capacità di mettere a disposizione degli investitori quei flussi monetari che residuano dopo aver effettuato gli investimenti in capitale circolante e attività fisse necessari per garantire il perdurare della medesima in condizioni di economicità. In generale il metodo si basa sulla seguente prassi matematica, con lo scopo ultimo di determinare il valore degli indici² di appetibilità dell'investimento:

1. Calcolo del costo annuo totale C_t

$$C_t = C_{ft} + C_{OM}$$

dove C_{ft} rappresenta il costo annuo di carburante e C_{OM} il costo operativo di mantenimento

2. Calcolo del ricavo annuo operativo OI

$$OI = R_t - C_t$$

dove R_t rappresenta il ricavo annuo

3. Calcolo dei costi ammortizzati annui A_k ³

$$A_k = \frac{C_c}{P_{amm}}$$

dove C_c rappresenta il capitale investito e P_{amm} il periodo di ammortamento

4. Calcolo del ricavo annuo netto NI

²In particolare DCF, NPV e IRR

³Ci si riferisce in questo caso ai costi ammortizzati al k-esimo anno

$$NI = OI - (OI - A_k) \cdot t$$

dove $OI - A_k$ rappresenta i ricavi operativi e t il carico fiscale a cui essi sono soggetti

5. Calcolo degli indici di appetibilità DCF⁴, NPV⁵ e IRR⁶

$$DCF_k = \frac{NI_k}{(1 + i)^k}$$

dove l'esponente k è il periodo e i rappresenta il tasso corretto per il rischio relativo all'operazione in oggetto

$$NPV = -C_c + \sum_{n=1}^k DCF_n$$

Nell'ambito di questo elaborato l'indice IRR non verrà valutato, prediligendo gli indici DCF e NPV.

Oltre agli indici sopra elencati, altri parametri da tenere in considerazione nella valutazione economico-finanziaria di un investimento sono:

- **CAPEX:** spese in conto capitale, sono gli investimenti per tutte le attività utilizzate per generare entrate e migliorare la capacità di generare ricchezza (macchinari, attrezzature,...)

⁴Il *Discounted Cash Flow* o flusso di cassa attualizzato è un metodo di valutazione della qualità di un investimento, basato sull'attualizzazione dei flussi futuri attesi derivanti da tale operazione

⁵Il *Net Present Value* o valore attuale netto è il valore attualizzato dell'investimento, valutato attualizzando la sommatoria di tutti i flussi di cassa da esso derivanti

⁶L'*Internal Rate of Return* o tasso interno di rendimento è il tasso della legge esponenziale che rende equa un'attività finanziaria. In un senso il tasso i rappresenta il costo massimo finanziario che l'azienda può assumere in relazione a un determinato progetto. Il tasso interno di rendimento non può essere calcolato direttamente, ma si deve risolvere ricorsivamente attraverso un'equazione polinomiale. Un progetto di investimento risulta appetibile se l'IRR risulti superiore al tasso di rendimento normalmente ottenuto dall'azienda.

-
- OPEX: spese operative, sono le spese sostenute per la gestione e manutenzione delle attività che generano ricavi (amministrazione, ricerca, progettazione,...)
 - PBP⁷: periodo di rimborso, il tempo necessario per ammortizzare l'investimento. È indice dell'appetibilità dell'operazione

⁷*PayBack Period*

Parte II

Lo Studio

Lo studio di valutazione dei progetti di *decommissioning* piattaforma-stico ha come obiettivo ultimo la produzione di un'analisi preliminare di valutazione degli impatti correlati alle operazioni di rimozione totale della piattaforma, proponendo infine una soluzione per il riutilizzo alternativo in veste di stazione di osservazione dell'ecosistema marino, adibendo inoltre la sezione sommersa della piattaforma ad *artificial reef*, implementando la tecnologia di accrescimento minerale come opportunità di miglior inserimento ambientale ed estensione della vita utile della rinnovata infrastruttura [73].

L'indagine nel suo complesso intende cogliere gli aspetti legati sia alla prestazione ambientale del progetto sia la valutazione finanziaria che comporterebbe la realizzazione del progetto alternativo, proponendo in questo modo un quadro completo a supporto della fase decisionale: aspetto fondamentale è fornire allo studio il miglior grado di trasparenza, in modo da garantirne la riproducibilità e facilitarne il controllo.

CAPITOLO *10*

Materiali e Metodi

10.1 Inquadramento dello Studio

Il presente elaborato prende spunto dalle progettualità inserite nell'iniziativa PlaCE, progetto di natura nazionale volto all'esplorazione di tecnologie e soluzioni innovative d'avanguardia per il riutilizzo ecosostenibile di piattaforme offshore. Le soluzioni prese in considerazione nell'ambito del progetto PlaCE includono tecniche di acquacoltura integrata, sistemi integrati di generazione e gestione delle energie rinnovabili, sistemi di supporto per la valutazione di sostenibilità delle attività delle piattaforme ed infine la tecnica di accrescimento minerale. La sperimen-

10.1. Inquadramento dello Studio

tazione si svolge con l'installazione di strutture prototipali sperimentali sia nell'area della piattaforma offshore "Viviana 1" sita nel Mare Adriatico, proprietà del gruppo Eni S.p.A, principale partner del progetto: "Viviana 1" (fig.10.1) è una struttura in via di dismissione di tipo monotubolare, dalla profondità di circa 20 m, localizzata a 9 km di distanza dalla costa abruzzese (fig.10.2).

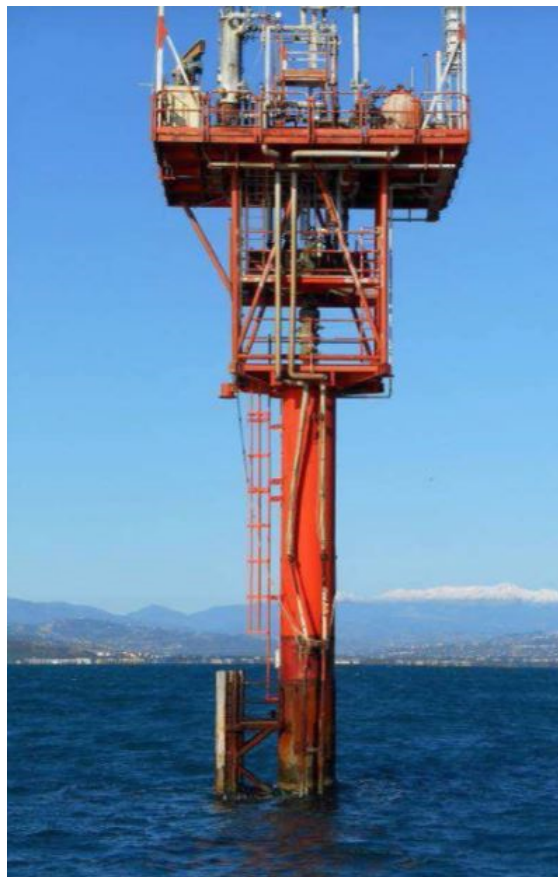


Figura 10.1: *Piattaforma "Viviana 1"*

10.1. Inquadramento dello Studio

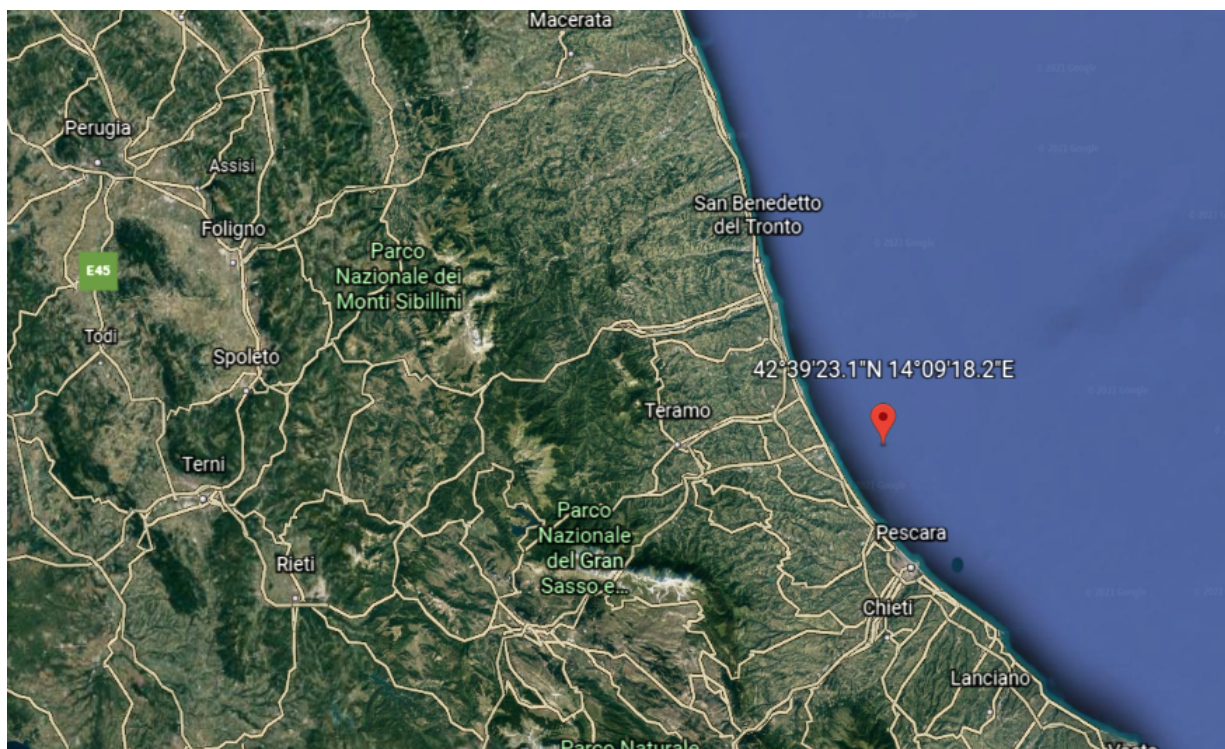


Figura 10.2: Localizzazione geografica della piattaforma "Viviana 1" e sede dello studio

Tuttavia, a causa della totale mancanza di informazioni o documenti progettuali da cui poter desumere la conformazione della struttura e di conseguenza inventariare i materiali di cui si compone la piattaforma, lo studio è stato effettuato considerando il medesimo sito ma utilizzando le informazioni disponibili relative alla piattaforma "Ada 3" in sostituzione a "Viviana 1" (fig.10.3)), per la migliore qualità e reperibilità dei dati. Si considera lecita tale sostituzione in virtù dell'elevata somiglianza tra le due infrastrutture: "Ada 3" è una piattaforma offshore dall'altezza complessiva di 32 m dal fondale, costituita da un unico pozzo monotubolare dal diametro compreso variabile tra 1500 e 2500 mm al cui interno risiede il tubo guida, dal diametro di 762 mm, che prosegue al di sotto

della mudline per altri 16 m. Essendo priva di un vero e proprio *deck*, la parte superficiale risulta costituita solamente da un imbarcadero per consentire le operazioni di base. Sono inoltre presenti 13 anodi ubicati sul tubo esterno, mentre non sono presenti sovrastrutture, condotte di collegamento con altre strutture, apparecchiature e macchinari. [37]

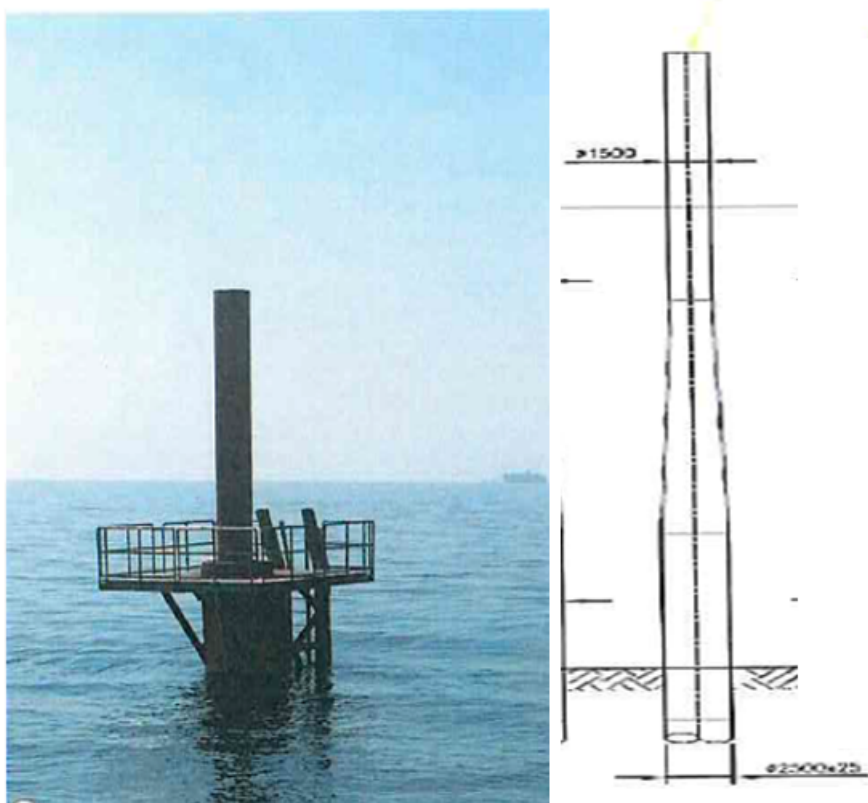


Figura 10.3: Piattaforma "Ada 3"

10.1.1 Rimozione Totale della Piattaforma

Lo scenario preso in considerazione è quello della rimozione totale, operazione che la normativa nazionale ed internazionale¹ individua come prassi standard in materia di *decommissioning* di piattaforme *offshore*.

¹Si faccia riferimento al Capitolo 3

10.1. Inquadramento dello Studio

Generalmente, le operazioni di rimozione completa della struttura comprendono la fase preparatoria di rimozione dell'equipaggiamento, chiusura dei pozzi e pulitura dei punti di taglio del *jacket*; la fase di taglio in primis del *deck* e successivamente del *jacket*, con relativo trasporto, scarico in cantiere, separazione dei materiali riciclabili e smaltimento della restante parte; fase di *post-decommissioning* con rimozione delle condotte di collegamento e relativo trasposto, scarico in cantiere, separazione dei materiali riciclabili e smaltimento dei residui.

Essendo la piattaforma in questione di tipo monotubolare e sprovvista di un deck articolato e condotte, le operazioni di rimozione risultano notevolmente semplificate, comprendendo sostanzialmente:

- pulitura dei punti di taglio;
- taglio e rimozione del *jacket*;
- trasporto in cantiere;
- separazione dei materiali riciclabili da quelli non riciclabili;
- smaltimento dei materiali non riciclabili;
- recupero dei materiali riciclabili.

Successivamente alle operazioni di rimozione si considera l'avvio della struttura al processo di riciclo dell'acciaio di cui è composta, rispondente alle recenti prescrizioni verso un sistema economico-produttivo di tipo circolare.

10.2 Analisi LCA

10.2.1 Goal and Scope Definition

Come riportato in precedenza, in questa fase vengono definiti con chiarezza l'obiettivo dello studio e le ragioni che inducono a svilupparlo.

La presente analisi viene condotta con l'obiettivo di proporre una valutazione degli impatti correlati alle operazioni di taglio, trasporto, smaltimento e riciclo legati allo *standard decommissioning* della piattaforma, comprendendo quelli evitati relativi alla produzione di acciaio primario. Lo studio LCA risulta, in sintesi, a servizio di una successiva valutazione complessivamente indirizzata ai decisori politici, agli organi regionali e statali di competenza nonché agli *stakeholders* coinvolti nelle procedure valutativo-decisionali riguardo il destino della piattaforma oggetto dello studio.

Il sistema di studio è rappresentato in figura, adottando come unità funzionale la gestione della singola tonnellata di piattaforma dismessa.

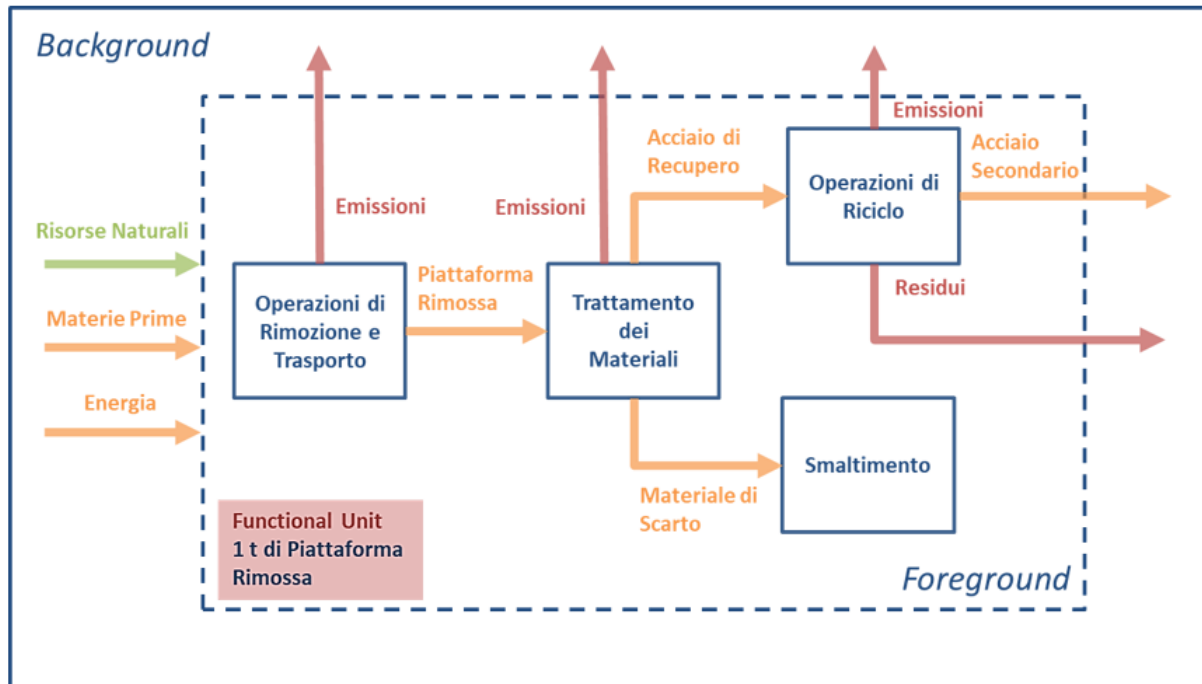


Figura 10.4: Rappresentazione schematica del sistema di processo legato alla produzione dell'acciaio a partire dal rottame

Come rappresentato in figura 10.4, il sistema si compone delle attività di *decommissioning* a cui si aggiunge la filiera per il riciclo dell'acciaio contenuto all'interno della struttura rimossa; vengono infine considerati anche gli impatti di produzione di acciaio primario evitati proprio grazie al riciclo dell'acciaio ottenuto dalla separazione dei materiali, supponendo che i residui non ferrosi vengano inviati a smaltimento finale. Si riporta in figura 10.5 il sistema di produzione dell'acciaio primario così come descritto al Capitolo 4.

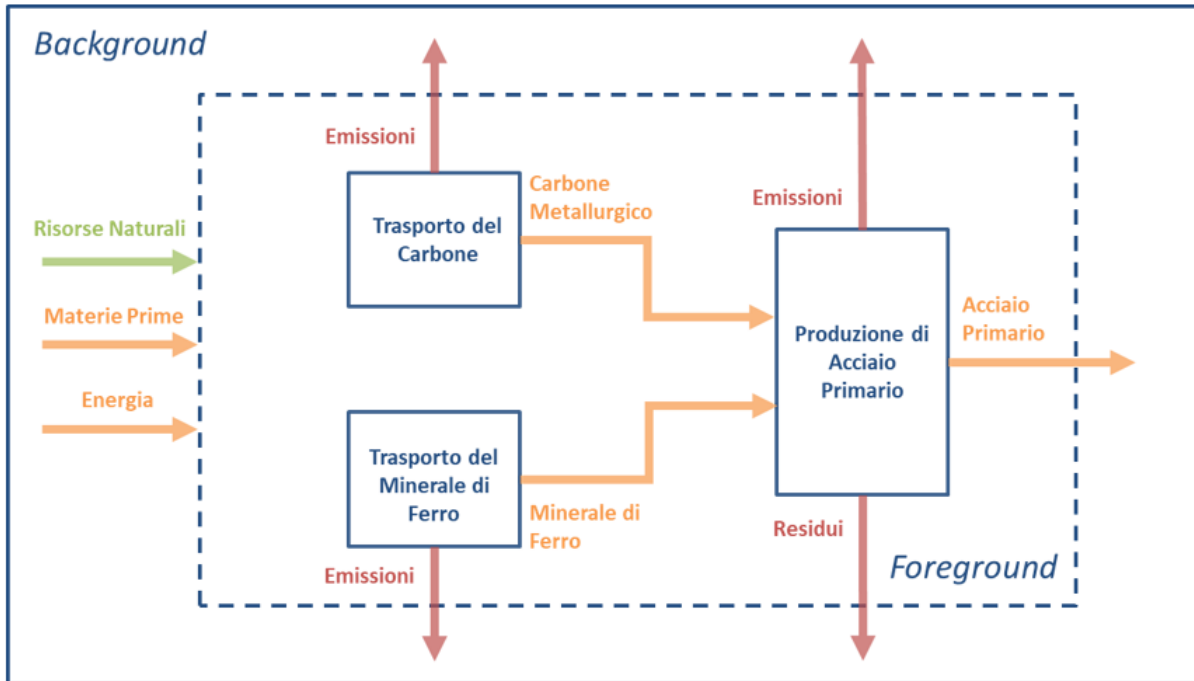


Figura 10.5: Rappresentazione schematica del sistema di processo legato alla produzione a ciclo integrale dell'acciaio a partire dal minerale di ferro

A questo proposito, assumono estrema importanza le ipotesi effettuate sulla localizzazione a Pescara, nei pressi del cantiere navale di scarico della piattaforma, degli impianti di fusione del rottame e di produzione dell'acciaio vergine, come anche la scelta di destinare a discarica i residui della struttura diversi dall'acciaio [23], esistendo anche per questi una filiera di riciclo che ne permetterebbe il reimpiego.

Coerentemente con quanto descritto nel compendio teorico dell'elaborato, per le caratteristiche del problema e dei sistemi in esame, lo studio condotto ricade nella tipologia A, la quale prevede una risoluzione della multifunzionalità attraverso l'espansione dei confini di sistema e l'adozione di un sistema modellistico di tipo attributivo [43].

Le fonti sulla base delle quali è stato effettuato il presente studio sono

rappresentate da studi scientifici validati e revisionati, pubblicati a nome di riviste note in ambito tecnico-scientifico. Nella tabella 10.1 si riportano i titoli, l'editore e l'ambito degli studi utilizzati come fonte.

Tabella 10.1: *Tabella lunga e larga*

	Produzione Metallo Primario	Produzione Metallo Secondario	Materie Prime	Emissioni da Mezzi Navali	Decommissioning	Trattamento Materiale di Risulta
Burchart- Korol, 2013 [20]	✓	✓				
Liang et al, 2020 [55]	✓	✓				
Renzulli et al, 2016 [69]	✓					
Remus et al, 2013 [68]	✓	✓				
DGISSEG: La Situazio- ne Energeti- ca Naziona- le nel 2019 [60]			✓			
EMEP/EEA guidebook 2019 [66]				✓		
European Com- mission, 2002 [39]				✓		
ENI S.p.A, 2019 [37]					✓	
Borghi et al, 2018 [14]						✓

Per l'esecuzione computazionale dello studio è stato utilizzato il software OpenLCA, adottando per il sistema di background i dati presenti all'interno del database ELCD², prodotto dal JRC e dotato di consolidata qualità e consistenza metodologica, mentre per quanto riguarda la caratterizzazione degli impatti sono state considerate le categorie di impatto presenti nel metodo ILCD2011³ denominate "*Climate Change*", "*Human Toxicity, Cancer Effects*", "*Land Use*", "*Marine Eutrophication*", "*Particulate Matter*", "*Water Resource Depletion*". La peculiarità di tale metodo di caratterizzazione è rappresentata dal fatto che è stato realizzato prendendo in considerazione svariate metodologie di impatto esistenti in modo da stabilire uno standard univoco in base all'affidabilità dei modelli su cui ognuno di essi si basa.

