



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

ANALISI LCA DI UNA TURBINA EOLICA AD ASSE ORIZZONTALE

Relatrice: Anna Stoppato

Laureanda:
Martina Tosetto
Matricola 1167038

Anno Accademico 2019/2020

SOMMARIO

Indice delle figure	5
Indice delle tabelle	7
1 Introduzione	9
2 Il panorama energetico italiano	11
2.1 L'eolico.....	11
3 L'Analisi LCA – Life Cycle Assessment.....	16
3.1 Definizione degli scopi e degli obiettivi.....	17
3.2 Analisi di Inventario.....	18
3.3 Analisi degli Impatti.....	19
3.3.1 Effetto serra.....	20
3.3.2 Assottigliamento della fascia di ozono.....	21
3.3.3 Acidificazione.....	21
3.3.4 Eutrofizzazione	21
3.3.5 Formazione di smog fotochimico	22
3.3.6 Tossicità per l'uomo e per l'ambiente.....	22
3.3.7 Consumo di risorse non rinnovabili.....	22
3.4 Interpretazione e Miglioramento	22
4 Il Software SimaPro	24
4.1 Metodi	26
4.1.1 IPCC 2013.....	26
4.1.2 Cumulative Energy Demand (CED)	27
4.1.3 Eco-indicator 99.....	27
4.1.4 ReCiPe 2016.....	29
5 Il Sistema in Esame: FX-EVO 16-20.....	32
6 Impostazione del modello della Turbina FX EVO 16-20 in SimaPro.....	36
6.1 Inventario	38
6.1.1 Fondazioni	38
6.1.2 Torre	39
6.1.3 Generatore	39
6.1.4 Navicella	41
6.1.5 Inverter, quadro elettrico e cavi di collegamento	42
6.1.6 Pale e hub	43
6.1.7 Imballaggi	44
6.1.8 Trasporto e Manutenzione.....	45

6.2	Smaltimento.....	46
6.3	Ciclo di vita.....	47
7	Analisi degli impatti della Turbina FX-EVO 16-20 in SimaPro.....	48
7.1	Smaltimento: vantaggio o svantaggio?.....	48
7.2	Cumulative Energy Demand (CED).....	50
7.3	IPCC 2013.....	54
7.3.1	Intervallo di tempo 20 anni.....	54
7.3.2	Intervallo di tempo 100 anni.....	57
7.3.3	Confronto tra i due intervalli di tempo.....	58
7.4	ReCiPe 2016.....	58
7.4.1	ReCiPe (H) midpoint.....	59
7.4.2	ReCiPe (H) endpoint.....	63
7.4.3	Confronto.....	67
8	Confronto dei risultati con un altro sito.....	70
8.1	Cumulative Energy Demand (CED).....	70
8.2	IPCC 2013.....	71
8.3	ReCiPe 2016 midpoint ed endpoint.....	72
9	Conclusioni.....	74
10	Appendice.....	76
	Bibliografia.....	83