Per quanto detto finora, l'analisi così condotta presenta oggettivi ed inequivocabili limiti, di seguito discussi, la cui identificazione e superamento permetterà di migliorarne la qualità dei risultati e la relativa attinenza alla realtà.

Primo fra tutti è la lacunosa presenza di informazioni dettagliate riguardo la piattaforma "Viviana 1" oggetto di studio, aspetto che ha comportato il ricorso alla documentazione relativa alla piattaforma "Ada 3", come descritto nei capitoli precedenti. Nonostante la sostituzione sia stata effettuata in maniera oculata e con i dovuti distinguo, l'operazione stessa rappresenta in ogni caso un discostamento dalle condizioni reali e sito-specifiche che sarebbe opportuno sanare. La mancanza di impianti specifici e natura letteraria dei dati utilizzati, se pur coerenti e consistenti tra loro in termini impiantistici, rende il presente studio adeguato ad una valutazione preliminare degli impatti del sistema; tuttavia, la stessa risulterebbe approssimativa nell'ottica di una valutazione puntuale. La scelta di impianti di riciclo e fonderia specifici in base ai quali poter ricavare

²European Life Cycle Database

³International reference for Life Cycle Data, prodotto anch'esso dal JRC europeo

dati ed osservazioni di prima mano, permetterebbe non solo una migliore valutazione complessiva ma anche una reale scelta dei siti e conseguentemente delle distanze di trasporto, superando così l'attuale limite dettato dall'ipotetica localizzazione a Pescara dei sistemi di processo relativi al cantiere navale, centro di riciclo e fonderia.

10.2.2 Life Cycle Inventory

Durante la fase di inventario sono state valutate le informazioni disponibili nella letteratura esistente, prendendo in considerazione quelle dotate di maggiore attinenza e coerenza con i sistemi di studio. L'operazione di mediazione delle diverse fonti ha prodotto un inventario finale congiunto, dotato di comportamento intermedio rispetto a tutte le fonti, ricordando che, ove possibile, sono stati considerati gli impatti massimi in modo da procedere in ottica conservativa. La fase di inventario, quindi, è stata indirizzata alla realizzazione di un inventario dei flussi di materia ed energia sia in entrata che in uscita da un ipotetico impianto di riciclo dei rottami derivanti dalla piattaforma, come anche a quelli relativi alla produzione di acciaio vergine, considerando questi ultimi in qualità di impatti evitati [43].

Di seguito si riportano gli inventari relativi ai due sistemi di processo e le ipotesi su cui essi si fondano.

Produzione di Acciaio Primario

Il sistema di riguardo la produzione di acciaio primario è costituito dalle unità di processo tradizionalmente utilizzate per la trasformazione del minerale di ferro in acciaio: forno per coke, sinterizzatore, altoforno e forno ad ossigeno basico [8, 63].

Il forno per coke è composto da una fornace in mattoni refrattari, in cui avviene la pirolisi del carbone in ambiente anossico, alla temperatura di

circa 1200 C. Il coke è un residuo solido carbonioso di litantrace bituminoso con bassi livelli di cenere e di solfuri, da cui le componenti volatili siano state estratte attraverso la cottura in forno alla temperatura di 1000 C e in assenza di ossigeno. Questo procedimento permette di fondere il carbonio fisso con le ceneri.

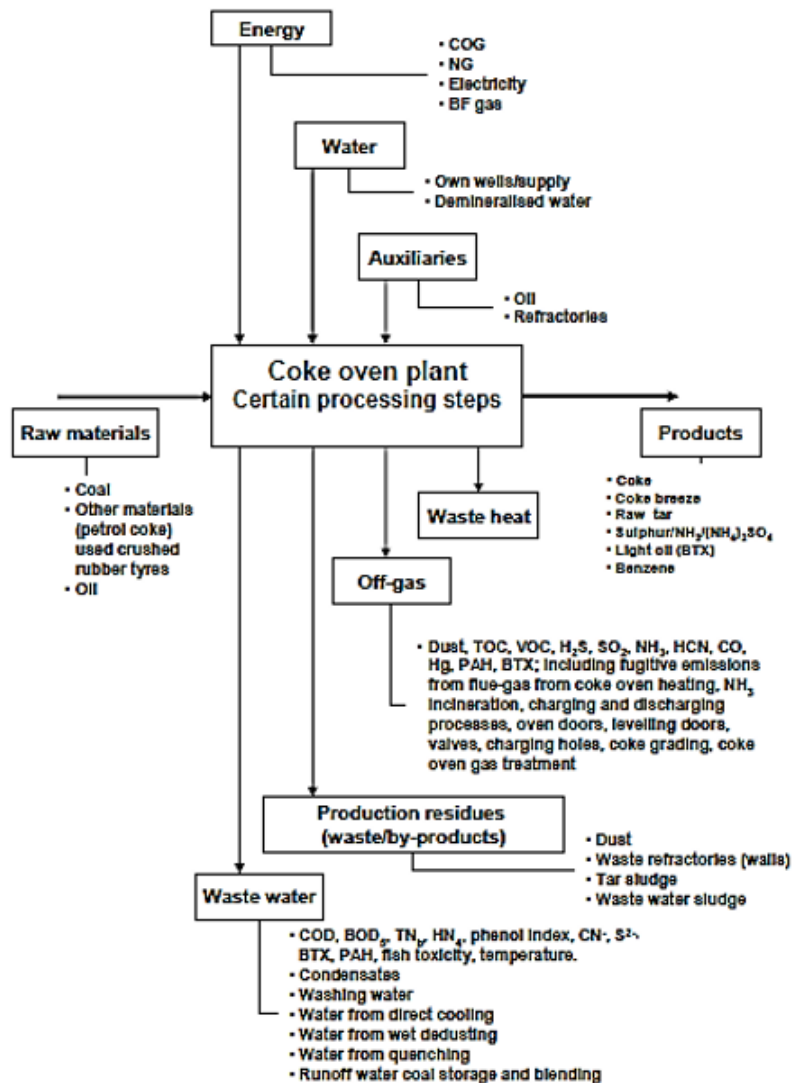


Figura 10.6: Principali flussi in ingresso ed uscita dal forno per coke

Tabella 10.2: Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione del coke

Input Flows		Output Flows	
Reference Unit: 0,175 t of Produced Steel			
Hard Coal	163,8 kg	<i>Products</i>	
Water	103 kg	Tar	4,9 kg
Electricity	7,05 kWh	Ammonium	1,6 kg
		Sulphite	
Oxygen	0,125 g	Coke	124 kg
Nitrogen	0,73 g	Energy	890,2 MJ
Vapour	100 kg	Steam	33 MJ
Sulphuric Acid	0,21 kg	<i>Residues/Wates</i>	
Anthracene Oil	0,047 kg	Benzene	1,7 kg
Sodium Hydroxide	0,051 kg	Light Oil	1,7 kg
Steam	98,91 MJ	H ₂ SO ₄	1,1 kg
Compressed Air	0,19 m ³	(NH ₄) ₂ SO ₄	5,9 kg
Acetylene	0,03 g	Sulphur	0,25 kg
		Sodium Phenolate	0,18 kg
		<i>Air Emissions</i>	
		CH ₄	5,1 g
		Benzene	7,3 g
		CO ₂	96,7 kg
		CO	3,1 kg

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Dust	35,4 g
NO ₂	0,18 kg
SO ₂	0,23 kg
HCN	0,26 g
Diffused Emissions	24,2 g
PAH	0,5 g
PCDD/F	7,9 ng
Benzo(a)Pirene	10,4 mg
SO _x	111,3 g
NO _x	220,4 g
NH ₃	3,1 g
H ₂ SO ₄	0,24 g
H ₂ S	12,4 g
TOC	3 g
<i>Emissions to Water</i>	
COD	44,8 g
N-	14,6 g
NH ₃	15,2 g
Phenols	0,6 g

La sinterizzazione è un particolare processo di lavorazione ad elevata temperatura che realizza un oggetto a partire dalla polvere di materiale. La polvere è pressata in uno stampo dotato di forma spesso con l'aggiun-

ta di leganti polimerici: il processo vede in ingresso polvere di minerale di ferro, additivi come lime e olivine.

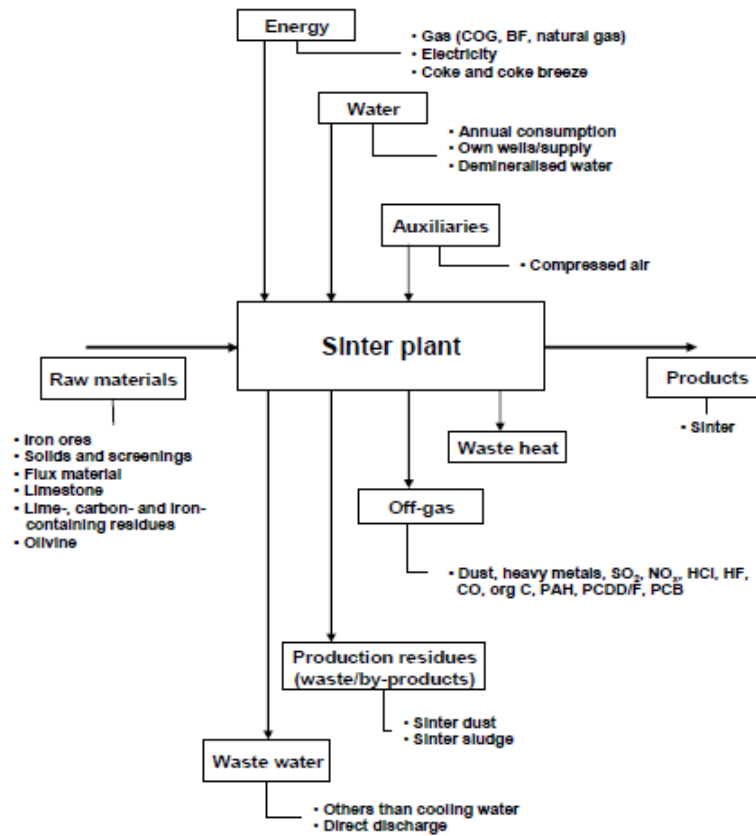


Figura 10.7: Principali flussi in ingresso ed uscita dal sinterizzatore

Tabella 10.3: *Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione di materiale metallico sinterizzato*

Input Flows		Output Flows	
Reference Unit: 0,175 t of Produced Steel			
Dolomite	10,4 kg	<i>Products</i>	
Natural Gas	11,9 MJ	Iron Ore Sinter	0,22 t
Water	0,16 m ³	<i>Residues/Wates</i>	
Electricity	9,7 kWh	Wastes	24 g
Lime	5,06 kg	Dust	5,5 kg
Iron Ores	143,6 kg	Sludges	0,55 kg
Limestone	28,4 kg	<i>Air Emissions</i>	
Lubricating Oil	0,6 g	CH ₄	73,1 g
Cooling Water	0,07 m ³	CO ₂	42,9 kg
Sludges	3,6 kg	CO	5,6 kg
Coke	58,7 kg	Dust	203,8 g
Iron Residues	31 kg	NO ₂	0,16 kg
BF Sludges	6,1 kg	SO ₂	0,18 kg
Vapour	5,3 m ³	Diffused Emissions	10,8 g
Return Fines	21,6 kg	PAH	0,14 g
Other	5,6 kg	PCDD/F	1,9 mg
Additives	4,7 kg	NO _x	0,17 kg
BF Gas Dust	2,3 kg	TOC	31,4 g

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Solid Fuel	305,2 MJ	Heavy Metals	12,1 g
Steam	39,5 MJ	Pb	1 g
Compressed Air	10,7 m ³	Cr	0,014 g
		Cd	0,035 g
		Cu	0,11 g
		Zn	0,29 g
		Ni	0,021 g
		Fe	21,6 g
		HF	3,7 g
		HCl	50,4 g
		COV	0,175 g
		PCB	16,4 mg _{TEQ}
<i>Emissions to Water</i>			
		Waste Water	0,04 m ³

L'altoforno permette la produzione della ghisa partendo dal minerale ferroso: il sinterizzato insieme agli additivi ed agenti riducenti come il coke, vengono alimentati in continuo dall'alto attraverso un sistema che previene fughe del gas di processo, ricircolato poi in testa all'impianto per il recupero energetico.

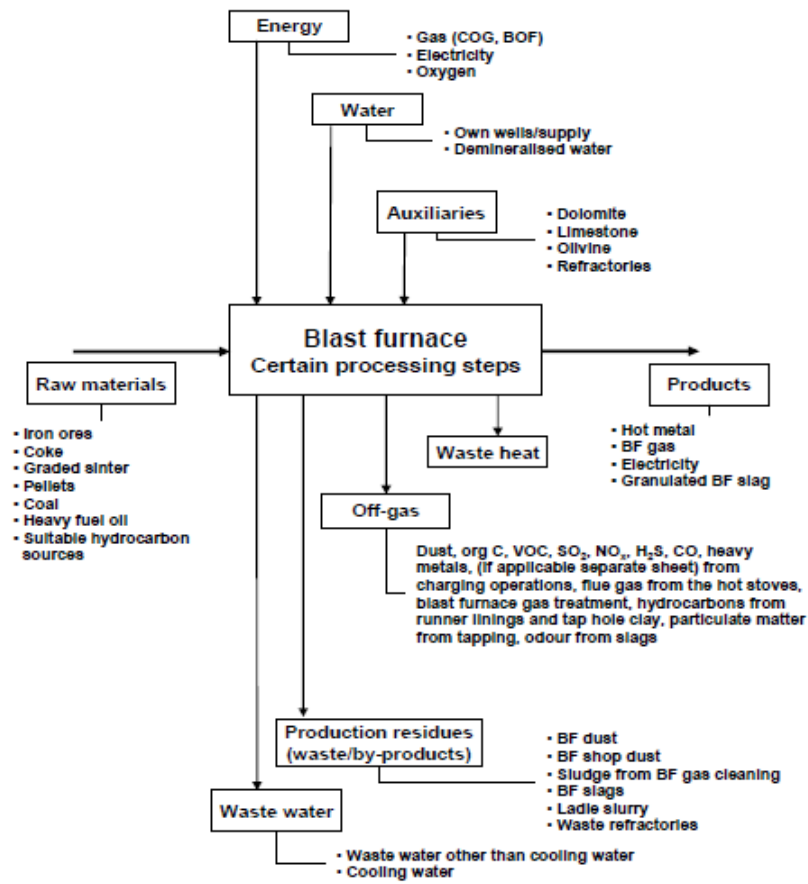


Figura 10.8: Principali flussi in ingresso ed uscita dall'altoforno

Tabella 10.4: Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione di ghisa

Input Flows		Output Flows	
Reference Unit: 0,175 t of Produced Steel			
Hard Coal	40,9 kg	<i>Products</i>	
Natural Gas	0,035 kg	Energy	3,6 kWh
Water	0,25 t	Pig Iron	168,3 kg
Electricity	12,5 kWh	<i>Residues/Wates</i>	
Lime	2,9 kg	Suspended Solids	0,7 g
Oxygen	17,3 kg	Refractory	0,5 kg
Coke	64,9 kg	Wastes	0,54 kg
Iron Ores	22,2 kg	Dust	4 kg
Lubricating Oil	2,6 kg	Sludges	3,3 kg
Cooling Water	3,9 m ³	Iron Scrap	0,14 kg
Vapour	0,021 t	BF Slag	71,3 kg
Returned Materials	3,3 kg	<i>Air Emissions</i>	
Iron Ore Sinter	216,9 kg	CO ₂	178,5 kg
Pellets	39,3 kg	CO	74,5 g
Tap Water	0,06 m ³	Dust	26,1 g
		NO ₂	6,7 g
		SO ₂	76,1 g
		Diffused Emissions	35,9 g
		PCDD/F	1 ng

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

NO _x	23,8 g
H ₂ S	0,019 g
Heavy Metals	10,5 g
Pb	8,8 mg
Cr	4,4 mg
Cu	86 mg
Zn	79,8 mg
Ni	7 mg
Fe	10,2 g

Emissions to Water

COD	3 g
N-	5,2 g
Waste Water	1,1 m ³

Il forno ad ossigeno basico è l'unità in cui avviene la trasformazione della ghisa in acciaio: è un metodo di forgiatura primaria dell'acciaio nel quale una colata ad alto tenore di carbonio è trasformata in acciaio. L'insufflazione di ossigeno nella colata permette di abbassare il tenore di carbonio della lega, trasformandola in acciaio dolce. Il processo è definito "basico" per via dell'elevato indice di basicità della scoria, il quale viene in genere mantenuto ad un valore superiore a 3 con l'aggiunta di calce viva o di dolomite nelle proporzioni necessarie.

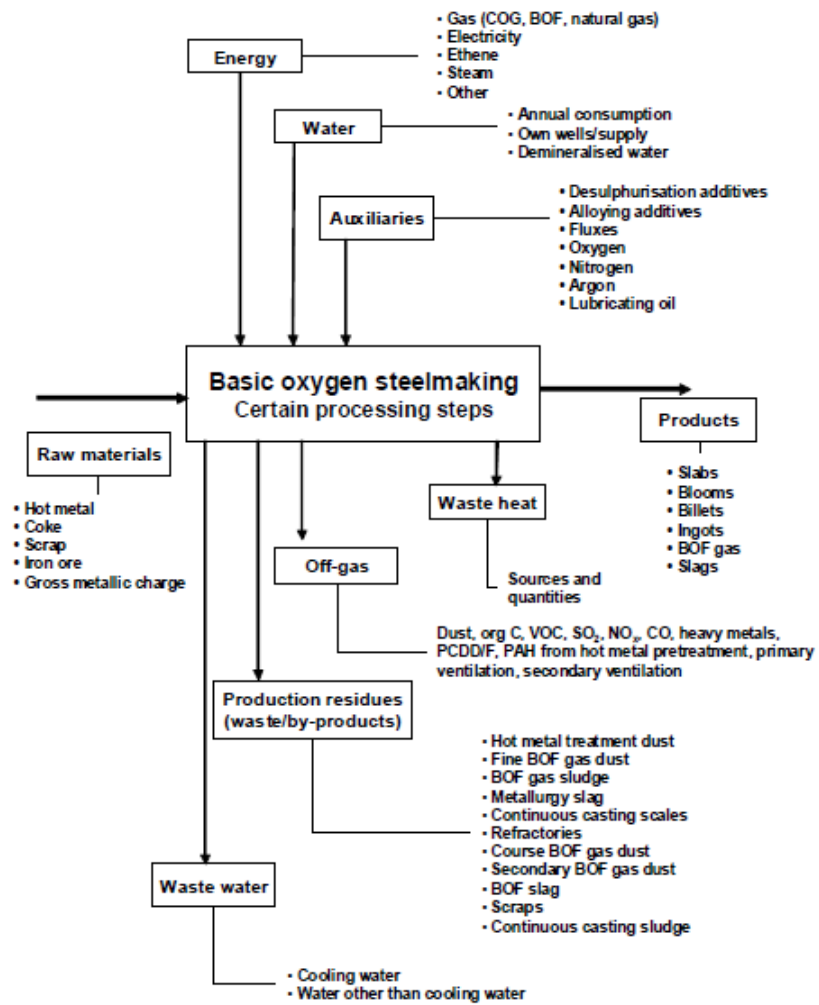


Figura 10.9: Principali flussi in ingresso ed uscita dal BOF

Tabella 10.5: *Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione dell'acciaio*

Input Flows		Output Flows	
Reference Unit: 0,175 t of Produced Steel			
Dolomite	2,4 kg	<i>Products</i>	
Natural Gas	0,1 kg	Steam	58,6 MJ
Water	2,5 m ³	Hot Steel	0,175 t
Electricity	10,7 kWh	<i>Residues/Wates</i>	
Iron Scrap	43,9 kg	Light Oil	0,35 g
Lime	10,3 kg	BOF Slag	30,7 kg
Refractory	6,2 kg	Refractory	1 kg
Oxygen	14 kg	Wastes	77,9 kg
Pig Iron	163,2 kg	Dust	1,6 kg
Coke	0,07 kg	Sludges	3,2 kg
Nitrogen	7 kg	Iron Scrap	3,2 kg
Iron Ores	2,2 kg	Secondary	9,6 kg
		Metallurgy Slag	
Vapour	1,3 kg	Spittings	2,6 kg
Tap Water	15,2 m ³	Mill Scale	1,3 kg
Argon	0,2 m ³	<i>Air Emissions</i>	
Compressed Air	2,1 m ³	CO ₂	13 kg
Steel Scrap	14 kg	CO	0,74 kg

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Dust	30,5 g
NO ₂	6,8 g
SO ₂	6,2 g
Diffused Emissions	10,9 g
PAH	1,8 mg
PCDD/F	16ng _{TEQ}
NO _x	9,6 g
Heavy Metals	12,7 g
Pb	0,17 g
Cr	18 mg
Cd	8,8 mg
Cu	0,51 g
Zn	1,3 g
Ni	50 mg
Fe	9,3 g

Emissions to Water

Waste Water	0,6 m ³
-------------	--------------------

Complessivamente, il sistema di processo studiato per determinare gli impatti evitati risulta ben rappresentato dallo schema sottostante in cui sono riportati i flussi di massa principali legati al prodotto.

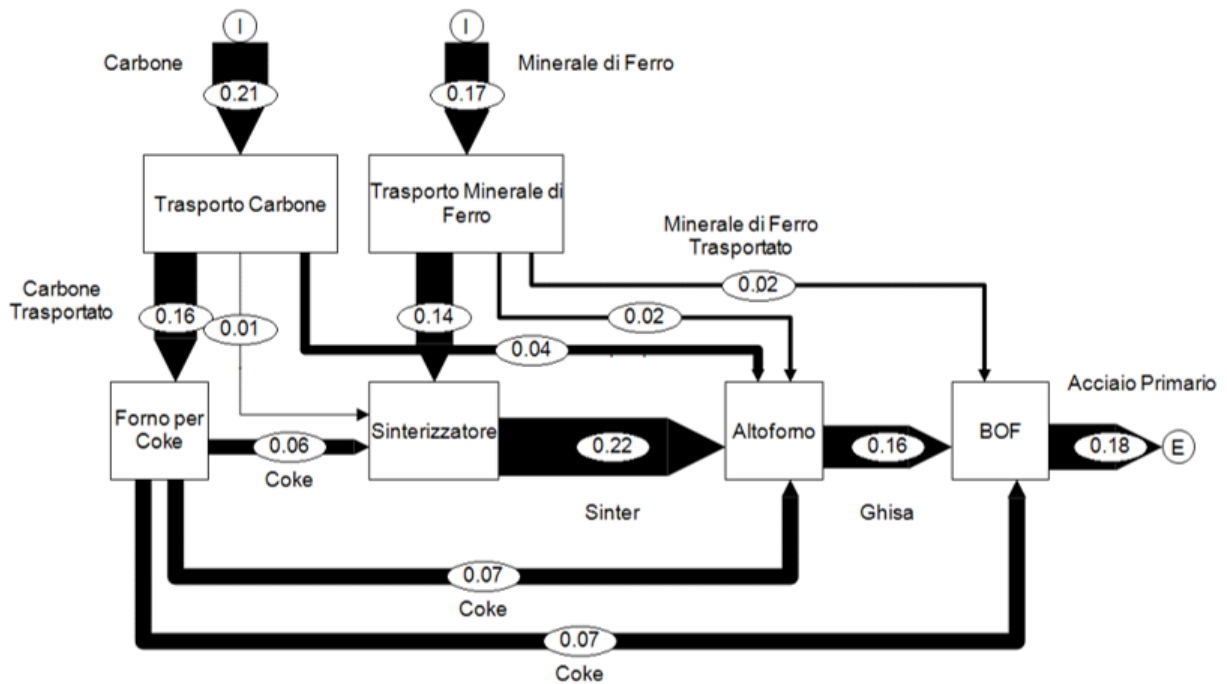


Figura 10.10: *Flussi di massa della filiera produttiva di acciaio vergine*

Operazioni di *Decommissioning*

Le operazioni di rimozione della piattaforma risultano essere la prima fase dell'articolato sistema di unità di processo implicate nel progetto di *decommissioning*. Tali operazioni coinvolgono, tra le numerose altre attrezzature e macchinari, diversi mezzi navali pesanti impiegati a fasi alterne durante l'intero arco dell'attività e di seguito riportati.