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Evoluzione del numero e della potenza degli impianti eolici.....	12
Figura 2: Distribuzione regionale della potenza installata degli impianti eolici a fine 2018.....	13
Figura 3: Evoluzione della produzione eolica.....	14
Figura 4: Distribuzione regionale della produzione eolica nel 2018.....	14
Figura 5: Distribuzione percentuale delle ore di utilizzazione degli impianti eolici installati.....	15
Figura 6: Struttura di un'analisi LCA.....	17
Figura 7: Esempio di raffigurazione sistema in SimaPro.....	25
Figura 8: Rappresentazione dettagliata di un modello di danno.....	28
Figura 9: Rappresentazione della relazione tra inventario e le categorie midpoint e le categorie endpoint.....	31
Figura 10: Turbina eolica FX-EVO 16-20.....	32
Figura 11: Produzione annuale stimata FX 16-20.....	33
Figura 12: Curva di potenza e CP di FX 16-20.....	34
Figura 13: Diagramma per l'analisi del sistema turbina.....	38
Figura 14: Schermata scenario di smaltimento.....	46
Figura 15: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo CED.....	50
Figura 16: Confronto tra i vari componenti con metodo CED.....	51
Figura 17: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento dei soli componenti torre e navicella con metodo CED.....	51
Figura 18: Confronto tra i vari componenti con metodo CED.....	52
Figura 19: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo IPCC 20a.....	54
Figura 20: Confronto tra i vari componenti con metodo IPCC 2013 20a.....	55
Figura 21: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento dei soli torre e navicella con metodo IPCC 20a.....	56
Figura 22: Confronto tra i vari componenti con metodo IPCC 2013 20a.....	57
Figura 23: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo ReCiPe 2013 (H) midpoint.....	59
Figura 24: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto.....	60
Figura 25: Confronto assemblaggi con maggior peso nelle varie categorie di impatto.....	61
Figura 26: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento dei soli torre e navicella con metodo ReCiPe 2013 (H) midpoint.....	61
Figura 27: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto.....	62
Figura 28: Confronto assemblaggi con maggior peso nelle varie categorie di impatto.....	63
Figura 29: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo ReCiPe 2013 (H) endpoint.....	63
Figura 30: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto.....	65
Figura 31: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di torre e navicella con metodo ReCiPe 2013 (H) endpoint.....	66
Figura 32: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto.....	67
Figura 33: Torre.....	76
Figura 34: Fondazioni.....	77
Figura 35: Generatore.....	78
Figura 36: Navicella.....	79
Figura 37: Pale.....	80

Figura 38: Inverter + q. el + cavi di collegamento.....	81
Figura 39: Hub.....	82

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3-1: GWP dei maggiori gas ad effetto serra.....	21
Tabella 4-1: Valori percentuali di come sono pesate le varie categorie	29
Tabella 5-1: Caratteristiche FX EVO 16-20	33
Tabella 5-2: Geometria FX 16-20.....	34
Tabella 6-1: Dati per la costruzione della curva di potenza e del Cp riferiti alla turbina FX EVO 16-20.....	36
Tabella 6-2: Fondazioni	39
Tabella 6-3: Torre	39
Tabella 6-4: Generatore a magneti permanenti.....	40
Tabella 6-5: Navicella	41
Tabella 6-6: Inverter	42
Tabella 6-7: Quadro elettrico	43
Tabella 6-8: Cavi di collegamento	43
Tabella 6-9: Pale	44
Tabella 6-10: Hub	44
Tabella 6-11: Imballaggi	45
Tabella 7-1: Smaltimento: vantaggio o svantaggio?	49
Tabella 7-2: Confronti richieste di energia per “non renewable, fossil”: inventario turbina con lo smaltimento di tutti i componenti	50
Tabella 7-3: Confronti richieste di energia per “non renewable, fossil”: inventario turbina con lo smaltimento di torre e navicella	52
Tabella 7-4: Risultati metodologia CED	53
Tabella 7-5: Confronti kg CO2 equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di tutti i componenti	54
Tabella 7-6: Confronti kg CO2 equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di torre e navicella.....	56
Tabella 7-7: Confronti kg CO2 equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di tutti i componenti	57
Tabella 7-8: Confronti kg CO2 equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di torre e navicella.....	58
Tabella 7-9: Confronto IPCC 20a e 100a.....	58
Tabella 7-10: Valori categorie di impatto turbina	59
Tabella 7-11: Valori categorie di impatto turbina	62
Tabella 7-12: Valori categorie di impatto turbina	64
Tabella 7-13: Valori categorie di impatto turbina	66
Tabella 7-14: Confronto per metodo ReCiPe midpoint.....	68
Tabella 7-15: Confronto per metodo ReCiPe endpoint.....	68
Tabella 8-1: Risultati CED relativi a Monte d'Aria	70
Tabella 8-2: Risultati IPCC 2013 relativi a Monte d'Aria.....	71
Tabella 8-3: Risultati ReCiPe 2016 midpoint riferiti a Monte d'Aria	72
Tabella 8-4: Risultati ReCiPe 2016 endpoint riferiti a Monte d'Aria	72