Figura 10.11: *Nave-gru a braccio mobile*



Figura 10.12: *Pontone di trasporto*



Figura 10.13: *Rimorchiatore Navale*



Figura 10.14: *Mezzo di supporto*

Secondo la valutazione preliminare del progetto di *decommissioning* preso in considerazione, sono previste le seguenti fasi:

- rimozione dell'imbarcadero e del piano di lavoro;
- rimozione della camicia di protezione;
- pulizia della struttura dagli accrescimenti marini nei punti di taglio ed ancoraggio;
- installazione delle bitte di sollevamento nei punti indicati nel progetto di rimozione;
- realizzazione dello scavo sul fondale, in modo da permettere il taglio della monotubolare alla quota -1 m dalla mudline;
- operazioni di taglio mediante apposito macchinario a filo diamantato, assistito da sommozzatori e ROV;
- sollevamento della struttura e posizionamento sul pontone di trasporto;
- trasporto a riva del pontone di trasporto con l'ausilio del rimorchiatore navale e del mezzo di supporto;
- scarico in cantiere.

10.2. Analisi LCA

Le operazioni di rimozione si articolano compiutamente durante l'arco di 15 giorni, secondo il cronoprogramma ivi riportato

CRONOPROGRAMMA DELLE OPERAZIONI OFFSHORE RIMOZIONE MONOTUBOLARE ADA_3	Days	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
LAVORI PRELIMINARI DI PREPARAZIONE RIMOZIONE MONOTUBOLARE	7	■	■	■	■	■	■	■								
Mobilizzazione per lavori per esecuzione preliminari	2	■	■													
Preparazione imbarcadere, pianetto e camicia di protezione	1,5		■	■												
Installazione bitte di sollevamento sulla monotubolare ed ispezione saldature (NDE)	1,5			■	■	■										
Demobilizzazione lavori per esecuzione preliminari	2					■	■									
OPERAZIONI DI RIMOZIONE	6,5				■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Mobilizzazione crane vessel, flotta, equipaggiamento e personale	1				■											
Ancoraggio	0,5					■										
Survey, Scavo e Pulizia area monotubolare per effettuazione taglio	1,5						■	■								
Posa sistema di taglio tipo a cavo diamantato sulla monotubolare	0,5							■								
Collegamento linee di controllo e imbragatura di sollevamento sulla monotubolare	0,5								■							
Taglio della monotubolare	0,5									■						
Sollevamento della monotubolare e posa su pontone	0,25										■					
Recupero Equipaggiamenti e Ripristino del Fondo Marino	0,25											■				
Survey Ricognitivo Post-Operazioni di Rimozione	0,25												■			
Salpaggio ancore	0,25													■		
Demobilizzazione crane vessel, flotta, equipaggiamento e personale	1														■	
TRASPORTO MONOTUBOLARE	15	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
- Mobilizzazione pontone di trasporto	3	■	■													
- Preparazione (installazione supporti)	4			■	■	■	■	■								
- Trasporto al sito di rimozione	0,5								■							
- Operazioni al sito di rimozione	2									■	■					
- Trasporto all'area di scarico	0,5											■				
- Taglio rizzaggi e operazioni di scarico	2												■	■		
- Pulizia pontone e demobilizzazione	3														■	■

Figura 10.15: Cronoprogramma delle operazioni di rimozione della monotubolare come descritto nel progetto di valutazione relativo alla piattaforma Ada3

Per quanto riguarda il calcolo delle emissioni legate alle operazioni di trasporto del carico, si fa riferimento alle linee guida prodotte dal programma EMEP⁴ condotto dal dipartimento ambientale dell'Unione Europea [35]. Secondo la metodologia proposta, il complesso delle emissioni da navigazione dipenderebbe in parte dalle caratteristiche del carburante utilizzato⁵ ed in parte dalle caratteristiche della motrice di cui si

⁴L'European Monitoring and Evaluation Programme, in italiano Agenzia Europea dell'Ambiente (AEA), è un'agenzia dell'Unione Europea il cui compito è fornire informazioni indipendenti e qualificate sull'ambiente con l'obiettivo di favorire lo sviluppo sostenibile e contribuire al conseguimento di miglioramenti significativi e misurabili dell'ambiente in Europa

⁵A cui sono in larga parte riconducibili composti quali CO₂, SO_x e metalli pesanti

avvale il mezzo⁶ Il testo di riferimento quindi propone tre casistiche in cui far ricadere i diversi tipi di imbarcazioni:

- Tier 1: motori diesel, dalla potenza superiore a 130 kW, installati su mezzi costruiti in un periodo compreso tra il 01/01/2000 ed il 01/01/2011;
- Tier 2: motori diesel, dalla potenza superiore a 130 kW, installati su mezzi costruiti dopo il 01/01/2011;
- Tier 3: motori diesel, dalla potenza superiore a 130 kW, installati su mezzi costruiti dopo il 01/01/2016.

Secondo l'assunzione di utilizzo di mezzi navali mediamente datati, si suppone che imbarcazioni di rimozione della piattaforma ricadano nel Tier 2. Come conseguenza di quanto stabilito finora, la procedura suggerisce che il metodo appropriato per il calcolo delle emissioni da questo tipo di mezzi si basi sulla seguente formula:

$$E_i = \sum_m \sum_j FC_{m,j} \cdot EF_{i,m,j}$$

Dove:

E_i = emissione annua totale

$FC_{m,j}$ = consumo di combustibile m di un mezzo dotato della tipologia di motore j

$EF_{i,m,j}$ = fattore di emissione medio per l'inquinante i da parte di un mezzo dotato di motore j a combustibile m

Si noti che i fattori di emissione per i Tier 2 sono calcolati valutando condizioni medie di viaggio ed utilizzo.

⁶Responsabile per lo più delle emissioni di CO,COV, NOx e polveri

Tabella 10.6: *Fattori di emissioni utilizzati per i mezzi navali coinvolti nelle operazioni di decommissioning [kg / t_{fuel}]*

	Tug Boat (2033 kW, high-speed diesel, MDO/MGO)	Supply Vessel (2033 kW, high-speed diesel, MDO/MGO)	Crane/ workbarge (4397 kW, medium-speed diesel, MDO/MGO)
NO _x	52,3	52,8	64,5
SO ₂	51	52	53
CO ₂	3179	3179	3179
Hydrocarbons	2	2,3	2,4
Specific Fuel Consumption [g / kWh]	218	218	205
CO	4,3	4,3	4,5
NMOVC	2,6	2,6	1,9
PM ₁₀	1	1	1,1
PM _{2,5}	0,8	0,8	0,9
BC	0,042	0,042	0,048

I materiali costituenti la monotubolare sono sostanzialmente riconducibili a materiali derivanti dal settore edile per attività di costruzione e demolizione⁷ [15], identificati come:

- cemento e calcestruzzo;

⁷Da qui l'ipotesi di assimilazione dei consumi, efficienze ed impatti derivanti dalla separazione degli stessi a quelli relativi alla separazione delle macerie del settore edilizio

- metalli e leghe strutturali del tipo Fe510C - EU25⁸;
- materiali protettivi ed isolanti vari;
- rifiuti vari definiti dai rispettivi CER, tra cui anche il residuo organico derivante dalle operazioni di pulizia della piattaforma dagli accrescimenti marini,

Si riporta l’inventario stimato dei materiali condotto da ENI S.p.A. nel documento di riferimento; si noti che per il quantitativo della biomassa marina è stato assunto un valore di circa il 10% del peso del cemento.

Tabella 10.7: *Inventario dei materiali ricavabili dalla rimozione dalla piattaforma Ada3, secondo le stime di ENI S.p.A.*

Tipologia	Peso [t]
Tubo esterno	28
Cemento	154,8
Tubo guida	15,7
Rivestimento	2,5
Centratori per conductors	1
Anodi	1
Imbarcadero e pianetto	5
Accrescimento marino	15
Totale	223

(Continua alla pagina successiva)

⁸L'acciaio Fe510C, classificato come S355J0 dalle nuove normative, è un acciaio strutturale al carbonio adatto alla formatura a freddo, utilizzato in svariati settori dalla carpenteria, alla produzione di strutture metalliche e serbatoi fino all'impiego architettonico e strutturale

(Continua dalla pagina precedente)

Riciclo dell'Acciaio

Il processo di riciclo dell'acciaio si configura a valle di una filiera di separazione e pulitura dei materiali, operazioni che possono comportare schemi di processo dalla complessità variabile in relazione alle caratteristiche del materiale trattato. La fusione del rottame recuperato avviene in una fornace elettrica, in cui vengono alimentati i rifiuti metallici recuperati poi fusi grazie ad un arco elettrico generato da tre elettrodi cilindrici consumabili in grafite inseriti all'interno del crogiolo del forno dalla volta. La prima fase del processo di riciclo prevede i pretrattamenti e la separazione del materiale ferroso, destinato a riciclo, dal materiale assunto di scarto che, nell'ambito del presente studio, è costituito in prevalenza da cemento e calcestruzzo. Nella tabella sottostante si riporta la suddivisione merceologica dei materiali derivanti dal trattamento della piattaforma⁹.

Tabella 10.8: *Composizione merceologica dei materiali ricavabili dalla rimozione dalla piattaforma Ada3, secondo le stime di ENI S.p.A.*

Materiale	Peso [t]	[%]
Acciaio	48,7	21,8
Cemento	154,8	69,4

(Continua alla pagina successiva)

⁹Il valore percentuale si riferisce al peso complessivo della piattaforma, riportato nei paragrafi precedenti e stimato pari a 223 tonnellate

(Continua dalla pagina precedente)

Residui ¹⁰	19,5	8,7
Totale	223	100

Si assume che l'intero processo di pretrattamento e separazione sia assimilabile a quello in uso per i residui da costruzione e demolizione, supponendo inoltre che la filiera si configuri come impianto fisso, alimentato principalmente da energia elettrica¹¹.

Il trattamento di tali residui prevede: triturazione/frammentazione, separazione magnetica e vagliatura seguiti da una fase di separazione manuale o meccanica volta a rimuovere le impurità residue [14]. Una volta separato dal resto, il materiale ferroso viene avviato alla fusione all'interno dell'apposita fornace.

¹⁰La categoria "Residui" comprende i materiali quali anodi, rivestimento e materiale organico, coerentemente con quanto riportato in precedenza

¹¹Nonostante gli impianti mobili, alimentati a diesel, siano in alcuni casi la scelta più frequente, lo studio è stato condotto ipotizzando l'implementazione dei processi all'interno di filiere virtuose di limitazione degli impatti, coerentemente alla scelta di ri-fusione dei rottami ferrosi in fornace elettrica e non in qualità di sostituto al minerale di ferro, pratica in uso all'interno del ciclo integrale

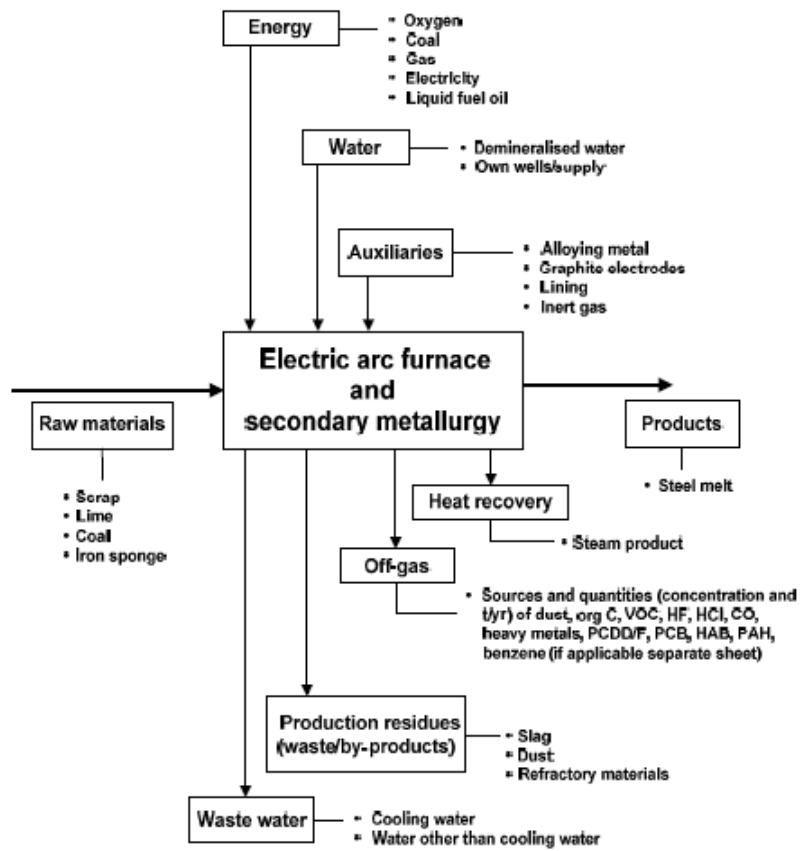


Figura 10.16: Principali flussi in ingresso ed uscita dal forno elettrico

Tabella 10.9: *Flussi in ingresso ed uscita relativi al processo di produzione dell'acciaio*

Input Flows		Output Flows	
Reference Unit: 0,175 t of Produced Steel			
Iron Scrap	181,2 kg	<i>Products</i>	
Limestone	12,1 kg	Hot Steel	0,175 t
Coal	4,9 kg	<i>Residues/Wates</i>	
Electrodes	0,7 kg	EAF Slag	27 kg
Refractory	10,2 kg	Dust	2,9 kg
Alloys	36,5 kg	Waste Refractories	2,6 kg
Oxygen	16,3 kg	Sludge	1,5 kg
Argon	0,5 kg	<i>Air Emissions</i>	
Nitrogen	2,6 kg	Dust	24,7 g
Steam	126 MJ	Hg	35 mg
Compressed Air	0,22 m ³	Pb	0,3 g
Electricity	91 kWh	Cr	0,3 g
Natural Gas	145,2 MJ	Ni	0,18 g
Cooling Water	3,2 m ³	Zn	3 g
Water	3,8 m ³	Cd	21 mg
		Cu	60 mg
		HF	1,3 g
		HCl	6,2 g

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

SO ₂	18,9 g
NO _x	40,4 g
CO	0,63 kg
CO ₂	38,4 kg
TOC	45,5 g
Benzene	0,77 g
Chlorobenzene	2,1 mg
PAH	169,8 mg
PCB	0,88 mg
PCDD/F	540 ng _{TEQ}
Fluoride	0,011 mg
<i>Emissions to Water</i>	
Waste Water	0,09 m ³

Complessivamente il sistema principale oggetto dello studio è ben rappresentato dal grafico di flusso sottostante, in cui vengono riportati i flussi di massa principali legati al prodotto.

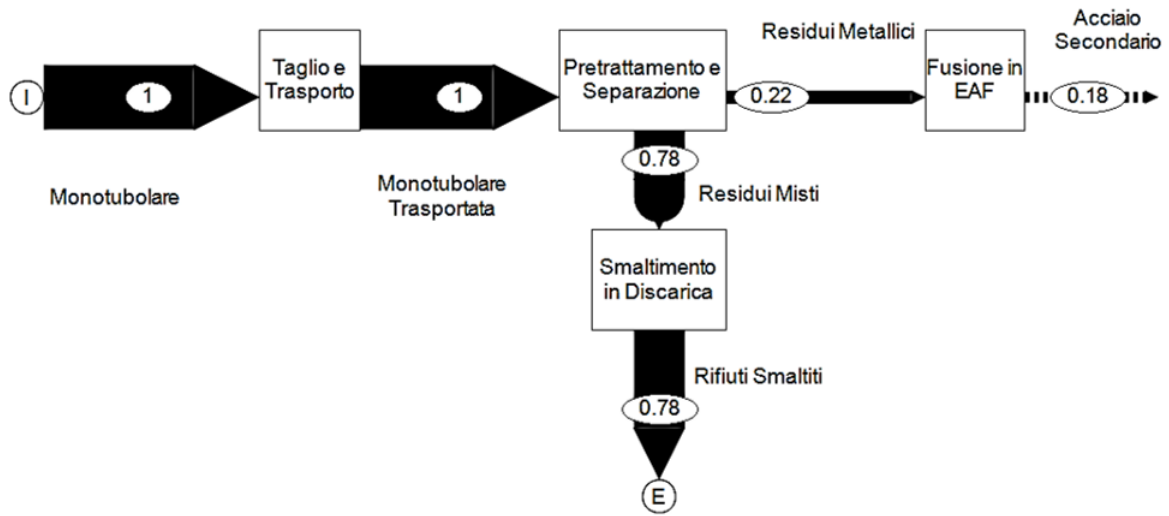


Figura 10.17: *Flussi di massa della filiera produttiva di acciaio secondario*

10.2.3 Life Cycle Impact Assessment

La valutazione delle prestazioni ambientali del sistema, a valle della scelta delle categorie di impatto, viene condotta grazie all’ausilio del software OpenLCA. Le categorie di impatto ed i relativi indicatori di categoria presi in considerazione sono quelli appartenenti al metodo ILCD2011. Si riporta di seguito un estratto del manuale d’uso del software OpenLCA contenente l’elenco delle categorie di impatto [4].

Method: ILCD 2011 recommended methods			
Impact category group	Recommended method	Midpoint / Endpoint	Comments
Acidification	Seppala et al 2006	Midpoint	Accumulated exceedance
	Posch et al 2008		
	Van Zelm et al 2007	Endpoint	PNOF
Climate change	IPPC 2007	Midpoint	GWP100
	ReCiPe 2008	Endpoint	Human health
	ReCiPe 2008	Endpoint	Ecosystems
Depletion of abiotic resources	Ecological Scarcity Method 2006	Midpoint	Freshwater
	Van Oers et al 2002	Midpoint	Mineral, fossils and renewables
Ecotoxicity	ReCiPe	Midpoint	Freshwater
Eutrophication	Seppala et al 2006	Midpoint	Terrestrial
	Posch et al 2008		
	ReCiPe	Midpoint	Freshwater
	ReCiPe	Endpoint	Marine
Human toxicity	ReCiPe	Endpoint	Freshwater
	USEtox	Midpoint	Cancer human health effects
	USEtox	Midpoint	Non-cancer human health effects
	USEtox	Endpoint	Cancer human health effects
Ionising radiation	USEtox	Endpoint	Non-cancer human health effects
	Frisknecht et al 2000	Midpoint	Human health
	Garnier-Laplace et al 2008	Midpoint	Ecosystem
Land use	Frisknecht et al 2000	Endpoint	Human health
	Mila i Canals et al 2007	Midpoint	—
	ReCiPe	Endpoint	—
Ozone depletion	WMO 1999	Midpoint	ODP
	ReCiPe 2008	Endpoint	Human health
Particle matter	Rabl and Spadaro 2004	Midpoint	Respiratory inorganics (PM2.5)
	Humbert et al 2009	Endpoint	Respiratory inorganics (DALY)
	Van Zelm et al 2008	Midpoint	Human health
Photochemical oxidation	Van Zelm et al 2008	Endpoint	Human health
	ReCiPe	Endpoint	Mineral, fossils and renewables

Figura 10.18: *Categorie di impatto considerate all'interno del metodo di caratterizzazione ILCD2011*

Si procede quindi alla presentazione dei risultati della fase di caratterizzazione degli impatti, ricordando che è stata applicata l'espansione dei confini di sistema in modo da comprendere nell'analisi gli impatti evitati della produzione di acciaio primario grazie al riciclo dell'acciaio appartenente alla piattaforma smantellata.

Tabella 10.10: *Risultati della fase di caratterizzazione degli impatti per le categorie di impatto considerate*

Categoria di Impatto	Risultato	Unità di Misura
<i>Climate Change</i>	3.090,77	kg CO ₂ eq

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

<i>Human Toxicity, Cancer Effects</i>	$7,97 \cdot 10^{-7}$	CTUh
<i>Land Use</i>	- 42,48	kg C _{deficit}
<i>Marine Eutrophication</i>	- 0,57	kg N _{eq}
<i>Particulate Matter</i>	- 0,087	kg PM _{2.5, eq}
<i>Water Resource Depletion</i>	- 6,91	m ³ _{water, eq}

Si riporta a titolo esemplificativo il “Diagramma di Sankey” per la categoria di impatto “Climate Change” relativo al sistema studiato (si faccia riferimento all’appendice A per i diagrammi relativi alle altre categorie di impatto). Tale diagramma permette di visualizzare, per una data categoria di impatto, i flussi più rilevanti ed incisivi nel determinare l’impatto complessivo calcolato; i flussi dotati di maggior spessore risultano essere quelli più determinanti, il cui contributo, positivo o negativo, viene rappresentato coerentemente ai colori riportati in legenda.

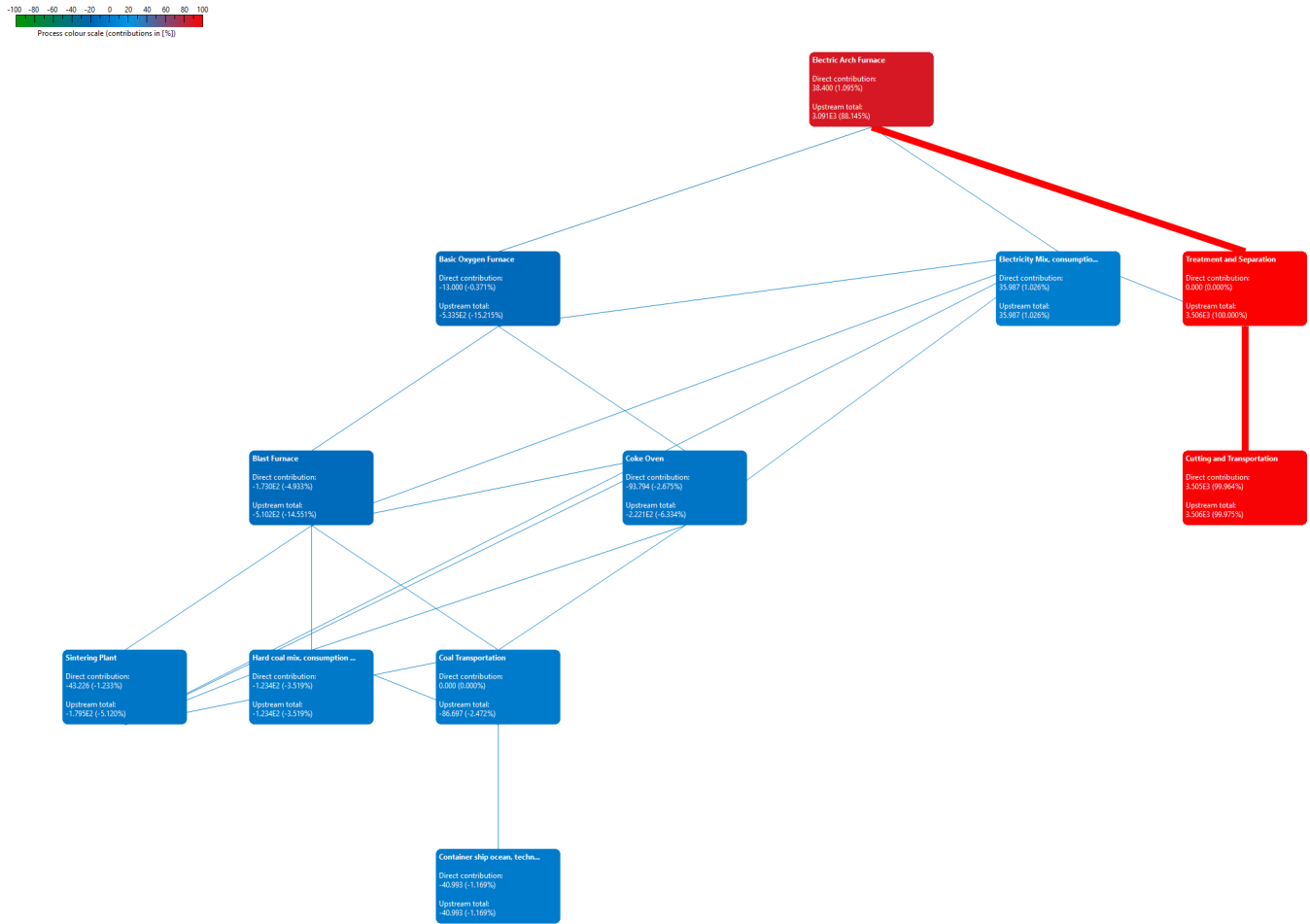


Figura 10.19: Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Climate Change

10.2.4 Life Cycle Interpretation

La quarta ed ultima fase dell'analisi costituisce il fulcro e la forza principale della metodologia LCA. In questa sede vengono analizzati e discussi i risultati ottenuti dallo studio condotto, evidenziate le principali debolezze e le possibilità di sviluppi futuri. Si procede quindi all'analisi critica e ragionata degli impatti valutati per tutte e sei le categorie di impatto prescelte, indagando le ragioni che hanno condotto a tali risultati.

Climate Change

La categoria di impatto “Climate Change” valuta gli impatti legati alle emissioni di gas serra, causa di forzanti radiative agenti all’interno del sistema climatico terrestre, che rappresentano una delle cause dei cambiamenti climatici. Ai fini della conversione delle emissioni nell’indice di categoria, l’unità di misura con cui viene espressa la categoria di impatto ovvero [kg CO_{2,eq}], il modello di caratterizzazione utilizzato si avvale dei fattori proposti dall’IPCC sull’orizzonte temporale di 100 anni (GWP100).

L’analisi dei contributi mostra come le diverse unità di processo incidano sul valore finale.

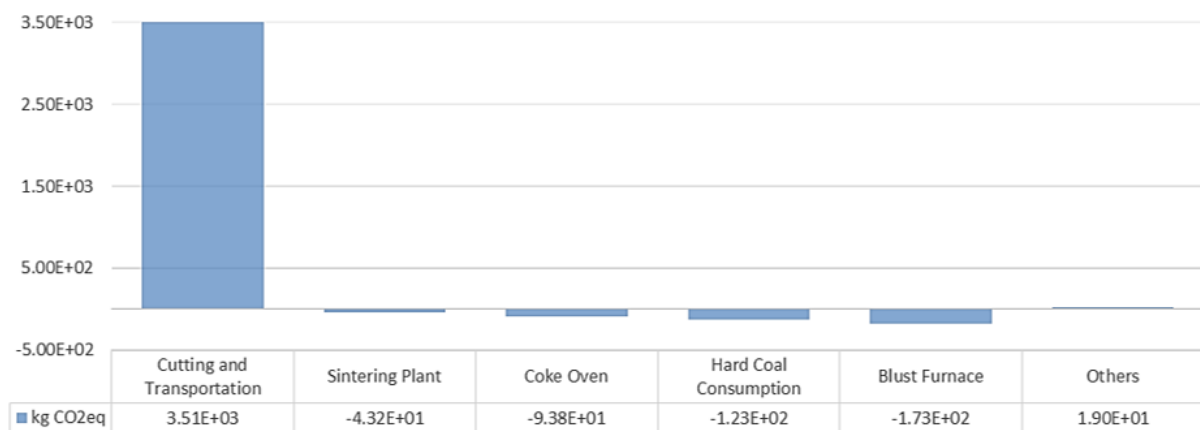


Figura 10.20: *Analisi dei contributi per la categoria di impatto Climate Change*

Nonostante l’espansione di sistema abbia permesso la sottrazione degli impatti evitati grazie alla mancata produzione di acciaio, le importanti emissioni correlate alle operazioni navali e cantieristiche delle attività di *decommissioning* risultano preponderanti: ciò è dovuto sia alla ridotta percentuale di acciaio presente nella piattaforma, aspetto già trattato nei capitoli precedenti e legato alla conformazione della struttura stessa, che limita l’importanza degli elementi negativi all’interno della sommatoria finale, sia agli elevati fattori di emissione delle imbarcazioni utilizzate

che, pur se impegnate nelle operazioni solamente 15 giorni¹², rendono le operazioni di taglio, trasporto e scarico responsabili di rilevanti emissioni inquinanti.

Human Toxicity, Cancer Effects

La categoria di impatto “Human Toxicity, Cancer Effects” valuta il potenziale di tossicità per l’essere umano, calcolato attraverso un indice che tiene in considerazione il rischio potenziale della singola unità di composto chimico rilasciato nell’ambiente, basato sia sulla tossicità intrinseca, sia sulla relativa potenziale dose di contatto. In generale, le principali sorgenti di tali composti risultano essere le centrali di produzione di energia elettrica fossile [4]. L’indice di categoria utilizzato è l’unità di tossicità comparata per l’essere umano [CTUh], che esprime l’incremento stimato della morbidità¹³ per unità di massa del composto.

L’analisi dei contributi mostra come le diverse unità di processo incidano sul valore finale

¹²Dai cronoprogrammi presentati nei capitoli precedenti si evince che, nelle due settimane previste per le operazioni, il rimorchiatore navale sia attivamente impegnato per 9,25 giorni; il mezzo di supporto per 7,75 giorni e la nave gru per 3 giorni

¹³Numero di casi certificati di malati

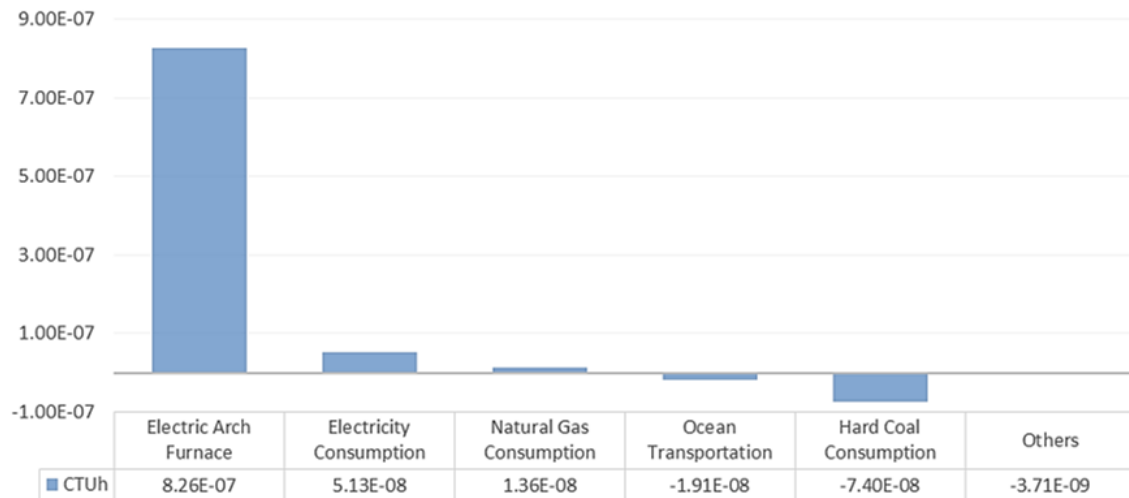


Figura 10.21: *Analisi dei contributi per la categoria di impatto Human Toxicity, Cancer Effects*

Come previsto, considerate l'elevato consumo di energia elettrica che comporta il forno utilizzato all'interno del processo di riciclo dell'acciaio, l'impatto principale per questa categoria di impatto è associato proprio alla fusione del rottame e scarti metallici derivanti dalla piattaforma, attenuati dagli impatti evitati grazie al suddetto riciclo e legati all'utilizzo di carbone metallurgico ed al trasporto delle materie prime necessarie.

Land Use

La valutazione del consumo di suolo si concentra sugli impatti dovuti all'occupazione antropica dei territori e gli impatti ad essa associati. L'unità di misura utilizzata è [kg C_{deficit}], che rappresenta la variazione del contenuto di carbonio organico contenuto nel suolo, associato alle attività umane.

10.2. Analisi LCA

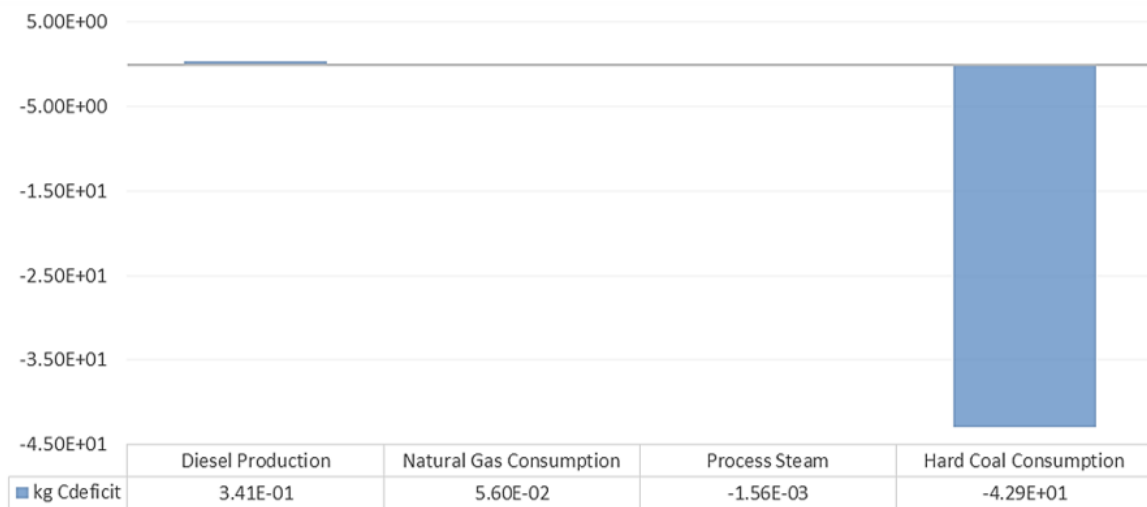


Figura 10.22: *Analisi dei contributi per la categoria di impatto Land Use*

Risulta evidente come, anche in questo caso, gli impatti evitati legati al mancato consumo di carbone per la produzione metallurgica di acciaio primario siano preponderanti nel determinare il valore finale della categoria. Naturalmente, al netto dell'occupazione di suolo degli impianti, l'approvvigionamento del carbone risulta essere estremamente impattante, specialmente considerando le cave ed i processi di estrazione del carbone operati nelle miniere.

Marine Eutrophication

L'eutrofizzazione è un fenomeno di arricchimento di nutrienti chimici all'interno di un ecosistema che può portare ad un'eccessiva produzione di biomassa; tipicamente si manifesta attraverso importanti fioriture algali, in particolare all'interno di bacini a debole ricambio, che comportano una sensibile riduzione nella qualità delle acque e della fauna. Emissioni in aria o acqua di ammoniaca, azoto, fosforo ed i relativi composti sono tipicamente correlate a fenomeni di eutrofizzazione. I fattori di caratterizzazione utilizzati sono ancora una volta reperiti dalle valutazioni e validazioni operate dall'IPCC ed espressi in [kg N_{eq}].

L'analisi dei contributi mostra come le diverse unità di processo incidano sul valore finale.

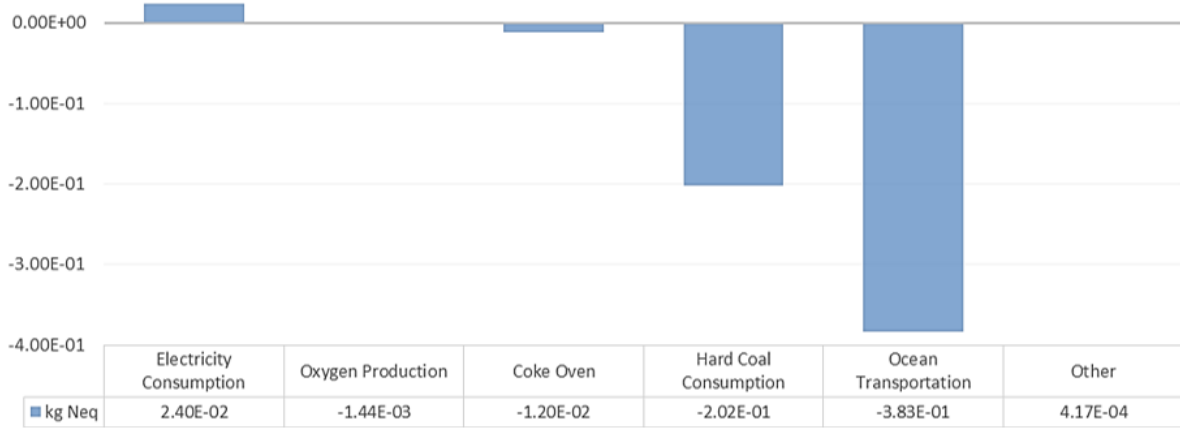


Figura 10.23: *Analisi dei contributi per la categoria di impatto Marine Eutrophication*

In questo caso, essendo la categoria di impatto legata principalmente ai trasporti e produzione delle materie prime necessarie alla produzione di acciaio primario a causa dell'azione combinata di emissioni atmosferiche e scarichi diretti [5,28,67], gli impatti evitati risultano essere superiori a quelli prodotti: il progetto in analisi quindi risulta essere favorevole dal punto di vista dell'eutrofizzazione marina.

Particulate Matter

Materiale particolato (PM) è un termine utilizzato per indicare un complesso eterogeneo di particelle, da quelle carboniose fino ai sali, comprendendo sia materiale organico che inorganico, spesso classificate in base alla grandezza media delle particelle di cui si compone e causa di diverse problematiche sanitarie ed ambientali. I principali processi fonte di PM sono quelli di combustione, sia veicolare che di riscaldamento o produzione di energia, ma anche l'insieme di quelle attività, spesso dalla natura abrasiva, che hanno come conseguenza la produzione di polveri e sabbie. L'unità di misura utilizzata è [kg PM_{2.5,eq}].

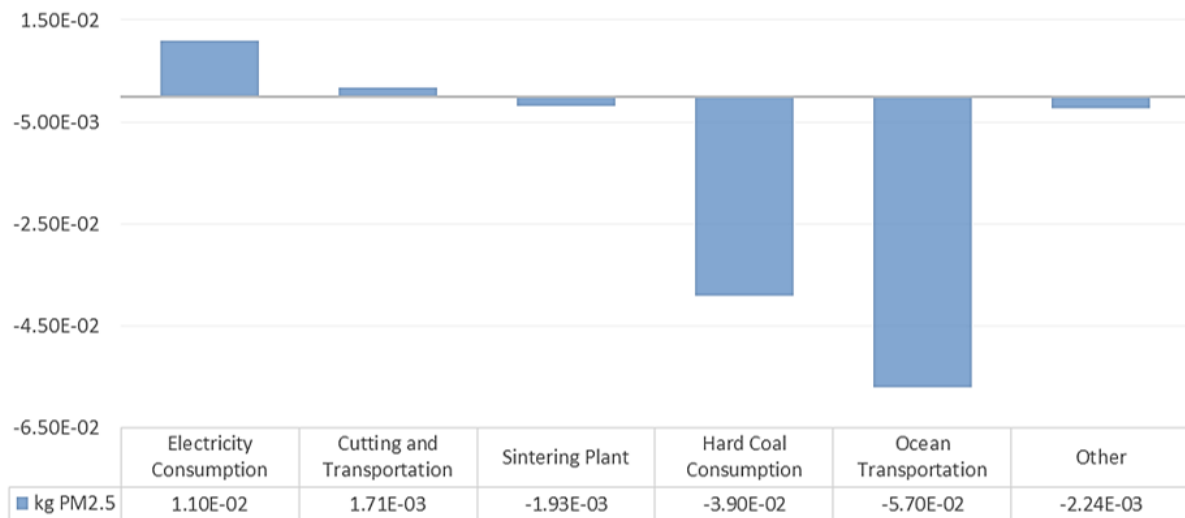


Figura 10.24: *Analisi dei contributi per la categoria di impatto Particulate Matter*

Dalla natura delle fonti dell'inquinamento particolato e definite le tecnologie di propulsione installate sulla flotta media mondiale, risulta evidente che per la produzione di PM la fase principale sia costituita dalla produzione e trasporto del carbone utilizzato nella metallurgia. Si noti che i consumi elettrici legati al riciclo dell'acciaio non si traducono in impatti rilevanti per questa categoria: questo è dovuto al mix delle fonti energetiche utilizzato in Italia e sotto riportato, che privilegia fonti rinnovabili e gas naturale [45].

Tabella 10.11: *Risultati della fase di caratterizzazione degli impatti per le categorie di impatto considerate*

Fonti Primarie Utilizzate	[%]
Fonti Rinnovabili	45,04
Carbone	6,34
Gas Naturale	42,28
Prodotti Petroliferi	0,48

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Nucleare	3,22
Altre Fonti	2,64

Water Resource Depletion

La categoria di impatto “Water Resource Depletion” esprime il consumo di risorse idriche del sistema di studio, il cui impatto dipende sia dal rateo di utilizzo che dalla disponibilità della risorsa. L’unità di misura risulta essere $[m^3_{water,eq}]$.

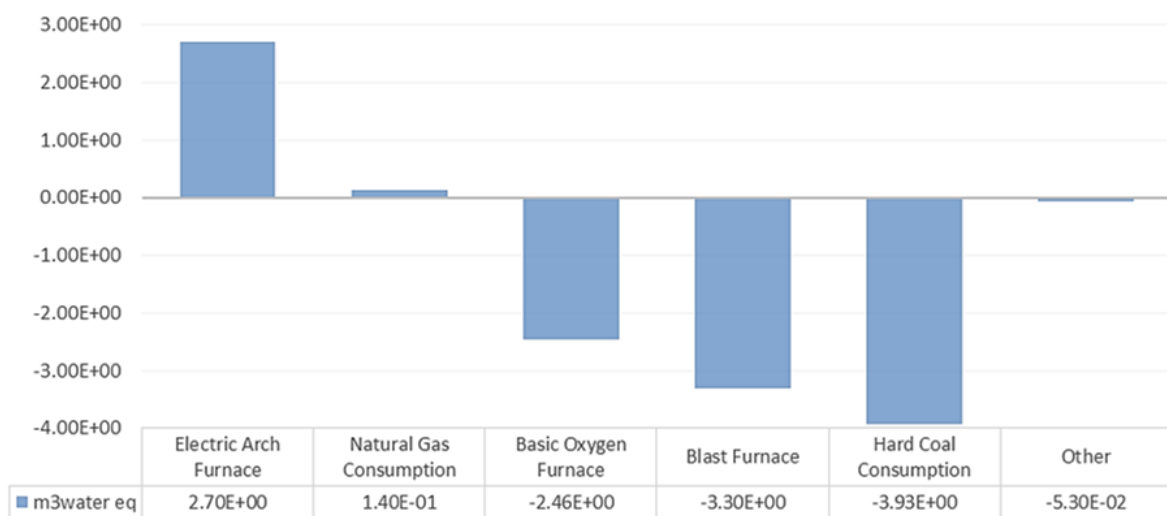


Figura 10.25: Analisi dei contributi per la categoria di impatto Water Resource Depletion

Come si evince dal grafico, il consumo di acqua dovuto al riciclo dell’acciaio viene ampiamente compensato dai consumi evitati della produzione, producendo come effetto globale un impatto favorevole del progetto in studio.

I risultati descritti vengono riportati complessivamente in figura 10.26,

in cui si rappresentano i contributi in termini percentuali delle diverse unità di processo rispetto al totale della categoria di impatto.

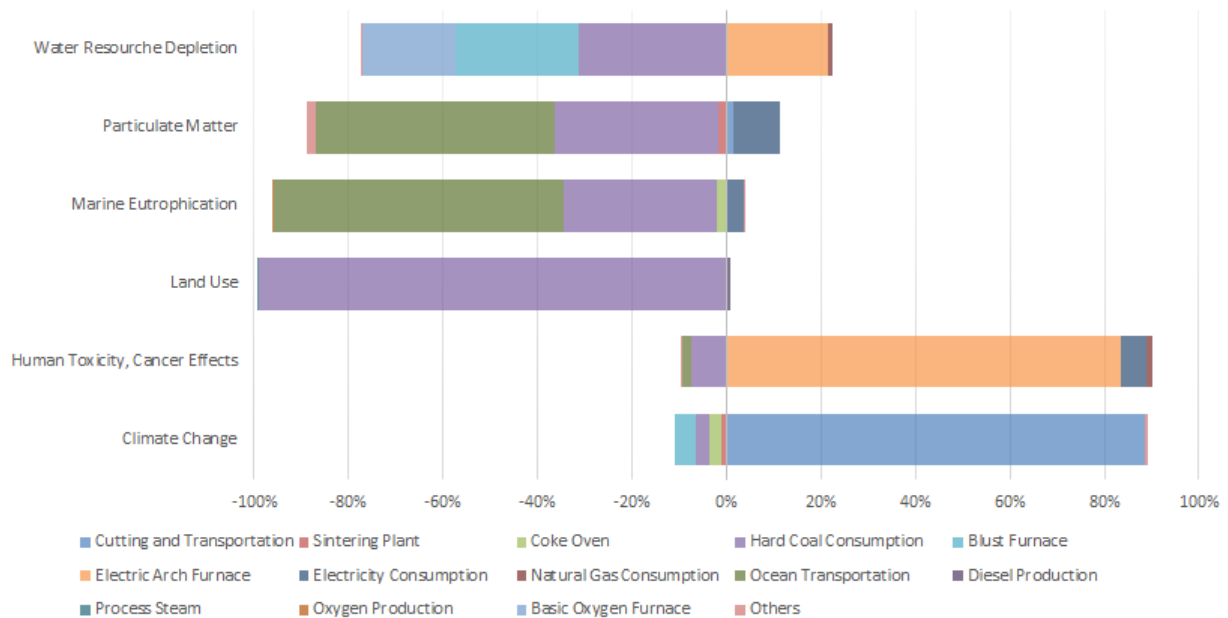


Figura 10.26: Analisi dei contributi in termini percentuali dello studio

10.2.5 Controllo di Sensitività

Il controllo di sensitività ha lo scopo di valutare l'affidabilità dei risultati finali dello studio LCA. Nella fase interpretativa, l'analisi di sensitività viene utilizzata insieme alle informazioni sulle incertezze di questioni significative tra i dati di inventario, i dati di valutazione di impatto, le ipotesi metodologiche e le scelte per valutare l'affidabilità e l'applicabilità alla realtà dei risultati ottenuti.

In questa sede, data la natura del progetto in studio, l'analisi di sensitività è volta a determinare in che modo la conformazione e la tipologia della piattaforma oggetto della valutazione possa influenzare i risultati; a tal scopo è stata presa in considerazione la piattaforma "Bonaccia NW", una piattaforma *offshore* dall'altezza complessiva di 94 metri, dotata di 4 pozzi e poggiante su 4 *leg* di sostegno. Essa si compone di un *deck* su

3 livelli con imbarcadero integrato, di un *jacket* reticolare e di condotte di collegamento (fig. 10.27) [36].



Figura 10.27: Piattaforma Bonaccia NW

Tabella 10.12: Composizione merceologica dei materiali ricavabili dalla rimozione dalla piattaforma Bonaccia NW, secondo le stime di ENI S.p.A.