1 INTRODUZIONE

Nell'ultimo periodo il problema del riscaldamento globale è molto sentito, basti considerare i recenti fatti di cronaca: in Islanda, uno dei Paesi considerati il top a livello mondiale per percentuale di utilizzo delle fonti rinnovabili, c'è stato un vero e proprio funerale per il ghiacciaio Okjokull; una grande quantità di incendi, mai vista prima, ha colpito l'Australia, causando la distruzione dei territori e decimando flora e fauna locali. È dunque sempre più fondamentale ritardare gli effetti del riscaldamento globale, cercando di ridurre il più possibile le emissioni di gas serra (una tra le cause principali del riscaldamento globale) sfruttando dunque strumenti e tecnologie per produrre la cosiddetta "energia pulita". Grazie all'Accordo di Parigi nel 2015 per la prima volta i Paesi firmatari hanno adottato un protocollo universale e giuridicamente vincolante sul clima mondiale. La COP21, a cui si riferisce la redazione di tale accordo, si conclude con un segno di speranza; quattro anni dopo, in corrispondenza della COP25 svoltasi a Madrid, i risultati sono più che mai preoccupanti: la conferenza si è conclusa senza un effettivo piano d'azione né obblighi, solo con una vaga idea di come sia fondamentale ridurre le emissioni; è stata solo rimandata la decisione durante il prossimo anno, affidata ai paesi ricchi, di decidere di quanto sia necessario andare a ridurre le emissioni.

Considerando il panorama energetico mondiale, si prevede che la richiesta di energia subirà un aumento dell'1.3% entro il 2040, che si traduce in un forte aumento delle emissioni: questo, in aggiunta ad una rapida crescita dell'importanza del cambiamento climatico, comporta la necessità di un impellente cambio di rotta sullo sfruttamento dei combustibili fossili; è stato tuttavia dichiarato che, senza una crescita più che esponenziale delle tecnologie per un'energia pulita, le emissioni caleranno, ma non abbastanza da incontrare l'obiettivo condiviso del cambio di rotta al cambiamento climatico. Per poter raggiungere appieno l'obiettivo, sono necessari rapidi e ampi cambiamenti in tutte le parti del sistema energetico; tutto questo è in linea con l'Accordo di Parigi, tracciando un percorso necessario per mantenere l'aumento delle temperature globali al di sotto dei 2°C, proseguendo gli sforzi per mantenerlo sotto 1.5°C. [2]

Poiché il panorama energetico mondiale risulta molto ampio, non è attuabile un'unica e semplice soluzione, ma è necessario valutarne diverse in relazione al caso studio e alle problematiche singolarmente rilevate.

Dal punto di vista dello sviluppo delle fonti ad energia rinnovabile, il panorama mondiale risulta guidato sempre più dall'eolico e dal solare, i quali hanno visto un'ampia diffusione nell'ultimo periodo a livello globale, e la loro tendenza risulta in crescita: si prevede infatti che, entro il 2040, essi copriranno circa il 40% della richiesta di energia elettrica. [2] Tutto ciò risulta legato anche alla prospettiva di aumento della popolazione mondiale a 8.2 miliardi di persone al 2030, dunque si vede necessario un passaggio a fonti energetiche alternative, in quanto le riserve provate di combustibili fossili risultano non più sufficienti a soddisfare la richiesta: anche questo è considerato un impatto da tenere in considerazione. [3]

In aggiunta, è necessario focalizzarsi anche sugli effetti che tutte queste problematiche hanno ed avranno sulla salute umana.

In questo panorama si inserisce al meglio l'analisi LCA, *Life Cycle Assessment*, che permette di svolgere analisi dettagliate per valutare quali sono gli impatti ambientali associati al sistema a cui essa viene applicata e permette dunque di fare delle considerazioni in merito. Questo tipo di analisi ha cominciato ad essere sfruttata, soprattutto nell'ultimo periodo, anche come pubblicità dalle varie aziende: è questo il caso di Vestas, uno dei leader a livello mondiale nel campo della progettazione ed installazione dell'eolico. Vestas, già dal 1999, applica l'analisi LCA ai suoi prodotti ed alle sue attività con lo scopo di documentare le prestazioni energetiche ed ambientali delle sue turbine eoliche ed utilizzare i risultati per migliorarne le prestazioni o sviluppare soluzioni con minor impatto ambientale. I report risultati dai vari studi sono tutti pubblicati nel loro sito. [4]

In questo elaborato verrà applicata la metodologia LCA ad una turbina eolica; la turbina in questione è la nuova FX 16-20 di proprietà del gruppo ESPE Srl, con sede a Grantorto (Padova). Si svolgerà una prima analisi al sistema nel suo complesso, con un piccolo focus sulla convenienza o meno di considerare lo smaltimento di ogni singolo componente, per poi passare ad analizzare componente per componente, facendo dei confronti per poter capire dove poter agire per ridurre gli impatti nel complesso. L'analisi proseguirà poi con un confronto nel posizionamento della turbina in due siti diversi, appartenenti a classi del vento differenti.

Lo scopo sarà quello di valutare se tali impianti siano effettivamente utili al controllo e riduzione delle emissioni in atmosfera: questo perché certamente l'utilizzo ha un impatto nullo, o quasi, ma è necessario andare a considerare anche le fasi di costruzione, manutenzione e smaltimento.

2 IL PANORAMA ENERGETICO ITALIANO

Focalizzandoci sull'Italia, il rapporto del GSE evidenzia come, a fine 2018, la potenza efficiente lorda degli oltre 835000 impianti a fonti rinnovabili installati in Italia è pari a 54.3 GW; l'incremento rispetto all'anno precedente del 2% è legato principalmente alle nuove installazioni di impianti eolici (+499 MW) e fotovoltaici (+425 MW): questa rilevazione risulta in linea con l'andamento a livello mondiale. La produzione lorda di energia elettrica da FER rappresenta il 39,5% della produzione complessiva di energia elettrica in Italia. La fonte che garantisce il principale contributo alla produzione di energia elettrica da FER si riconferma quella idroelettrica, a seguire solare, bioenergie, eolico e geotermico. [5]

Applicando le definizioni ed i criteri di calcolo previsti dalla Direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, ai fini del monitoraggio degli obiettivi UE sulle FER al 2020, in Italia nel 2018 i consumi finali lordi di energia da FER risultano pari a 21,6 Mtep, in flessione di circa 400 ktep rispetto al 2017 (-1,8%). Considerando anche i consumi finali lordi complessivi di energia, i quali si sono attestati a 121,5 Mtep, con un incremento dello 0,9% rispetto al 2017, si può rilevare che la quota dei consumi finali lordi coperta da FER nel 2018 risulta pari a 17,8%, un valore superiore al target assegnato all'Italia dalla Direttiva 2009/28/CE per il 2020 (17,0%), ma in flessione rispetto al 2017 (18,3%). Tale flessione è il risultato dell'effetto di due trend opposti: la contrazione degli impieghi di FER e l'aumento dei consumi energetici complessivi.

I target sulle FER al 2020 fissati per l'Italia risultano dunque alla portata; in un'ottica a più lungo termine, tuttavia, il ruolo delle fonti rinnovabili in Italia dovrà essere ulteriormente rafforzato: il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) fissa per il 2030 un obiettivo molto più ambizioso in termini di quota dei consumi energetici totali coperta da FER (30%).

2.1 L'EOLICO

Poiché si tratta di un'analisi LCA riferita ad una turbina eolica, è interessante considerare più dettagliatamente i dati relativi agli impianti eolici in Italia. Alla fine del 2018 risultano installati 5642 impianti eolici, la maggior parte dei quali con una potenza generata inferiore a 1 MW. È considerevole sottolineare come, nel 2018, la produzione di energia elettrica da eolico è risultata pari a 17716 GWh, corrispondente al 15,5% della produzione elettrica totale da fonti rinnovabili.

Rilevante è andare a considerare l'evoluzione della distribuzione nel tempo di tali impianti.