Materiale	Peso [t]		[%]	
	Ada3	Bonaccia NW	Ada 3	Bonaccia NW
Acciaio	48,7	2.178,7	21,8	88,2
Cemento	154,8	139	69,4	5,6
Residui ¹⁴	19,5	152,3	8,7	6,2
Totale	223	2.470	100	100

Sulla base della composizione merceologica riportata, i flussi di massa nel sistema di riciclo si modificano come segue (fig. 10.28).

¹⁴La categoria “Residui” comprende i materiali quali anodi, rivestimento e materiale organico, coerentemente con quanto riportato in precedenza

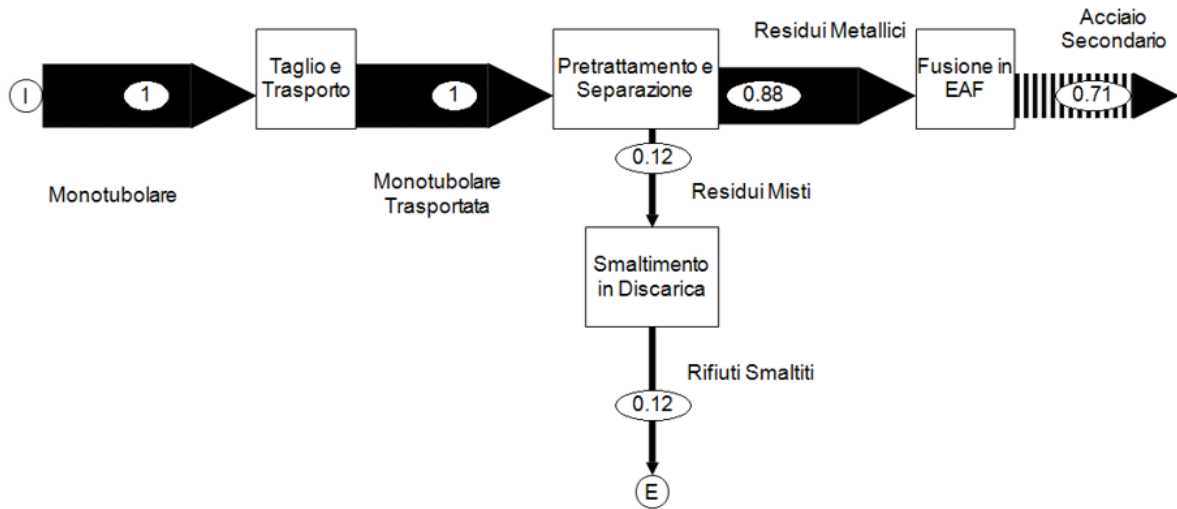


Figura 10.28: *Flussi di massa della filiera produttiva di acciaio secondario relativamente alla composizione dei materiali reperiti da Bonaccia NW*

Una volta ricalcolati i flussi di massa in ingresso ed in uscita, nonché i carichi ambientali, correlati al sistema in studio, è stato possibile procedere alla valutazione dei risultati ottenuti e sotto riportati, analogamente a quanto presentato per lo studio principale.

10.2. Analisi LCA

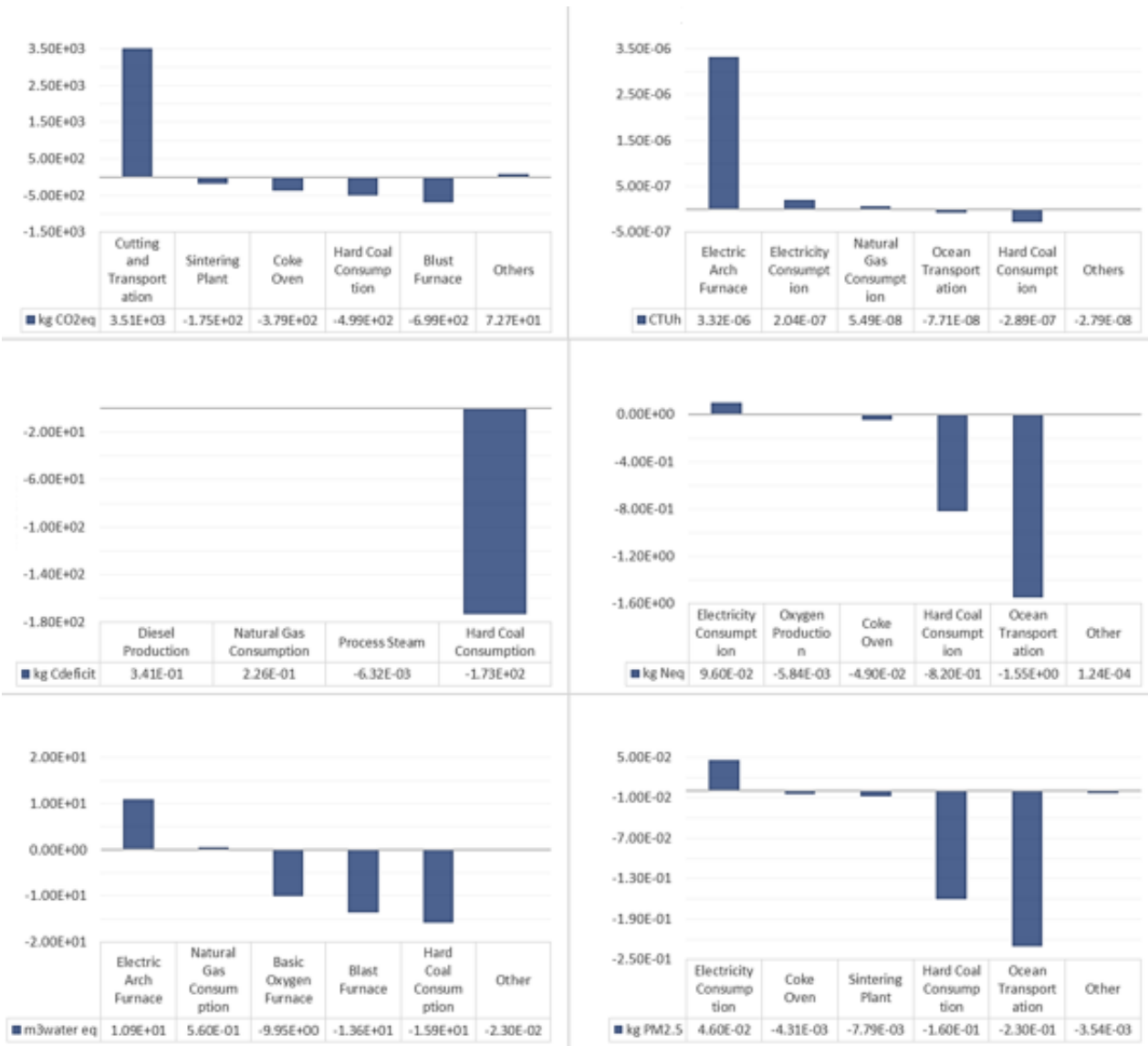


Figura 10.29: Analisi dei contributi dello studio riferito a Bonaccia NW

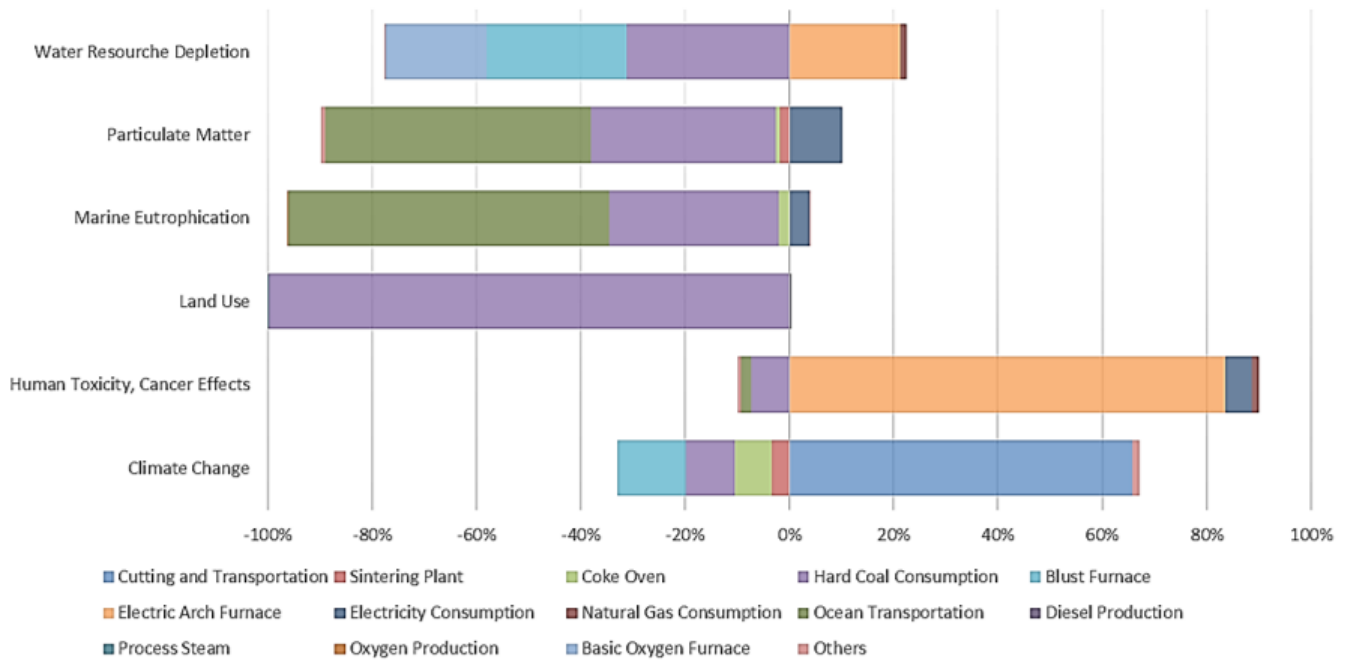


Figura 10.30: *Analisi dei contributi in termini percentuali dello studio riferito a Bonaccia NW*

Dai grafici riportati, si osservano diverse differenze rispetto ai risultati ottenuti nel caso della piattaforma "Ada 3". In primo luogo, la maggiore percentuale di acciaio avviabile a riciclo ottenibile da "Bonaccia NW" causa un incremento degli impatti legati al riciclo dell'acciaio, in particolare consumi elettrici, che si riflettono nella categoria "*Human Toxicity, Cancer Effects*", ma contestualmente permettono di ottenere una migliore prestazione ambientale globale, grazie agli impatti evitati legati alla mancata produzione di un maggior quantitativo di acciaio primario. In secondo luogo, la diversa composizione merceologica, aspetto che si riflette direttamente sul contributo delle diverse fasi di processo ai carichi ambientali finali, vede emergere all'interno della categoria "*Particulate Matter*" la voce compensativa del processo "*Coke Oven*" a discapito della fase di "*Cutting and Transportation*".

Al netto delle variazioni discusse finora, nel grafico sottostante viene rap-

10.3. Analisi Critica, Limiti e Considerazioni Finali

presentato l'esito dell'analisi di sensibilità. Le prestazioni ambientali del sistema basato sulla piattaforma "Bonaccia NW" risultano significativamente differenti rispetto a quello che considera "Ada 3" proprio a causa della maggior percentuale di acciaio su totale dei materiali risultanti dallo smantellamento della piattaforma più complessa, aspetto che si riflette direttamente in un ammontare superiore di impatti evitati: ciò consente di ottenere carichi ambientali notevolmente inferiori nella maggior parte delle categorie di impatto considerate, eccezion fatta per la categoria denominata "*Human Toxicity, Cancer Effects*", correlata direttamente all'attività di riciclo ed al relativo consumo di energia elettrica¹⁵.

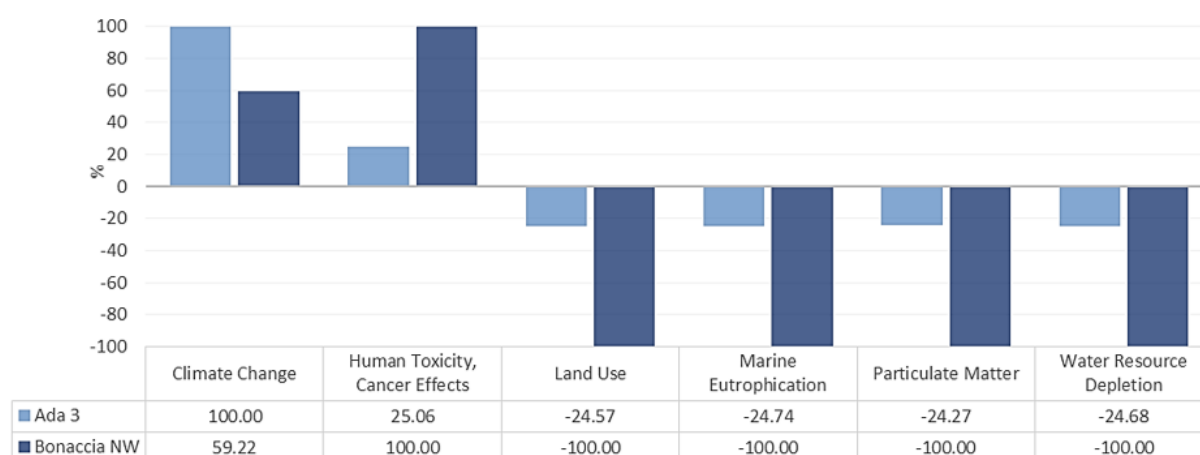


Figura 10.31: *Analisi dei contributi in termini percentuali dello studio riferito a Bonaccia NW*

10.3 Analisi Critica, Limiti e Considerazioni Finali

I risultati precedentemente presentati e discussi sono stati ottenuti sulla base delle ipotesi formulate e descritte nella *Goal and Scope Phase*: tali assunzioni, che hanno permesso la conduzione e la conclusione dello studio, rappresentano d'altro canto il punto di partenza per possibili mi-

¹⁵Per maggiori dettagli si rimanda al Paragrafo 10.2.4

10.3. Analisi Critica, Limiti e Considerazioni Finali

gliamenti da apportare allo studio in caso di sviluppi futuri. Certamente la scelta di siti impiantistici specifici a cui fare riferimento per la fase di inventario, con tutto ciò che comporta in termini di identificazione degli impatti da trasporto, rappresenta il primo fattore di debolezza dello studio; analogo ragionamento può essere effettuato per le informazioni relative alla struttura in dismissione. In secondo luogo, per quanto riguarda più nel dettaglio il processo di riciclo, l'analisi risulta carente di considerazioni sia in merito alle possibilità di recupero e riutilizzo del materiale ferroso appartenente alla piattaforma, rimasto in mare per oltre un ventennio, sia riguardo al coefficiente di sostituzione dell'acciaio secondario rispetto a quello vergine¹⁶ [14], valutazioni utili al calcolo preciso degli impatti evitati; considerazioni analoghe possono essere effettuate per la scelta di destinare a discarica il cemento recuperato dalla separazione dei materiali della piattaforma, materiale per cui, specialmente grazie alle politiche *green* intraprese, è possibile prevedere percorsi di riutilizzo al termine dei quali si configura in qualità di materiale inerte da riempimento o sottofondo. Considerando inoltre che le analisi LCA condotte fino ad ora si limitano a valutazioni basate su parametri chimico-fisici dei comparti abiotici, complice anche la difficoltà di determinare indici, categorie di impatto e modelli di caratterizzazione adeguati a rappresentare gli effetti sulla componente biologica, il presente elaborato risulta privo del calcolo di importanti contributi che sarebbe sicuramente opportuno approfondire: esistono quindi ampi margini di miglioramento, ottenibili colmando l'attuale mancanza in qualsiasi metodologia di caratterizzazione di categorie di impatto adeguate a descrivere danni ad ecosistemi, non tanto in termini di risorse consumate quanto in relazione alla perdita dei valori biotici ed abiotici causati dalla distruzione dell'habitat di riferimento per flora e fauna da oltre vent'anni.

¹⁶Nel presente elaborato, in mancanza di una corretta e dettagliata analisi a riguardo, il coefficiente di sostituzione è stato assunto pari al 100%

CAPITOLO *11*

Valutazioni di Impatto sulla Componente Biologica

Come accennato in precedenza, l'apertura e l'installazione di una struttura petrolifera modifica sensibilmente l'ambiente marino in cui si inserisce, a partire dalla circolazione delle correnti marine costituendo un nuovo elemento di dissipazione dell'energia oceanica. In risposta alla nuova struttura, la fauna ittica si distribuisce nel tempo lungo tutta la piattaforma sommersa [17]. Il substrato rappresentato dalla piattaforma fornisce l'habitat ideale per molti invertebrati sessili, tra cui cozze, cirri-pedi, capesante, spugne, tunicati, coralli e ostriche. Studi condotti sulle piattaforme site nel Golfo del Messico, dove la quantità di substrato naturale di crescita è limitata, stimano che le piattaforme offshore rappre-

sentino quasi il 30% dell'intero habitat costituente la "barriera corallina" del Golfo [17,42]). In tale contesto si presume che originariamente molti degli organismi epibiotici e delle specie ittiche che ora abitano le piattaforme offshore del Golfo, siano approdati a queste strutture come larve pelagiche trasportate dalle correnti marine ed ivi depositate per le ragioni di cui sopra: le larve di specie storicamente stanziato con successo nei pressi di una piattaforma e comunità che hanno raggiunto la maturità e la stabilità ecosistemica, non necessitano di ulteriori spostamenti alla ricerca di nuovi approdi sicuri.

Contrariamente alle osservazioni nel Golfo del Messico, le comunità faunistiche della California tendono a presentare una composizione specifica più simile a quelle che si trovano negli habitat naturali nelle vicinanze [17]: infatti gran parte degli habitat marini di piattaforma presenti nell'Oceano Pacifico riflettono il reclutamento di giovani pesci larvali e pelagici provenienti da fonti materne vicine e lontane, esercitando per giunta una certa attrazione dalle barriere coralline naturali [70]. Un altro recente progetto di monitoraggio di scogliere artificiali e progetti di rigetto-reef, avvenuto sull'isola del Borneo negli ultimi anni, ha mostrato la tendenza da parte di vaste popolazioni di coralli molli e duri a stabilirsi sulle piattaforme dismesse ed affondate, popolazioni eterogenee in dimensioni, età e caratteristiche [7].

Il successo di queste barriere artificiali nell'attrarre e concentrare i pesci ha incoraggiato lo studio per la valutazione del rapporto costo-efficacia e la praticità di vari materiali da costruzione della barriera corallina. All'inizio degli anni '60 furono costruite tre barriere coralline separate a Malibu, Santa Monica e Hermosa Beach a 60 piedi d'acqua, composte da materiali differenti: carrozzerie, un tram, roccia di cava e casse di cemento. Le osservazioni di diversi anni indicano che la scogliera di cemento è la più efficace nell'attrarre la fauna, grazie al suo potenziale di colonizzazione e produzione di organismi della barriera corallina, costi-

tuendo quindi un materiale economico e produttivo [54].

Mentre la rimozione completa eliminerebbe probabilmente la biomassa esistente di pesci e invertebrati e la relativa produzione secondaria, i potenziali impatti della rimozione parziale sarebbero probabilmente trascurabili. Si stima che in media l'80% della biomassa ittica totale e l'86% della produzione ittica secondaria verrebbero preservati dopo la rimozione parziale [25].

La rimozione parziale, data la natura delle operazioni necessarie, comporterebbe quindi la perdita di biomassa ittica e di specie che tipicamente risiedono nelle porzioni più superficiali della struttura della piattaforma, che rappresentano generalmente una piccola parte della popolazione associata a queste piattaforme. Tuttavia anche quest'ultima opzione, che pare la più conservativa, comporta con ogni probabilità una riduzione nel tempo dello spessore e della complessità degli habitat, in particolare per quanto riguarda i cumuli di conchiglie e gusci che circondano le piattaforme e ne rappresentano il principale sussidio alimentare associato al declino degli invertebrati, come anche una possibile perdita completa di questo habitat [13]: questi cumuli rappresentano scogliere biogene risultanti da un accumulo di gusci di molluschi caduti dalle aree poco profonde che circondano le piattaforme [25].

In conclusione, le piattaforme offshore mantengono comunità altamente diversificate di fauna ittica e invertebrati, includendo habitat sia per l'insediamento che per la crescita, con la catena alimentare spesso dominata dalle specie predatrici, come ad esempio lo scorfano. Queste comunità risultano simili a quelle delle barriere coralline naturali, presentando tuttavia una maggiore densità e dimensioni individuali per molte specie, in particolare cozze, stelle marine e scorfani [19, 56]. La caduta di materiale organico dalla parte superiore della struttura della piattaforma verso il basso aiuta a sostenere le comunità, alimentando la catena trofica con cumuli di conchiglie. La modellazione della dispersione larvale suggerisce

che le piattaforme forniscano un'importante opportunità per il reclutamento di larve di pesce oltre al fatto che molte di esse non lasciano la piattaforma per stabilirsi altrove [56]: è probabile che le specie predate coinvolte siano principalmente attratte dalla struttura per la sua presenza fisica e non per l'effettiva presenza di una maggiore produttività, nutrendosi in gran parte di prede planctoniche e pelagiche non associate alle piattaforme; i predatori, tuttavia, chiaramente beneficiano delle nuove condizioni.

Rappresentando una parte considerevole dell'habitat marino artificiale, le strutture O&G dopo decenni in mare, supportano in maniera incisiva le comunità biologiche ed il metodo di dismissione ha quindi implicazioni ecologiche quantomeno locali, se non regionali. La valutazione degli effetti ambientali della disattivazione dovrebbe quindi basarsi su un approccio multidisciplinare che consideri i valori più ampi dell'ecosistema ospitato dalle strutture offshore, inclusi i benefici ecosistemici forniti dalle strutture e gli effetti negativi associati alla perdita di questo habitat di barriera e delle comunità biologiche ad esso associate, insieme a tali impatti maggiori tipicamente considerati durante le altre fasi del ciclo di vita della piattaforma: la dismissione, quindi, può anche essere intesa come opportunità per preservare gran parte delle comunità biologiche che abitano le piattaforme offshore, conservando così una risorsa ecologica che contribuisce alla produzione biologica a livello locale e regionale, aumentando contestualmente le risorse disponibili per sostenere gli sforzi che producono benefici ambientali e socioeconomici grazie ai costi evitati da tali operazioni.

Le operazioni di rimozione completa della piattaforma distruggerebbero tutti gli invertebrati sessili, i pesci e la maggior parte delle specie di invertebrati associati alla piattaforma, ovvero il complesso del biota di barriera associato alla struttura [25, 64]; nel caso sopravvivessero agli esplosivi e alla rimozione meccanica dell'habitat, dovrebbero disperder-

si ampiamente per cercare un altro habitat [19].

Alla luce di quanto presentato, le piattaforme offshore O&G potrebbero essere considerate *de facto* aree marine protette [19, 50], data la loro funzione di protezione del biota ed habitat dalla pesca, in particolare la pesca a strascico. Nelle regioni caratterizzate da habitat naturali frammentati, come ad esempio nel Mare del Nord o Golfo del Messico, le strutture possono incentivarne l'interconnessione su grandi distanze e possono rappresentare "trampolini di lancio" per le diverse specie presenti [12]. In alcuni casi, l'esclusione della valutazione della comunità biologica stabilitasi sulla struttura ha impedito di identificare i potenziali benefici ambientali dalle opzioni di "*leave in place*", producendo inoltre studi miopi ed incompleti. Le complesse operazioni di pianificazione, processo decisionale e l'attuazione della dismissione possono richiedere molti anni, tempo necessario ed adeguato per poter formulare adeguate valutazioni sull'ecosistema ed i traumi che potrebbe subire, con maggiori probabilità di identificare l'opzione di dismissione che comporta le migliori prestazioni globali; è auspicabile quindi che le valutazioni future si basino su un approccio ecosistemico, approccio che presuppone un'approfondita comprensione dei valori ecologici degli ecosistemi nei pressi delle piattaforme e del modo in cui esse interagiscono con gli habitat naturali e artificiali circostanti.