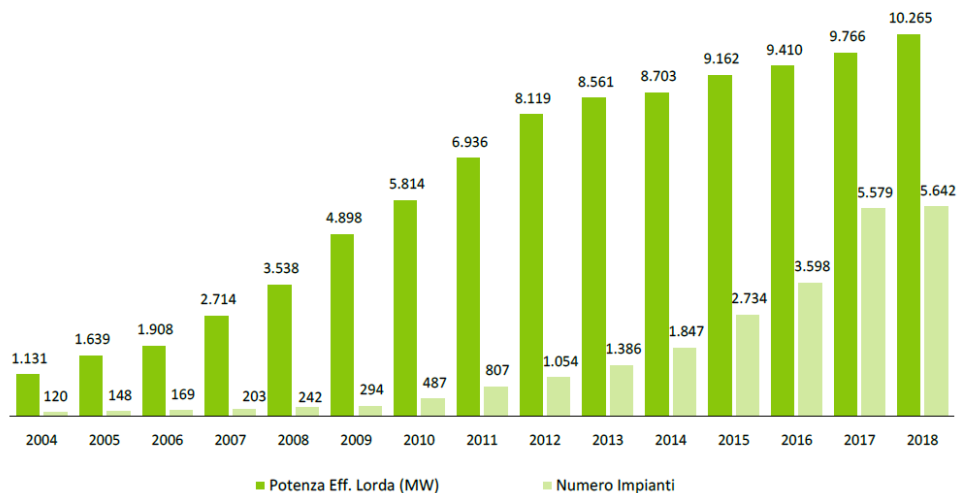


Figura 1: Evoluzione del numero e della potenza degli impianti eolici [5]

Come mostrato in Figura 1, è possibile notare che negli ultimi 15 anni lo sviluppo degli impianti eolici in Italia è stato molto veloce, con una significativa attenuazione negli ultimi anni; la potenza installata è cresciuta a livello esponenziale: al 2018, la potenza eolica installata corrisponde al 18,9% rispetto all'intero parco impianti rinnovabile.

In relazione allo sviluppo a livello territoriale, è stato rilevato come la quasi totalità degli impianti eolici a fine 2018 risulta essere nel sud Italia, con una maggioranza in Basilicata ed in Puglia; quest'ultima risulta essere la regione con maggiore potenza installata, come presentato in Figura 2.

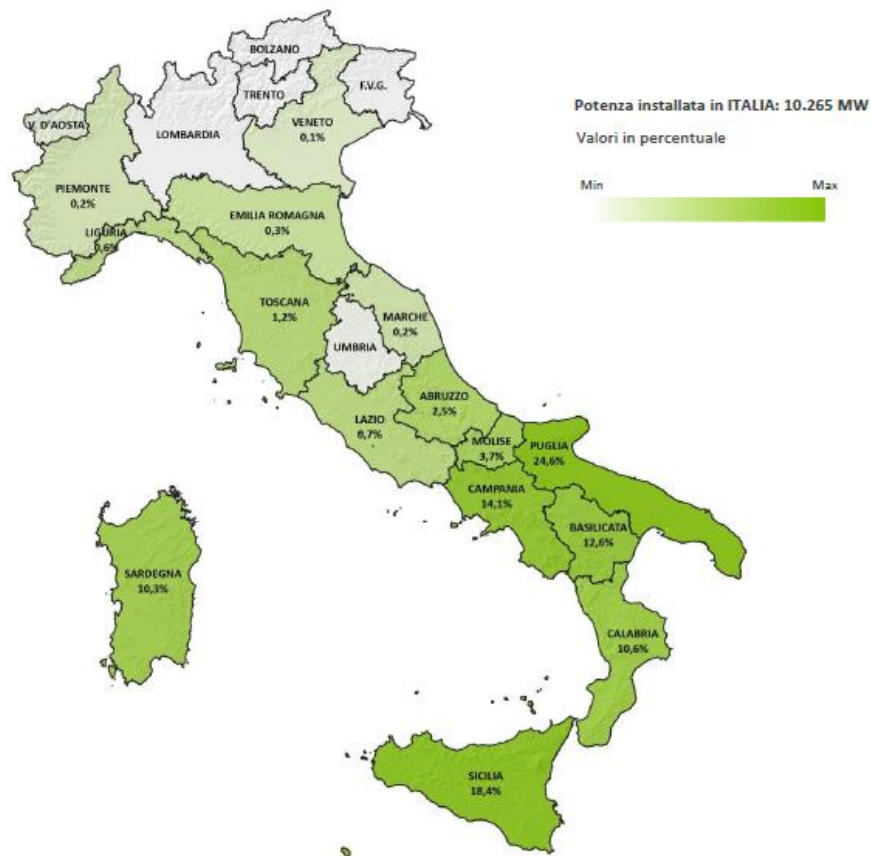


Figura 2: Distribuzione regionale della potenza installata degli impianti eolici a fine 2018 [5]

Andando più nel dettaglio, la potenza installata in Puglia è 2523,3 MW; a seguire Sicilia, Campania e Basilicata con rispettivamente 1892,5 MW, 1443,2 MW e 1293 MW.

La ragione per cui il maggior sviluppo dell'eolico risulta essere al sud Italia deriva dal fatto che questo tipo di fonte energetica rinnovabile necessita di particolari caratteristiche ambientali e territoriali dei siti scelti, ovvero la ventosità, l'orografica, l'accessibilità.

Il vento è una risorsa non costante, e questa affermazione è relativa ad ogni periodo di tempo considerato (giorni, mesi, anni): questo è causa di una incongruenza tra potenza installata e potenza effettivamente prodotta, dunque risulta fondamentale andare a considerare oltre che la distribuzione della potenza installata anche l'energia prodotta a livello regionale.

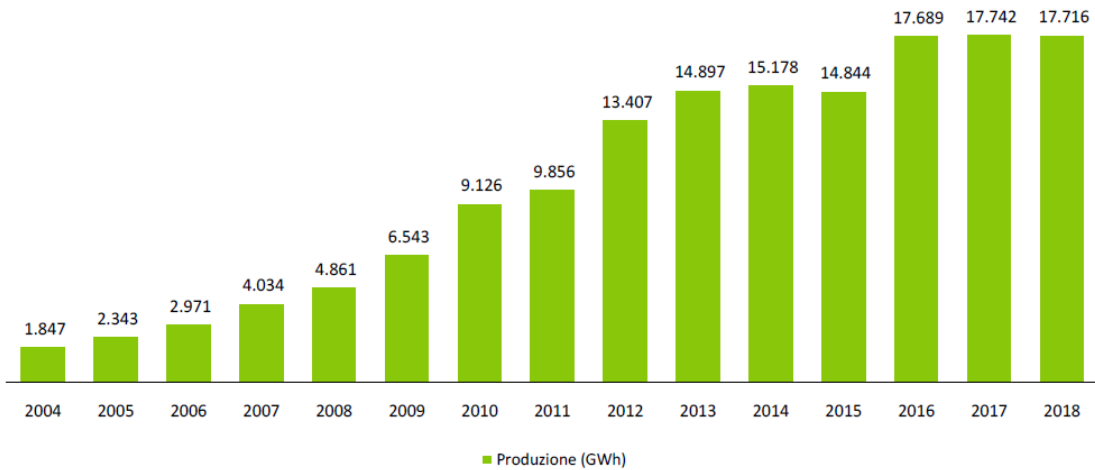


Figura 3: Evoluzione della produzione eolica [5]

Dalla Figura 3 si nota come nel periodo di tempo considerato (2004-2018) la produzione di energia elettrica da impianti eolici è passata da 1847 GWh a 17716 GWh, un aumento di quasi dieci volte in undici anni. Considerando la produzione per regione, ovviamente la Puglia risulta essere quella con potenza prodotta maggiore, con 4594 GWh al 2018, seguita da Sicilia e Campania con 3211 GWh e 2494 GWh rispettivamente.



Figura 4: Distribuzione regionale della produzione eolica nel 2018 [4]

Figura 4 mostra in percentuale come l'insieme delle tre regioni che detengono il record della produzione di energia elettrica da fonte eolica in Italia (Puglia, Sicilia e Campania) corrisponde al 58,1% di quella totale nazionale.

È infine interessante presentare, sempre in relazione all'incongruenza tra potenza installata e potenza effettivamente generata, le ore di utilizzazione degli impianti.