In generale, l'approccio ecosistemico vede come fulcro centrale la ricerca sull'ecologia delle strutture in dismissione e, finora, nella stragrande maggioranza dei casi si è concentrata solo su alcuni aspetti dalla natura non meramente biologica, come la produzione di pesce, che, contaminando le valutazioni con la materia economica, limita la comprensione degli effetti delle operazioni di smantellamento sugli ecosistemi. Un'apertura della ricerca agli aspetti della disattivazione ambientale che sono tipicamente meno studiati, come i taxa diversi dai pesci, ecologia trofica e dinamiche temporali, consentirebbe un passaggio verso una valutazio-

ne ambientale più completa e quantitativa. Tale approccio tuttavia dipende fortemente dalla disponibilità di dati a scale tassonomiche, spaziali e temporali più ampie e dettagliate rispetto a quelle che spesso sono disponibili.

Il progetto di rimozione in studio si svolge nel contesto del Mare Mediterraneo, bioma estremamente variegato e afflitto dalla più alta percentuale di habitat minacciati (32%) rispetto al Nord-Est Atlantico (23%), Mar Nero (13%) e Mar Baltico (8%) (Commissione europea, 2016). La particolare complessità e fragilità degli habitat mediterranei rappresenta un importante fattore nella pianificazione degli interventi offshore nelle regioni marittime dell'Unione Europea. Essendo il Mare Mediterraneo caratterizzato dalla presenza di specie non autoctone più degli altri Mari ed Oceani comunitari (Wise Marine, 2021)¹, è importante tenere a mente che la creazione di substrati ed habitat artificiali può favorire l'attestarsi di specie opportuniste, alcune delle quali non autoctone e conseguentemente alterare i delicati equilibri della biodiversità locale [31]. Il Mediterraneo è anche un importante habitat e punto di appoggio per gli uccelli marini, che ivi nidificano migrando nell'Oceano Atlantico dopo la stagione riproduttiva (EEA, 2020).

La necessità di proteggere gli habitat mediterranei derivanti dallo sviluppo delle strutture offshore può rappresentare una sfida per altri habitat ecologicamente preziosi, come gli habitat dei coralli di acque profonde che si trovano in alcune aree dell'Atlantico settentrionale [16, 47].

Risulta sempre più chiaro che la perdita di biodiversità ed il cambiamento climatico siano interconnessi, questioni da affrontate all'unisono, in quanto gli habitat marini costituiscono un elemento di stoccaggio del carbonio globale [61]. La biodiversità può inoltre mitigare gli impatti

¹Sebbene copra solo lo 0,82% della superficie oceanica globale e rappresenti 0,32% in termini di volume, il Mediterraneo ospita il 4 - 18% di tutte le specie marine conosciute con un'elevata frazione (circa 30%) di endemismo (Bianchi e Morri, 2000)

dei cambiamenti climatici, essendo i sistemi diversificati più resilienti agli impatti negativi dei cambiamenti climatici. Pertanto, qualsiasi perdita della ricchezza biologica marina dovuta all'implementazione delle strutture offshore può essere controproducente anche in relazione alla capacità di ripresa dagli effetti dei cambiamenti climatici. In seguito si riporta la tabella di sintesi dei potenziali effetti ambientali delle attività di rimozione della piattaforma offshore; gli impatti sono riferiti agli 11 descrittori sulla base dei quali vengono effettuate le valutazioni previste dalla direttiva 2008/56/CE².

Tabella 11.1: *Potenziali effetti ambientali delle attività di rimozione della piattaforma offshore riferiti agli 11 descrittori di buono stato previsti dalla direttiva 2008/56/CE*

Descrittore GES	Effetti della Rimozione	Riferimenti
-----------------	-------------------------	-------------

(Continua alla pagina successiva)

²La direttiva europea 2008/56/CE definisce i criteri e le norme metodologiche per la definizione del buono stato ecologico (GES) delle acque marine nonché le specifiche e gli standard di monitoraggio e valutazione

(Continua dalla pagina precedente)

Biodiversità: La qualità e la presenza di habitat nonché la distribuzione e l'abbondanza delle specie sono in linea con le prevalenti condizioni fisiografiche, geografiche e climatiche	Perdita di fragili habitat marini importanti per biodiversità, in particolare nelle aree protette	Gill, 2005 [29]; Perrow 2019 [58]; Love and Schroeder, 2006 [56]; Scarborough Bull et al., 2008 [19]; Inger et al., 2009 [50]; Schroeder e Love, 2004 [56]; Claisse et al., 2015 [25]; Pondella et al., 2015 [64]
	Disturbo alle specie vulnerabili e minacciate (uccelli, mammiferi e mare tartarughe) a causa di pile, ancore e cavi (compreso l'effetto di campi elettromagnetici e luci artificiali e rischi di entanglement)	Zettler e Pollehne, 2006 [80]; Vermeij et al., 2010 [78]; Bergström et al., 2014 [10]; Taormina et al., 2020 [74]; Anderson et al., 2021 [6], Farr et al., 2021 [40]; Bishop et al., 2017 [12];
	Perdita dell'effetto barriera artificiale: quando le strutture offshore vengono costruite, l'installazione di fondazioni e pali possono fornire spazio per insediamento, rifugio e foraggiamento per alcune specie (effetto positivo)	Vaissière et al. 2014 [76]; Hammar et al., 2016 [49]; Degraer et al., 2020 [33]; Sammarco, 2013 [70]
Specie non autoctone: Le specie non indigene introdotte dalle attività umane restano a livelli che non alterano negativamente gli ecosistemi.	Dispersione di specie indigene ed opportunistiche	De Mesel et al., 2015 [31]; Scarborough Bull et al., 2008 [19]

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Pesci e crostacei commerciali: Le popolazioni di tutti i pesci, molluschi e crostacei sfruttati a fini commerciali restano entro i limiti biologicamente sicuri, presentando una ripartizione della popolazione per età e dimensioni indicativa della buona salute dello stock.

Il progetto modificherebbe sostanzialmente gli equilibri produttivi dell'area marina di interesse, con conseguenze anche sulle specie ittiche di interesse commerciale

Sammarco, 2013 [70]

In assenza di pesca, solitamente vietata nei pressi delle piattaforme offshore, può venire incentivata la biodiversità e l'abbondanza di specie bentopelagiche e bentoniche che utilizzano la struttura come habitat, con potenziale effetti di spillover positivi

Halouani et al 2020 [48]; Degraer et al., 2020 [33]; Gill et al., 2021 [29]; Mavraki et al., 2021 [59]; Inger et al., 2009 [50]; Schroeder e Love, 2004 [56]; Bishop et al., 2017 [12]

Reti alimentari: Tutti gli elementi della rete trofica marina, nella misura in cui siano noti, sono presenti con normale abbondanza e diversità e con livelli in grado di assicurare l'abbondanza a lungo termine delle specie e la conservazione della loro piena capacità riproduttiva.

Perdita delle nuove comunità tipiche o atipiche colonizzatrici, specialmente bentoniche sessili, che hanno modificato le reti alimentari ed il ciclo biogeochimico

Wilhelmsson e Langhamer, 2014 [79]; Dannheim et al., 2020 [30]; Claisse et al., 2015 [25]; Pondella et al., 2015 [64]; Claisse et al. 2015 [25]

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Eutrofizzazione: L'eutrofizzazione di origine umana è ridotta al minimo, in particolare i suoi effetti negativi, come perdite di biodiversità, degrado di ecosistema, fioriture algali nocive e carenza di ossigeno nelle acque di fondo.

Integrità del fondale marino: L'integrità del fondale marino è ad un livello tale da garantire che la struttura e le funzioni degli ecosistemi siano salvaguardate e gli ecosistemi bentonici, in particolare, non abbiano subito effetti negativi.

Alterazioni dell'habitat dovute allo smantellamento di fondazioni, pali, cavi ed ancoraggi, come anche dalla perlustrazione del fondale marino

Gill, 2005 [29]; Wilhelmsson e Langhamer, 2014 [79]; Slavik et al., 2019 [71]; Perrow, 2019 [58]; Degraer et al., 2020 [33]; Coolen et al., 2020 [27]

Condizioni idrografiche: La modifica permanente delle condizioni idrografiche non influisce negativamente sugli ecosistemi marini.

Cambiamenti prevalentemente nella dinamica oceanica che portano a variazioni locali di produttività primaria, flusso di carbonio al benthos e trasporto larvale. I processi oceanografici che potrebbero essere influenzati includono turbolenza, energia delle onde di superficie, correnti in entrata e di risalite

Christensen et al. 2013 [24]; Clark et al., 2014 [26]; Ludwig, 2015 [57]; Carpenter et al., 2016 [21]; Grashorn e Stanev, 2016 [44]; Floeter et al., 2017 [41]; van Berkel et al 2020 [77]; Dannheim et al., 2020 [30]; Gill et al., 2020 [29]; Aktar et al., 2021; Claisse et al. 2015 [25]

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Contaminanti nell'ambiente marino: Le concentrazioni dei contaminanti presentano livelli che non danno origine ad effetti inquinanti.

Contaminazione da emissioni chimiche, inclusi composti organici e metalli derivanti dalle operazioni della fase di cantiere e di fuoriuscita di fluidi residui dalla struttura

Kirchgeorga et al, 2018 [52]; Farr et al., 2021 [40]; Bernstein et al., 2010 [11]

Modifiche alla qualità dell'acqua causate dall'aumento della torbidità dell'acqua locale derivante dovuta al sollevamento di solidi sospesi durante le operazioni

Gill, 2005 [29]; Perrow, 2019 [58]

Contaminanti nella fauna ittica: I contaminanti presenti nei pesci ed in altri prodotti della pesca destinati al consumo umano non eccedono i livelli stabiliti dalla legislazione comunitaria o da altre norme pertinenti.

Sconosciuto

Rifiuti marini: Le proprietà e le quantità di rifiuti marini non provocano danni all'ambiente marino e costiero.

Sconosciuto

(Continua alla pagina successiva)

(Continua dalla pagina precedente)

Energia e fonti sonore: Rumore e vibrazioni marine significative da imbarcazioni e mezzi per le operazioni di taglio, smontaggio e trasporto Gill, 2005 [29]; Bernstein et al., 2010 [11]; Perrow 2019 [58]; Defingou et al., 2019 [32]; Stanley et al., 2020 [62]; Farr et al., 2021 [40]

L'introduzione di energia, comprese le fonti sonore sottomarine, è a livelli che non hanno effetti negativi sull'ambiente marino.

CAPITOLO *12*

Progetto Alternativo

Sulla base dei risultati ottenuti, si propone un progetto alternativo alla rimozione totale, fondato sulle ricerche condotte da PlaCE e sui principi di riutilizzo, costituito dalla realizzazione di una piattaforma base per lo studio e l'osservazione marina: il progetto prevede il riutilizzo della struttura preesistente, migliorando la porzione del deck attraverso il suo ampliamento, in modo che possa essere adibita a postazione di osservazione ed ospitare tecnologie ed operazioni dedicate allo scopo. Si prevede, inoltre, l'applicazione della tecnologia di accrescimento minerale lungo la struttura portante, in modo da migliorarne le qualità di resistenza meccanica, limitarne il deterioramento ed estendere l'orizzonte temporale del progetto grazie alla protezione che l'accresciuto strato minerale offre contro la corrosione marina, in particolare delle armature

strutturali.

Tale progetto nasce dall'osservazione del peculiare ecosistema sviluppatosi nel corso dei decenni nei pressi della piattaforma e dalla considerazione che il progetto standard di rimozione completa della stessa possa rappresentare lo sconvolgimento se non la distruzione di tale habitat [18], con conseguenti danni ambientali che è necessario quantificare per poter procedere ad una realistica valutazione ambientale dell'intervento. Si procede quindi presentando una valutazione economica, in modo da determinare l'entità del possibile budget di progetto che può essere meglio definito sulla base delle valutazioni contenute nel presente documento ed in relazione alle facoltà decisionali delle autorità o enti preposti alla valutazione delle caratteristiche tecnologiche ed infrastrutturali dell'hub, nonché della bontà economica del progetto, tenendo conto che la struttura andrà comunque rimossa al termine della vita utile del progetto alternativo, nel rispetto della normativa vigente.

12.1 Analisi DCFA

La valutazione economica condotta nel presente elaborato, a causa della mancanza di informazioni relativamente al progetto alternativo, mira a delineare i principali costi di massima del progetto di rimozione totale, proponendo successivamente l'analisi dei vantaggi conseguenti alla partecipazione dell'investimento economico necessario e la definizione di un limite di investimento oltre il quale l'operazione di *decommissioning* alternativo non porterebbe ad alcun vantaggio, dal punto di vista meramente economico.

Di seguito si propone un richiamo schematico delle operazioni e dei mezzi coinvolti, la cui identificazione ha permesso il calcolo dei costi base di progetto.

Fase Preparatoria

Prima delle operazioni di taglio sono necessarie delle fasi preparatorie per rimuovere, dove necessario, lo strato di accrescimento marino, in particolar modo nelle zone di manovra della macchina per il taglio; per analoghe motivazioni è necessario praticare uno scavo alla base della monotubolare dalle dimensioni di 7,5 x 5,5 m e profondo 1,7 m. Una volta installate e montate le piattaforme di lavoro e posizionati i mezzi navali, avviene la messa in sicurezza dei diversi punti critici della struttura, in particolare imbarcadero, pianetto, punti di ancoraggio delle pulegge e la testa del condotto.

Fase di Rimozione

Una volta collegate le braghe ed il gancio di sollevamento, oltre ai cavi di controllo, esse vengono tensionate fino a supportare circa il 70% del peso della monotubolare da sollevare; a questo punto viene effettuato il taglio a filo diamantato, con assistenza di sommozzatori e ROV . Una volta completato il taglio, la struttura viene definitivamente sollevata, posizionata ed ammainata sul pontone di trasporto e successivamente trainata in cantiere.

I mezzi navali utilizzati a noleggio per la fase di rimozione sono i seguenti:

- Nr 1 pontone di trasporto provvisto di supporti e materiale di rizzaggio e collegamento;
- Nr 1 nave gru a braccio fisso/girevole completamente equipaggiato e provvista di equipaggiamento per sommozzatori e ROV, sistema di taglio a filo diamantato tipo 106”DWCM o similare, sistema per scavo o draganti;
- Nr 1 mezzo di supporto;

- Nr 1 rimorchiatore navale.

Fase di Monitoraggio

Il programma di monitoraggio ambientale è previsto nelle diverse fasi del progetto con l'obiettivo di rilevare i potenziali effetti derivanti dal progetto di rimozione su flora, fauna ed ecosistemi marini, attraverso analisi geomorfologiche, chimiche, fisiche e biologiche. Senza scendere nei dettagli delle analisi ambientali effettuate, si precisa che esse verranno condotte in due momenti distinti, prima e dopo le operazioni, e che terranno conto della caratterizzazione delle acque, dei sedimenti e della comunità bentonica ed ittica.

Sulla base delle operazioni e dei mezzi coinvolti nel progetto, è possibile procedere alla quantificazione preliminare di massima dei costi che rappresentano, all'interno dell'analisi DCFA, il valore del CAPEX relativo al progetto di rimozione (tabella 12.1).

Tabella 12.1: *Stima dei costi legati al progetto di rimozione completa*

Voce di Costo	Valore Stimato [€]
Ingegneria e <i>Project Manager</i>	180.000
Mobilizzazione e Smobilizzazione dei Mezzi Navali	700.000
Operazioni <i>Offshore</i>	1.200.000
Smantellamento, Smaltimento e Recupero	70.000
Assicurazione ed Altri Costi	80.000
Spesa Complessiva	2.230.000

L'analisi di seguito proposta si fonda sull'assunzione genericamente adottata dal settore finanziario secondo la quale il progetto o scenario in cui sarebbe auspicabile investire è quello che presenta il parametro NPV più elevato; applicando tale norma al caso in esame, sarebbe opportuno optare per il progetto di decommissioning alternativo se

$$NPV_{\text{progettoalternativo}} > NPV_{\text{standarddecommissioning}}$$

Richiamando quanto definito in precedenza, nonostante il progetto alternativo alla rimozione totale della piattaforma si costituisca come "*leave in place*" dell'intera struttura in modo che continui a fornire i servizi ecosistemici che la caratterizzano attualmente, si prevede in ogni caso di procedere alla rimozione della piattaforma al termine dell'orizzonte progettuale definito e supposto pari a 30 anni: la valutazione di seguito riportata si pone come obiettivo quindi la definizione di un ipotetico budget di progetto che consenta l'applicazione iniziale della tecnica di accrescimento minerale ed il sostenimento di eventuali spese di mantenimento, il tutto rispettando il vincolo della convenienza dell'investimento economico nel progetto alternativo rispetto alla rimozione completa. Si procede quindi definendo per prima cosa l'investimento iniziale massimo sostenibile ($BUDGET_{\text{max}}$) calcolato come segue, ipotizzando nulle le spese di mantenimento¹

$$NPV_{\text{standarddecommissioning}} = -CAPEX$$

$$NPV_{\text{progettoalternativo}} =$$

$$-(CAPEX_{t=30\text{anni}} + BUDGET_{\text{progettoalternativo,max}}) =$$

¹Si noti che i termini presenti nell'equazione compaiono tutti con il segno negativo poiché, a causa della natura dei progetti in esame che non prevede introiti, rappresentano le spese sostenute

$$-\left[\frac{CAPEX}{(1+i)^{30}} + BUDGET_{\text{progettoalternativo,max}}\right]$$

ove

$$CAPEX = 2.230.000 \text{ €}$$

$$i = 0,054^2$$

Tabella 12.2: *Calcolo del budget massimo di spesa per la realizzazione del progetto alternativo*

CAPEX _{standard decommissioning}	2.230.000 €
Anni di posticipazione della spesa	30 anni
Tasso di Sconto	0,054
BUDGET _{progetto alternativo, max}	1.769.652 €

In secondo luogo viene definito un budget di progetto effettivo (BUDGET) inferiore a quello appena calcolato. Infine, sulla base della spesa definita da sostenere inizialmente per l'avvio del progetto, vengono determinate le spese di mantenimento e operative annuali massime (OPEX) che è possibile sostenere. Si definisce quindi

$$NPV_{\text{standarddecommissioning}} = -CAPEX$$

²Tale valore del tasso di sconto è stato desunto dall'articolo di Leporini et al. (2019). Considerando che il tasso di sconto è legato alla tassazione ed al livello di inflazione vigente, è stato ritenuto opportuno riferirsi alle condizioni pre-pandemiche legate all'epidemia di COVID-19, le cui conseguenze hanno modificato e drogato sensibilmente il mercato e gli equilibri economici mondiali

$$NPV_{\text{progettoalternativo}} =$$

$$-(CAPEX_{t=30\text{anni}} + BUDGET_{\text{progettoalternativo}} + DCF_{t=30\text{anni}}) =$$

$$-\left[\frac{CAPEX}{(1+i^{30})} + BUDGET_{\text{progettoalternativo}} + \sum_{t=1}^{30} \frac{OPEX}{(1+i^t)}\right]$$

ove

$$CAPEX = 2.230.000 \text{ €}$$

$$i = 0,054$$

$$BUDGET_{\text{progetto alternativo}} = 1.500.000 \text{ €}$$

Si riportano in tabella i risultati ottenuti dalla risoluzione delle equazioni di sopra, sulla base delle ipotesi dichiarate

Tabella 12.3: *Calcolo dei costi operativi massimi ammissibili sulla base del budget effettivo ipotizzato per la realizzazione del progetto alternativo*

CAPEX_{standard decommissioning} 2.230.000 €

Anni di posticipazione della spesa 30 anni

Tasso di Sconto 0,054

BUDGET_{progetto alternativo} 1.500.000 €

OPEX 18.349,07 €

Calcolo dei Flussi di Cassa Attualizzati

Anno dopo la realizzazione del progetto	Flusso di Cassa	Valore [€]
1	DCF1	17.408,98

(Continua alla pagina successiva)

12.1. Analisi DCFA

(Continua dalla pagina precedente)

2	DCF2	16.517,06
3	DCF3	15.670,84
4	DCF4	14.867,97
5	DCF5	14.106,23
6	DCF6	13.383,52
7	DCF7	12.697,84
8	DCF8	12.047,28
9	DCF9	11.430,06
10	DCF10	10.844,46
11	DCF11	10.288,86
12	DCF12	9.761,73
13	DCF13	9.261,60
14	DCF14	8.787,10
15	DCF15	8.336,91
16	DCF16	7.909,78
17	DCF17	7.504,53
18	DCF18	7.120,05
19	DCF19	6.755,26
20	DCF20	6.409,17
21	DCF21	6.080,81
22	DCF22	5.769,26
23	DCF23	5.473,69

(Continua alla pagina successiva)

12.1. Analisi DCFA

(Continua dalla pagina precedente)

24	DCF 24	5.193,25
25	DCF25	4.927,18
26	DCF26	4.674,75
27	DCF 27	4.435,24
28	DCF28	4.208,01
29	DCF29	3.992,42
30	DCF30	3.787,87
	Totale	269.651,7

L'analisi ed i calcoli sopra riportati permettono di definire ed individuare innanzitutto la convenienza derivante dalla posticipazione dei costi di rimozione ed in secondo luogo consentono di individuare i limiti finanziari da poter mettere a disposizione del progetto alternativo affinché possa venire accettato in qualità di adeguato progetto di riuso dalle autorità competenti preposte alla valutazione: richiamando infatti quanto descritto nel Capitolo 3, la normativa non considera l'abbandono dei pozzi una pratica lecita, imponendo conseguentemente la rimozione delle infrastrutture ad essi correlate a meno che non venga presentato e sottoposto a valutazione un idoneo progetto di riutilizzo che consenta di prolungarne la permanenza *in loco*. Si noti che, al termine dei progetti che la coinvolgono, ai sensi della normativa vigente si prevede che la piattaforma dovrà essere rimossa in ogni caso.

Nell'ambito della presente valutazione, si propone l'applicazione della tecnologia di accrescimento minerale come strumento migliorativo dell'inserimento ambientale e contestualmente di prolungamento dell'oriz-

zonte di integrità strutturale della piattaforma³, sulla base della quale definire un progetto di riuso alternativo da sottoporre alla commissione valutativa.

A causa della carenza di informazioni precise attualmente disposizione riguardo l'applicazione della tecnica di accrescimento minerale alle piattaforme, è risultato impossibile determinare le spese di investimento e di mantenimento necessarie per la realizzazione dell'opera; si è conseguentemente deciso di condurre ugualmente l'analisi economica in modo da proporre diverse soluzioni in funzione delle necessità progettuali che si costituiranno una volta che la ricerca in corso avrà definito le relative modalità tecniche e pratiche necessarie: sulla base dei risultati ottenuti si propongono quindi due possibili scenari di finanziamento dell'opera, a seconda che la struttura nella sua nuova veste di scogliera artificiale necessiti di spese di mantenimento ed operative o meno.

12.1.1 Primo Scenario di Valutazione Economica

Il primo scenario si basa sull'ipotesi che per l'applicazione della tecnica di accrescimento minerale sia necessario un solo investimento iniziale per l'acquisto delle barre che costituiscono gli elettrodi, il relativo posizionamento e messa in opera, le operazioni necessarie per l'adeguata esecuzione del progetto, assicurazioni e noleggio dei macchinari inclusi, e consumo elettrico finale necessario per la formazione di un corretto sostrato di carbonati strutturali che svolgeranno per tutto l'orizzonte di progetto una funzione protezione e rinforzo. Poiché i particolari tecnici correlati a quest'ultimo aspetto, in particolare consumo energetico e tempistiche di applicazione, non sono stati ancora chiaramente definiti, ci si limita a proporre un valore di spesa massima ammissibile, pari a circa 1.770.000 €, perché la scelta di realizzare il progetto alternativo,

³Si faccia riferimento al Capitolo 6

piuttosto che rimuovere la piattaforma, risulti finanziariamente sensata: in definitiva se le spese del progetto compiuto risultano inferiori a tale valore, l'investimento trentennale effettuato risulta positivo in termini di NPV.

12.1.2 Secondo Scenario di Valutazione Economica

Il secondo scenario invece prevede che le spese legate all'esecuzione del progetto non si limitino all'investimento iniziale definito per il primo scenario ma si prolunghino lungo tutto l'orizzonte progettuale in termini di spese operative e di mantenimento. L'ipotesi di lavoro in questo caso è che tali spese, indipendentemente dalla ripartizione infrannuale delle stesse, si ripropongano ogni anno con lo stesso importo. Definendo quindi un importo iniziale inferiore al caso precedente, pari a 1.500.000 €, è possibile calcolare la spesa annuale massima sostenibile annualmente per i 30 anni di progetto, dall'ammontare pari a circa 18.400 €: anche in questo caso, rispettando gli importi massimi così come descritto, l'investimento trentennale effettuato risulta positivo in termini di NPV.

CAPITOLO *13*

Discussione e Limiti dello Studio

Lo studio condotto ha permesso di identificare i principali effetti correlati alla rimozione totale della piattaforma, pur sottostando a forti ipotesi di ricerca che ne costituiscono i principali limiti.

In sintesi, i risultati LCA mostrano come l'insieme delle operazioni navali e della fase di fusione del rottame ferroso della piattaforma rappresentino complessivamente la maggiore causa degli impatti del progetto di rimozione, questi ultimi tuttavia compensati dal carico ambientale evitato legato alla produzione di acciaio vergine. L'analisi di sensibilità ha mostrato come la tipologia di piattaforma coinvolta e le sue caratteristiche possano incidere sulla valutazione degli impatti, indicando che all'aumentare della percentuale dell'acciaio nella composizione della struttura si riduce l'impatto complessivo del progetto, in relazione all'incremento

della quota di impatti evitati grazie al riciclo dell'acciaio.

Per quanto riguarda l'incidenza sul comparto biotico, è stata proposta una valutazione qualitativa degli impatti potenziali delle operazioni sulla base della letteratura disponibile, in modo da porre le basi per una successiva valutazione quantitativa attraverso la formulazione di appositi indici di impatto.

Attraverso l'analisi economico-finanziaria, una volta definita una proposta alternativa alla rimozione totale, è stato possibile non solo valutare i vantaggi derivanti dalla posticipazione dei costi di rimozione, ma anche proporre degli esempi di possibili strategie di finanziamento del progetto alternativo che garantirebbero comunque la bontà economica dell'operazione sull'orizzonte progettuale scelto: nell'ambito del presente elaborato si suppone che tali spese vengano utilizzate a supporto alla realizzazione del progetto alternativo ed all'applicazione della tecnica di accrescimento minerale alla piattaforma lasciata *in loco* ed adibita ad *artificial reef*.

Infine, non è stato possibile quantificare gli impatti biotici ed abiotici legati alla tecnologia di accrescimento minerale a causa dell'attuale mancanza di dati ed informazioni legate all'applicazione di tale tecnica, tuttavia la considerazione fondamentale per la presente proposta è che tale progetto alternativo permetterebbe di evitare gli impatti negativi descritti nel capitolo precedente pur se, data la natura e l'ambito del progetto, il quale ricade in larga parte nell'ambito trofico-biologico, è bene evidenziare la carenza di metodologie e modelli per il calcolo degli impatti e dei miglioramenti legati alla sfera biotica ed ecosistemica. A tal proposito, è importante sottolineare che nella valutazione degli impatti legati al progetto di riuso ed estensione della vita della piattaforma per la realizzazione di un *artificial reef*, coerentemente con lo studio effettuato sullo *standard decommissioning*, andrebbe condotta un'analisi LCA *ad hoc*, che non si ha avuto modo di sviluppare nell'ambito del presente elabo-

rato, valutando in tale sede anche gli impatti evitati correlati all'evitata costruzione di un nuovo progetto della stessa tipologia.

CAPITOLO *14*

Conclusioni

Lo studio condotto prende spunto dalla progetto RELife, adattandone la metodologia al caso della piattaforma "Viviana 1" con l'obiettivo di valutare gli impatti correlati alle operazioni di rimozione totale di tale struttura, costituire un documento di valutazione preliminare e proporre un progetto di riutilizzo alternativo in veste di stazione di osservazione dell'ecosistema marino e contestuale *artificial reef*, attraverso l'implementazione della tecnologia di accrescimento minerale come opportunità di miglior inserimento ambientale ed estensione della vita utile della rinnovata infrastruttura.

A casusa dell'impossibilità di reperire documenti ed informazioni relativamente alla piattaforma "Viviana 1" si è reso necessario adottare le informazioni disponibili alla piattaforma "Ada 3", analoga per caratteri-

stiche e conformazione.

L'analisi LCA è stata impostata in modo da comprendere nel sistema principale le operazioni di taglio e rimozione, trasporto, trattamento e separazione del materiale e le operazioni di riciclo dell'acciaio ricavato; grazie all'espansione dei confini di sistema è stato possibile determinare gli impatti di produzione di acciaio vergine, evitati grazie a tale riciclo, includendo quindi la fase di approvvigionamento delle materie prime, le unità di processo per la produzione di coke, sinter, ghisa ed acciaio. L'analisi di sensibilità condotta in relazione alla piattaforma "Bonaccia NW" ha mostrato la sostanziale dipendenza della valutazione dalla struttura e relativa composizione di materiali, in particolare dal quantitativo di acciaio: indubbiamente una piattaforma monotubolare rappresenta un caso particolare di piattaforma offshore, essendo privo di *jacket* e *deck*, e la sua peculiare conformazione limita in maniera incisiva i vantaggi derivanti dall'esiguo quantitativo di acciaio recuperabile dalla piattaforma avviato a riciclo.

La proposta alternativa alla rimozione totale è stata sottoposta a valutazione economica, in modo da verificarne e quantificarne il campo di applicabilità su un orizzonte temporale di 30 anni.

In conclusione, la presente ricerca può costituire una solida analisi preliminare e rappresentare una base per studi futuri riguardo il *decommissioning* di piattaforme *offshore* e gli impatti delle operazioni ad esso correlate, fornendo quindi gli strumenti necessari ed utili alla corretta formulazione e valutazione dei progetti da parte delle amministrazioni e *stakeholder* coinvolti.

Attualmente, la letteratura disponibile in merito alle operazioni su strutture *offshore* si concentra principalmente sulle strutture per lo sfruttamento dell'energia eolica; i pochi studi LCA presenti riguardanti le piattaforme O&G offshore risultano sostanzialmente riferiti al contesto del Mare del Nord o desumono da tali studi dati ed inventari pur collocando-

si in aree geografico-culturali completamente differenti, producendo così studi di riferimento spuri, non formulati ad hoc per l'oggetto dell'analisi. La presente analisi getta le basi per una migliore e più approfondita ricerca futura, volta al superamento dei limiti dell'attuale relazione. In primo luogo, il confronto tra le due alternative proposte, ovvero la rimozione totale e la trasformazione della piattaforma in scogliera artificiale, risulta essere quantomeno incompleto a causa delle ipotesi effettuate riguardo i materiali, le operazioni ed i consumi coinvolti nella realizzazione del progetto alternativo, aspetti che devono essere ancora chiariti dalla ricerca in corso e che permetteranno di quantificare nel dettaglio gli impatti e costi ad essi correlati. In secondo luogo, la mancata definizione di impianti specifici per le operazioni di cantiere, trattamento e fusione legate allo scenario di rimozione rende la valutazione generale e meno specifica, aprendo ampie possibilità di miglioramento una volta identificati. L'analisi di sensibilità condotta al termine dello studio LCA mostra come la composizione merceologica dei materiali della piattaforma risulti determinante nella valutazione degli impatti, anche evitati, della filiera di riciclo e smaltimento.

A conclusione dello studio, si sottolinea nuovamente che la carenza di informazioni riguardo il risultante materiale composito di acciaio e carbonati strutturali, ottenuto con l'applicazione della tecnica di accrescimento minerale, rappresenta un forte vincolo per le valutazioni progettuali che potrebbero prevedere orizzonti temporali ben diversi dai 30 anni supposti, definiti in analogia alle valutazioni solitamente effettuate per le infrastrutture pubbliche: sarebbe opportuno quindi valutare, al termine del periodo, lo stato di conservazione e degrado della struttura in modo da considerare la possibilità di prolungamento della permanenza *in loco* della scogliera artificiale, incrementando in questo modo i relativi benefici ambientali ed economici.

Confidando nella produzione di ulteriori indagini di impatto ed LCA

sul tema, in futuro sarà possibile superare le difficoltà incontrate nella formulazione dell'attuale valutazione come la scarsa presenza di informazioni sulla piattaforma, la complessa analisi condotta sul sistema di produzione di acciaio primario per la quantificazione degli impatti evitati nonché la scelta dell'adeguata unità funzionale. Sarebbe inoltre opportuno produrre, sulla base della valutazione qualitativa condotta, la quantificazione degli impatti sul comparto biotico, aspetto che esula dalla mera indagine LCA ma che risulta determinante per le caratteristiche dei progetti in esame: sicuramente la materia ambientale necessita di approcci interdisciplinari e misti per una corretta comprensione dei meccanismi che ne determinano gli impatti tanto sul comparto biotico quanto sul comparto abiotico, aspetto che potrebbe certamente essere migliorato all'interno delle valutazioni ambientali condotte anche a livello statale.

Parte III

Appendici

APPENDICE *A*

Diagrammi di Sankey

Si riportano i “Diagrammi di Sankey” relativamente al sistema in studio, per le sei categorie di impatto considerate: “*Climate Change*”, “*Human Toxicity, Cancer Effects*”, “*Land Use*”, “*Marine Eutrophication*”, “*Particulate Matter*”, “*Water Resource Depletion*”. Tale diagramma permette di visualizzare, per una data categoria di impatto, i flussi più rilevanti ed incisivi nel determinare l’impatto complessivo calcolato; i flussi dotati di maggior spessore risultano essere quelli più determinanti, il cui contributo, positivo o negativo, viene rappresentato coerentemente ai colori riportati in legenda.

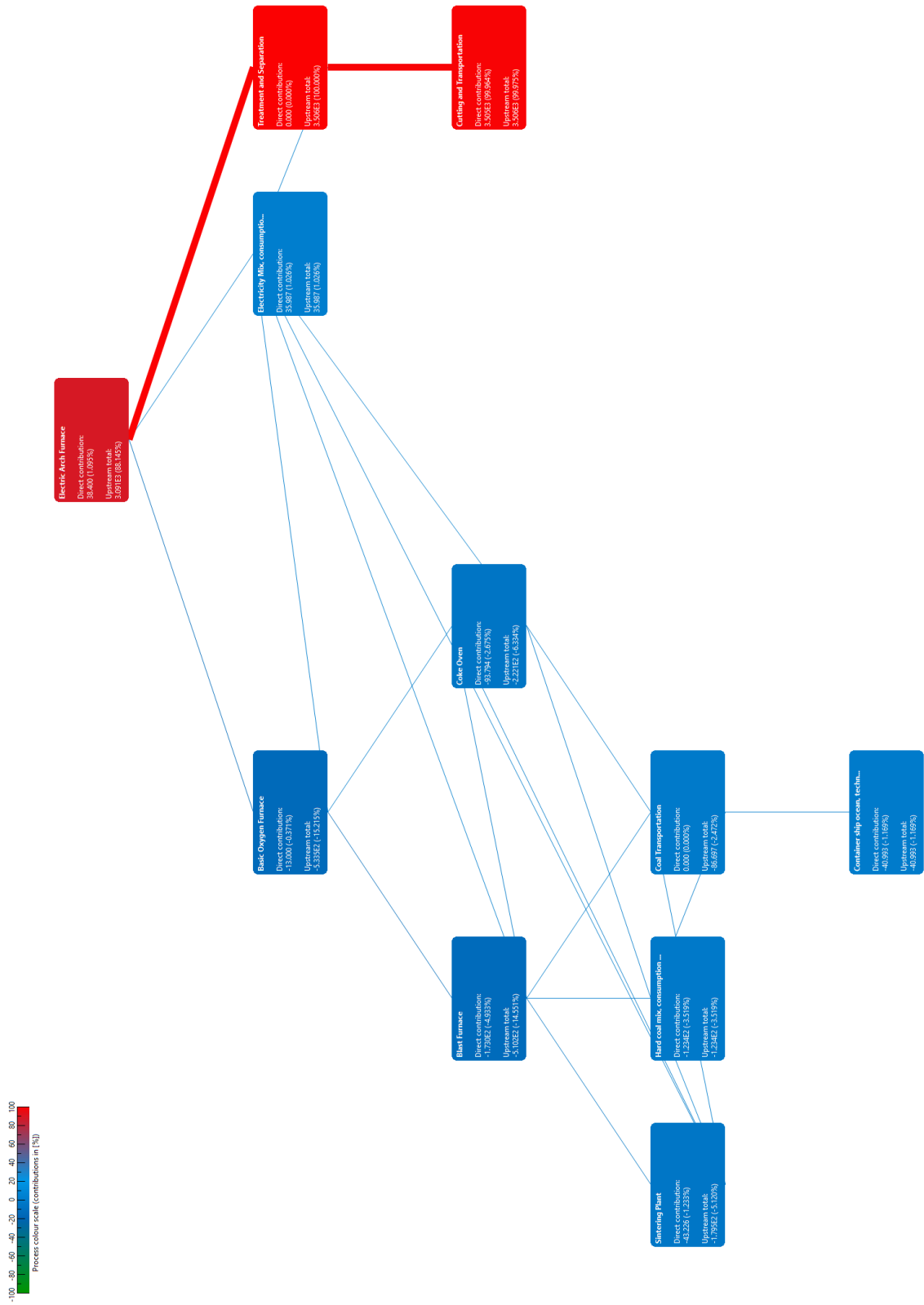


Figura A.1: Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Climate Change

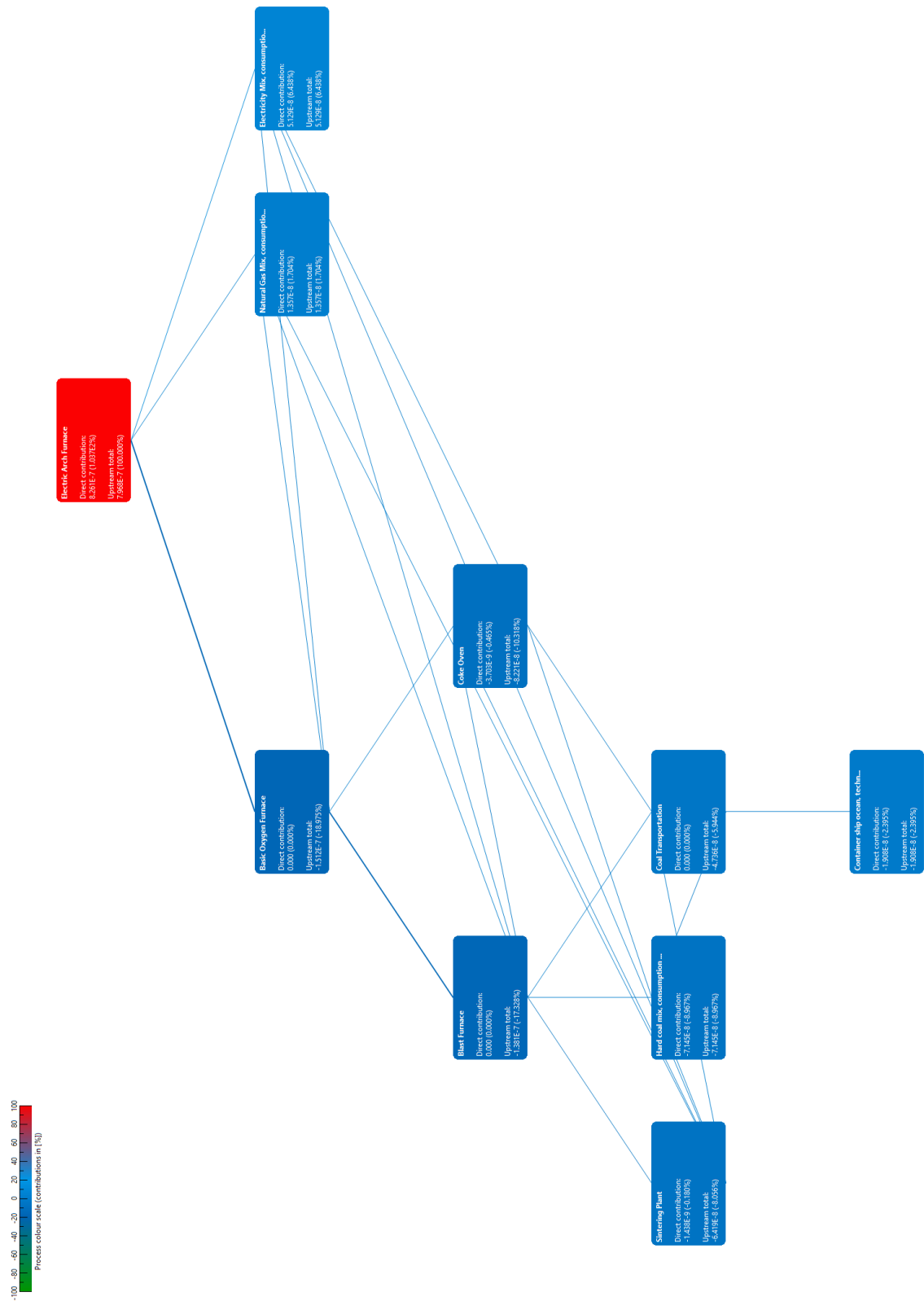


Figura A.2: Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Human Toxicity, Cancer Effects

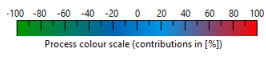


Figura A.3: *Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Land Use*

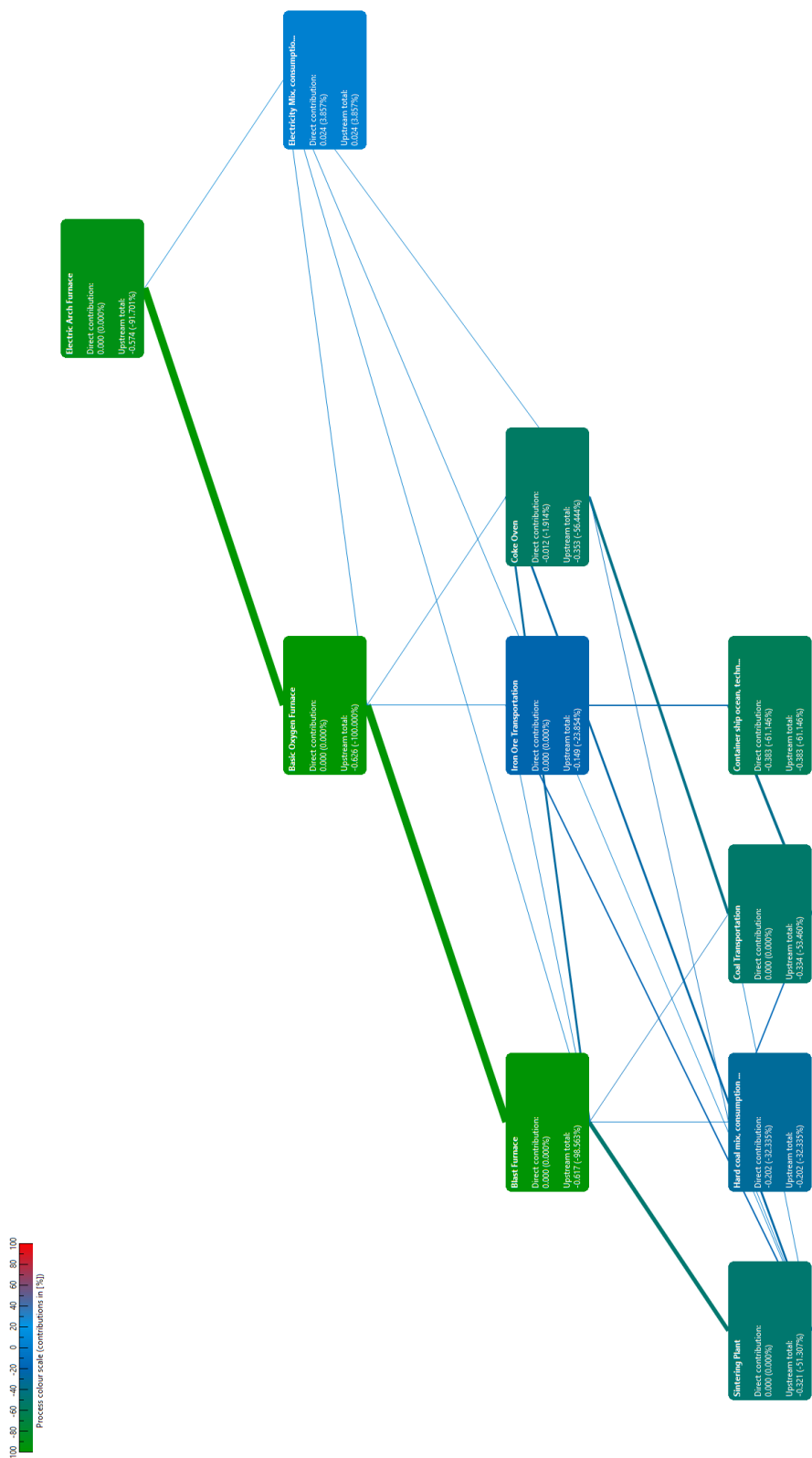


Figura A.4: Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Marine Eutrophication

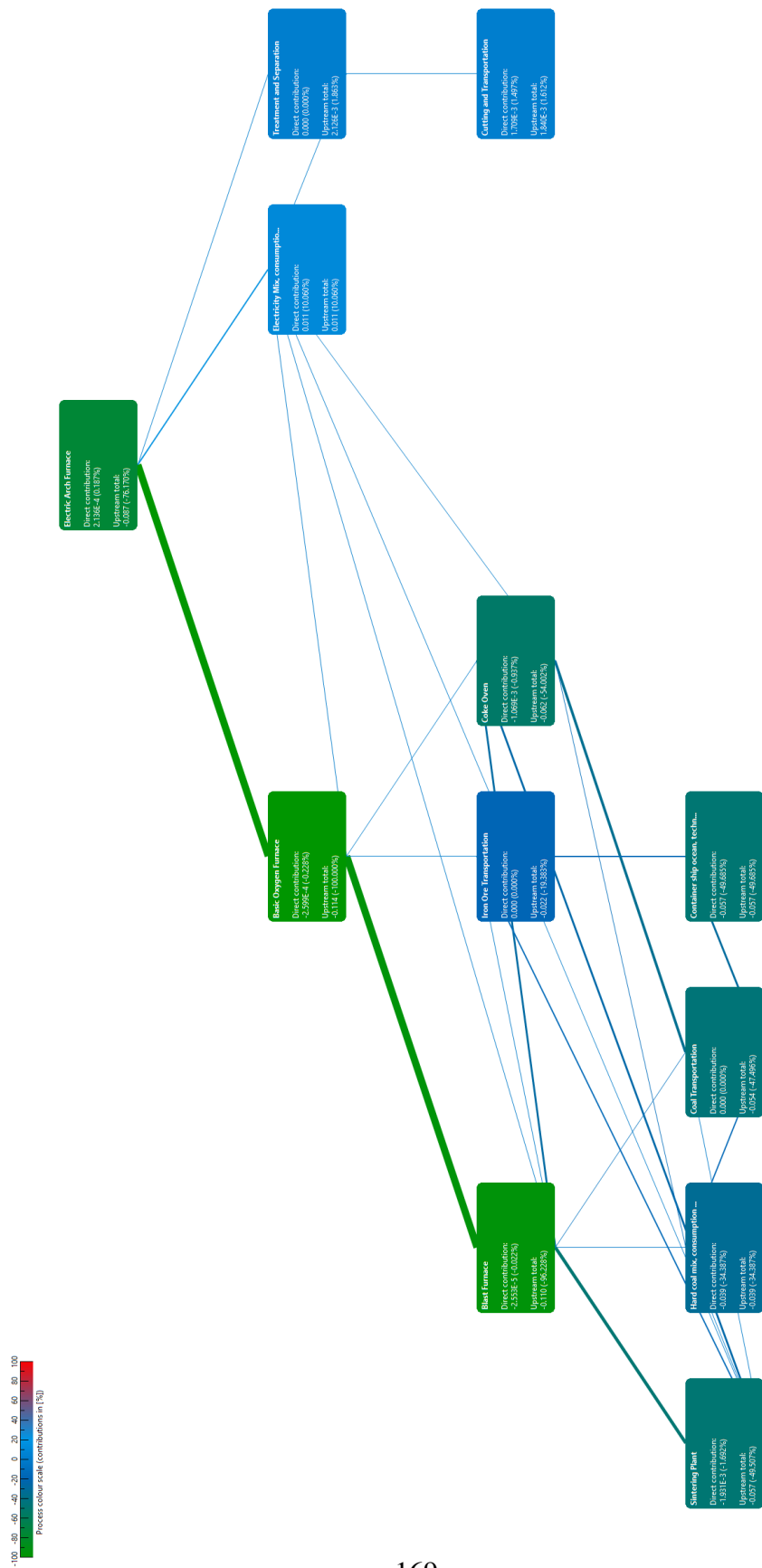


Figura A.5: Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Particulate Matter

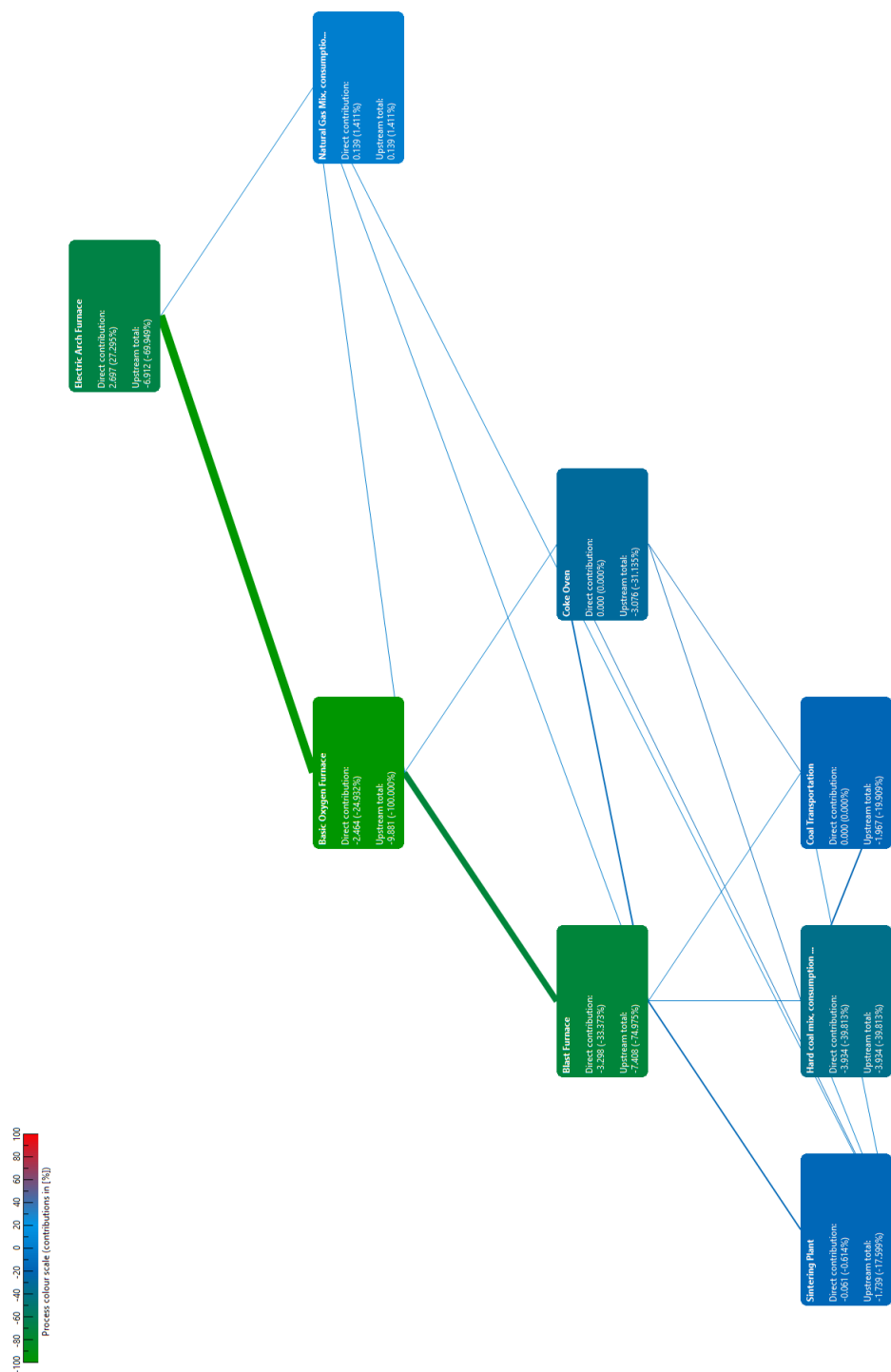


Figura A.6: Diagramma di Sankey per la categoria di impatto Water Resource Depletion

Bibliografia

- [1] *Miller Decommissioning Programme*. 09 2011.
- [2] *Rapporto di Sostenibilità 2019*. Federacciai, 2019.
- [3] *Rapporto di Sostenibilità 2019*. Federacciai, 2021.
- [4] Aitor P. Acero and Cristina Rodríguez and Andreas Ciroth. Lcia methods - impact assessment methods in life cycle assessment and their impact categories. 2015.
- [5] Gunni Ærtebjerg, Jacob Carstensen, Karsten Dahl, Jorgen Hansen, Kari Nygaard, Brage Rygg, Kai Sorensen, Gunnar Severinsen, Sara Casartelli, Wolfram Schrimpf, et al. Eutrophication in europe's coastal waters. 2001.
- [6] Fraser Anderson, Rafael Dawid, David García Cava, and D McMillan. Operational metrics for an offshore wind farm & their relation to turbine access restrictions and position in the array. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018:012002, 09 2021.
- [7] Daud Awang. Oil rig as artificial reef: Example of baram 8. 11 2013.
- [8] Jana Backes, Julian Suer, Nils Pauliks, Sabrina Neugebauer, and Marzia Traverso. Life cycle assessment of an integrated steel mill using primary manufacturing data: Actual environmental profile. *Sustainability*, 13:3443, 03 2021.

- [9] Chems Barchiche, Claude Deslouis, Otavio Gil, Philippe Refait, and Bernard Tribollet. Characterisation of calcareous deposits by electrochemical methods: Role of sulphates, calcium concentration and temperature. *Electrochimica Acta*, 49:2833–2839, 07 2004.
- [10] Lena Bergström, Lena Kautsky, Torleif Malm, Rutger Rosenberg, Magnus Wahlberg, and Nastassja Capetillo. Effects of offshore wind farms on marine wildlife - a generalized impact assessment. *Environmental Research Letters*, 9, 03 2014.
- [11] Brock Bernstein, Andy Bressler, Peter Cantle, Max Henrion, Dewitt John, Sarah Kruse, Daniel Pondella, Astrid Scholz, Tim Setnicka, Surya Swamy, Laurel Fink, and Bridget Mccann. *Evaluating Alternatives for Decommissioning California's Offshore Oil and Gas Platforms: A Technical Analysis to Inform State Policy Co-authors*. 01 2010.
- [12] Melanie Bishop, Mariana Mayer-Pinto, Laura Airoidi, Louise Firth, Rebecca Morris, Lynette Loke, Stephen Hawkins, Larissa Naylor, Ross Coleman, Su Yin Chee, and Katherine Dafforn. Effects of ocean sprawl on ecological connectivity: Impacts and solutions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 492, 02 2017.
- [13] R. Bomkamp, H. Page, and J. Dugan. Role of food subsidies and habitat structure in influencing benthic communities of shell mounds at sites of existing and former offshore oil platforms. *Marine Biology*, 146:201–211, 12 2004.
- [14] Giulia Borghi, S. Pantini, and Lucia Rigamonti. Life cycle assessment of non-hazardous construction and demolition waste (cdw) management in lombardy region (italy). *Journal of Cleaner Production*, 184, 03 2018.
- [15] Jim Bowyer, STEVE Bratkovich, KATHRYN Fernholz, MATT Frank, HARRY Groot, JEFF Howe, and E Pepke. Understanding steel recovery and recycling rates and limitations to recycling. *Dovetail Partners Inc.: Minneapolis, MN, USA*, pages 1–12, 2015.
- [16] Pål Buhl-Mortensen, Don Gordon, Lene Buhl-Mortensen, and David Kulka. First description of a lophelia pertusa reef complex in atlantic canada. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 126, 05 2017.
- [17] Ann Bull and James Jr. An indication of the process: Offshore platforms as artificial reefs in the gulf of mexico. *Bulletin of Marine Science*, 55:1086–1098, 09 1994.

- [18] Ann Bull and Milton Love. Worldwide oil and gas platform decommissioning: A review of practices and reefing options. *Ocean and Coastal Management*, 168:274–306, 02 2019.
- [19] Ann Bull, Milton Love, and Donna Schroeder. Artificial reefs as fishery conservation tools: Contrasting roles of offshore structures between the gulf of mexico and the southern california bight. *Transactions of the American Fisheries Society*, 49, 01 2008.
- [20] Dorota Burchart. Life cycle assessment of steel production in poland: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 54:235–243, 07 2013.
- [21] Jeffrey Carpenter, Lucas Merckelbach, Ulrich Callies, Suzanna Clark, Lidia Gaslikova, and Burkard Baschek. Potential impacts of offshore wind farms on north sea stratification. *PLOS ONE*, 11, 08 2016.
- [22] Charlotte Carre, Alaric Zanibellato, Marc Jeannin, René Sabot, Peggy Gunkel-Grillon, and Arnaud Serres. Electrochemical calcareous deposition in seawater. a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 04 2020.
- [23] Jesuina Chipindula, Venkata Botlaguduru, Hongbo Du, Raghava Kommalapati, and Ziaul Huque. Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in texas. *Sustainability*, 10:2022, 06 2018.
- [24] Erik Christensen, Martin Johnson, Ole Sorensen, C. Hasager, Merete Badger, and Søren Larsen. Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm. *Coastal Engineering*, 82:25–46, 12 2013.
- [25] Jeremy T. Claisse, Daniel J. Pondella, Milton S Love, Laurel A. Zahn, Chelsea M. Williams, and Ann Scarborough Bull. Impacts from partial removal of decommissioned oil and gas platforms on fish biomass and production on the remaining platform structure and surrounding shell mounds. *PLoS ONE*, 10, 2015.
- [26] Clark, S.and Schroeder, F. and Baschek, B. The influence of large offshore wind farms on the north sea and baltic sea – a comprehensive literature review. Report No. HZG(Report 2014-6), 2014.
- [27] Joop Coolen, Arjen Boon, Richard Crooijmans, Hilde Pelt, Frank Kleissen, Daan Gerla, Jan Beermann, Silvana Birchenough, L. Becking, and Pieterella Luttkhuizen. Mari-

- ne stepping-stones: Connectivity of *mytilus edulis* populations between offshore energy installations. *Molecular Ecology*, 29:686–703, 02 2020.
- [28] Nuno Cosme, Francesca Verones, and Michael Z Hauschild. Marine eutrophication. chapter 9.
- [29] I Côté, Jennifer Gill, Toby Gardner, and Andrew Watkinson. Measuring coral reef decline through meta-analyses. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 360:385–95, 03 2005.
- [30] Jennifer Dannheim, Lena Bergstro, Silvana N R Birchenough, Radosław Brzana, Arjen R Boon, Joop W P Coolen, Jean-claude Dauvin, Ilse De Mesel, Jozefien Derweduwen, Andrew B Gill, L Hutchison, Angus C Jackson, Urszula Janas, Georg Martin, Aurore Raoux, Jan Reubens, Liis Rostin, Jan Vanaverbeke, Thomas A Wilding, Dan Wilhelmsson, and Steven Degraer. Benthic effects of offshore renewables: identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES Journal of Marine Science*, 77(3):1092–1108, 2020.
- [31] Ilse De Mesel, Francis Kerckhof, Alain Norro, Bob Rumes, and Steven Degraer. Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia*, 756, 09 2015.
- [32] Maria Defingou, Franziska Bils, Britta Horchler, Thilo Liesenjohann, and Georg Nehls. Pharos4mpas - safeguarding marine protected areas in the growing mediterranean blue economy. capitalization report for the offshore wind energy sector. 12 2019.
- [33] Steven Degraer, Drew Carey, Joop Coolen, Zoe Hutchison, Francis Kerckhof, Bob Rumes, and Jan Vanaverbeke. Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning: A synthesis. *Oceanography*, 33:48–57, 12 2020.
- [34] Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (European Commission) , European Commission. *Commission Staff Working Document: Towards competitive and clean European steel Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Updating the 2020 New Industrial Strategy: Building a stronger Single Market for Europe's recovery*. 2021.

- [35] EMEP/EEA. Emepe/eea air pollutant emission inventory guidebook 2019 – update dec. 2021. 2019.
- [36] ENI S.p.A. Doc. 195/presc - studio di fattibilità decommissioning bonaccia nw. 2015.
- [37] ENI S.p.A. Valutazione preliminare ai sensi dell'art. 6, comma 9, del d.lgs.152/2006 e ss.mm.ii., relativa al progetto di decommissioning della piattaforma denominata “ada 3”, in concessione di coltivazione di idrocarburi liquidi e gassosi “a.c9.ag.”. proponente: Eni s.p.a. nota tecnica. e anche documentazione richiesta ai sensi dell'art. 14 dm 15/02/2019 (allegato 3) -piattaforma ada 3. 2019.
- [38] European Commission - Joint Research Centre. *Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. Publications Office of the European Union, 2010.
- [39] European Commission. *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*. Publications Office of the European Union, 2002.
- [40] Hayley Farr, Benjamin I. Ruttenberg, Ryan K. Walter, Yi-Hui Wang, and Crow White. Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities. *Ocean & Coastal Management*, 207, 2021.
- [41] Jens Floeter, Justus van Beusekom, Dominik Auch, Ulrich Callies, Jeffrey Richard Carpenter, Tim Dudeck, Sabine Eberle, André Eckhardt, Dominik Gloe, Kristin Hänselmann, Marc Hufnagl, Silke Janßen, Hermann J. Lenhart, Klas O. Möller, Ryan P. North, Thomas Pohlmann, Rolf Riethmüller, Sabrina Schulz, Stefan Spreizenbarth, Axel Temming, Bettina Walter, Oliver Zielinski, and Christian Möllmann. Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified north sea. *Progress in Oceanography*, 156:154–173, 2017.
- [42] Benny J. Gallaway and George S. Lewbel. The ecology of petroleum platforms in the northwestern gulf of mexico: a community profile. 1982.
- [43] Serena Giorgi, Monica Lavagna, and Andrea Campioli. Procedure di allocazione nella metodologia lca e tendenze settoriali verso un'economia circolare. 06 2017.

- [44] Sebastian Grashorn and Emil Stanev. Kármán vortex and turbulent wake generation by wind park piles. *Ocean Dynamics*, 66, 11 2016.
- [45] GSE. Composizione del mix iniziale nazionale utilizzato per la produzione dell'energia elettrica immessa nel sistema elettrico italiano nel 2020 (preconsuntivo). 2020.
- [46] Medarac H, Moya Rivera JA, and Somers J. *Production costs from iron and steel industry in the EU and third countries*. Number KJ-NA-30316-EN-N (online),KJ-NA-30316-EN-C (print). Publications Office of the European Union, Luxembourg (Luxembourg), 2020.
- [47] Jason Hall-Spencer, Valérie Allain, and Jan Fosså. Trawling damage to northeast atlantic ancient coral reefs. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, 269:507–11, 04 2002.
- [48] Ghassen Halouani, Ching-Maria Villanueva, Aurore Raoux, Jean Dauvin, Frida Lasram, Eric Foucher, François Le Loc'h, Georges Safi, Emma Aраignous, Jean-Paul Robin, and Nathalie Niquil. A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *Journal of Marine Systems*, 212:103434, 08 2020.
- [49] Linus Hammar, Diana Perry, and Martin Gullström. Offshore wind power for marine conservation. *Open Journal of Marine Science*, 06:66–78, 01 2016.
- [50] Richard Inger, Martin Attrill, Stuart Bearhop, Annette Broderick, W. Grecian, David Hodgson, Cheryl Mills, Emma Sheehan, Stephen Votier, Matthew Witt, and Brendan Godley. Marine renewable energy: Potential benefits to biodiversity? an urgent call for research. *Journal of Applied Ecology*, 46:1145 – 1153, 12 2009.
- [51] ISPRA. *Le strutture sommerse per il ripopolamento ittico e la pesca (“Barriere Artificiali”)*, 2013.
- [52] Torben Kirchgeorg, Irv Weinberg, M Hörnig, Roland Baier, M. Schmid, and Berit Brockmeyer. Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 136:257–268, 2018.

- [53] Mariella Leporini, Barbara Marchetti, Francesco Corvaro, and Fabio Polonara. Reconversion of offshore oil and gas platforms into renewable energy sites production: Assessment of different scenarios. *Renewable Energy*, 135:1121–1132, 05 2019.
- [54] R.D. Lewis, K.K. McKee, California. Department of Fish, Game, and Nearshore Sportfish Habitat Enhancement Program. *A Guide to the Artificial Reefs of Southern California*. State of California, the Resources Agency, Department of Fish and Game, 1989.
- [55] Tian Liang, Shanshan Wang, Chunyang Lu, Nan Jiang, Wenqi Long, Min Zhang, and Ruiqin Zhang. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in china: Normalized data and direct/indirect contribution. *Journal of Cleaner Production*, 264:121697, 04 2020.
- [56] Milton S Love, Donna M. Schroeder, William H. Lenarz, Alec MacCallA. MacCall, Ann Scarborough Bull, and Lyman K. Thorsteinson. Potential use of offshore marine structures in rebuilding an overfished rockfish species, bocaccio (*sebastes paucispinis*). *Fishery Bulletin*, 104:383–390, 2006.
- [57] Elke Ludewig. *On the Effect of Offshore Wind Farms on the Atmosphere and Ocean Dynamics*, volume 31. 01 2015.
- [58] Martin Perrow. *Wildlife and Wind Farms - Conflicts and Solutions, Volume 4. Offshore: Monitoring and Mitigation*. Pelagic Publishing Ltd, 2019.
- [59] Ninon Mavraki, Steven Degraer, and Jan Vanaverbeke. Offshore wind farms and the attraction-production hypothesis: insights from a combination of stomach content and stable isotope analyses. *Hydrobiologia*, 848, 04 2021.
- [60] Ministero dello sviluppo economico - Direzione generale per le infrastrutture e la sicurezza dei sistemi energetici e geominerari. La situazione energetica nel 2019. 2020.
- [61] Abhijit Mitra and Sufia Zaman. *Blue Carbon Reservoir of the Blue Planet*. 08 2014.
- [62] Mooney, T.; Andersson, M.; Stanley, J. Acoustic impacts of offshore wind energy on fishery resources: An evolving source and varied effects across a wind farm’s lifetime. *Oceanography*, 33, 2020.

- [63] N Pardo, JA Moya, and K Vatopoulos. *Prospective scenarios on energy efficiency and CO₂ emissions in the EU iron & steel industry*. Publications Office of the European Union Luxembourg, 2012.
- [64] Daniel Pondella, Laurel Zahn, Milton Love, David Siegel, and Brock Bernstein. Modeling fish production for southern california’s petroleum platforms. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11, 09 2015.
- [65] Heinz Jochen Poremski. Life Cycle Assessment - Development Planning through Decommissioning. 05 1998.
- [66] R. De Lauretis, L. Ntziachristos, C. Trozzi. *International maritime navigation, international inland navigation, national navigation (shipping), national fishing, military (shipping), and recreational boats*. In *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Update Dec. 2021*. 2019.
- [67] Urmas Raudsepp, Ilja Maljutenko, Mariliis Kõuts, Lena Granhag, Magda Wilewska-Bien, Ida-Maja Hassellöv, K. Martin Eriksson, Lasse Johansson, Jukka-Pekka Jalkanen, Matthias Karl, Volker Matthias, and Jana Moldanova. Shipborne nutrient dynamics and impact on the eutrophication in the baltic sea. *Science of The Total Environment*, 671:189–207, 2019.
- [68] Remus, R and Aguado Monsonet, M and Roudier, S and Delgado Sancho, L. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document:for:Iron and Steel Production:Industrial Emissions Directive 2010/75/EU:(Integrated Pollution Prevention and Control)*. Publications Office of the European Union, 2012.
- [69] Pietro Renzulli, Bruno Notarnicola, Giuseppe Tassielli, Gabriella Arcese, and Rosa Capua. Life cycle assessment of steel produced in an italian integrated steel mill. *Sustainability*, 8, 07 2016.
- [70] Paul Sammarco, Steve Kolian, Richard Warby, Jennifer Bouldin, Wilma Subra, and Scott Porter. Distribution and concentrations of petroleum hydrocarbons associated with the bp/deepwater horizon oil spill, gulf of mexico. *Marine pollution bulletin*, 73, 07 2013.

- [71] Kaela Slavik, Carsten Lemmen, Wenyan Zhang, Onur Kerimoglu, Knut Klingbeil, and Kai Wirtz. The large scale impact of offshore windfarm structures on pelagic primary production in the southern north sea. *Hydrobiologia*, 845, 11 2019.
- [72] Brigitte Sommer, Ashley Fowler, Peter Macreadie, David Palandro, Azivy Aziz, and David Booth. Decommissioning of offshore oil and gas structures – environmental opportunities and challenges. *Science of The Total Environment*, 658, 12 2018.
- [73] Susanna Strömberg, Tomas Lundälv, and Thomas Goreau. Suitability of mineral accretion as a rehabilitation method for cold-water coral reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 395:153–161, 11 2010.
- [74] Bastien Taormina, Nolwenn Quillien, Morgane Lejart, Sandrine Derrien-Courtel, Aodren Gal, René Derrien, Aurélie Jolivet, Sylvain Chauvaud, Viviane Degret, Damien Saffroy, Jean-Philippe Pagot, and Agnes Barillier. Characterisation of the potential impacts of subsea power cables associated with offshore renewable energy projects. 06 2020.
- [75] Erika Techera and John Chandler. Offshore installations, decommissioning and artificial reefs: Do current legal frameworks best serve the marine environment? *Marine Policy*, 59, 09 2015.
- [76] Anne-Charlotte Vaissière, Harold Levrel, Sylvain Pioch, and Antoine Carlier. Biodiversity offsets for offshore wind farm projects: The current situation in europe. *Marine Policy*, 48:172–183, 09 2014.
- [77] Joshua van Berkel, Hans Burchard, Asbjørn Christensen, Lars Mortensen, Ole Svenstrup Petersen, and Frank Thomsen. The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for fishes. *Oceanography*, 2020.
- [78] Mark Vermeij, Kristen Marhaver, Chantal Huijbers, Ivan Nagelkerken, and Stephen Simpson. Coral larvae move toward reef sounds. *PloS one*, 5:e10660, 05 2010.
- [79] Wilhelmsson, D. and Langhamer, O. *The Influence of Fisheries Exclusion and Addition of Hard Substrata on Fish and Crustaceans. In Humanity and the Sea: Marine Renewable Energy Technology and Environmental Interactions*. Springer, 2014.
- [80] Michael Zettler and Falk Pollehne. *The Impact of Wind Engine Constructions on Benthic Growth Patterns in the Western Baltic*, pages 201–222. 01 2006.