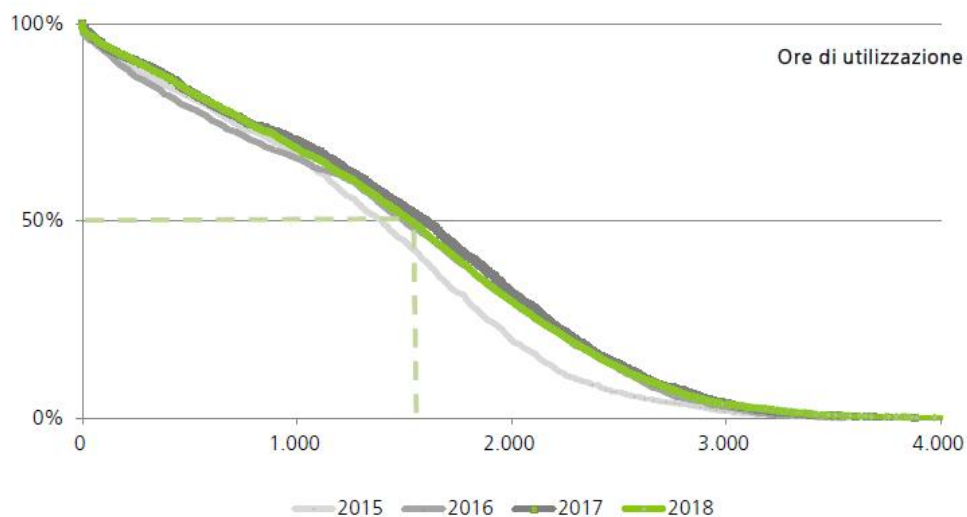


Figura 5: Distribuzione percentuale delle ore di utilizzazione degli impianti eolici installati [4]

Con riferimento alla Figura 5, si nota che l'andamento nel corso degli anni risulta pressoché invariato; le ore di utilizzazione medie sono state 1795 nel 2018 (calcolate come rapporto tra produzione e potenza installata), in calo rispetto all'anno precedente di un 3,1%. Considerando nel dettaglio le regioni, Puglia e Campania hanno riscontrato una diminuzione relativamente importante sulle ore di utilizzo, dell'ordine dell'8%, al contrario in Sicilia si sono riscontrati degli aumenti dell'ordine del 13%. [5]

3 L'ANALISI LCA – LIFE CYCLE ASSESSMENT

L'approccio dell'analisi LCA è quello di valutare gli impatti del sistema in esame in modo oggettivo, seguendo delle metodologie applicabili ad ogni caso possibile.

Il termine Life Cycle Assessment (LCA) nacque negli anni '90 durante un congresso della Society of Environmental Toxicology and Chemistry, sebbene l'origine di questa metodologia viene fatta risalire agli anni '60, quando alcuni ricercatori iniziarono ad approcciarsi ai problemi del consumo delle risorse nei processi industriali tramite criteri rigorosamente scientifici: l'idea innovativa fu quella di seguire progressivamente il percorso delle materie prime applicate nel processo analizzato, dalla loro estrazione fino al loro ritorno sulla Terra, andando a comprendere tutte le operazioni, dalla progettazione alla dismissione, recupero o smaltimento finale. Questa metodologia è chiamata in inglese "from cradle to grave", ovvero "dalla culla alla tomba", o "dalla culla alla culla" se si va anche a comprendere il rientro in circolo dei materiali a fine vita.

La novità risulta evidente: non si va più ad analizzare il singolo processo, ma si considera l'intera catena produttiva in modo tale da poter avere una visione più globale e poter comprendere dove andare ad intervenire per rendere il sistema globale più efficiente e non solo il singolo processo a spese degli altri.

L'analisi LCA è regolata principalmente da due norme UNI EN:

- ISO 14040: 2006 – Environmental management – Life cycle management – Principles and Framework;
- ISO 14044: 2006 – Environmental management – Life cycle management – Requirements and Guidelines.

tutte a livello di Standard Internazionali e ognuna dedicate a una specifica parte della metodologia.

La SETAC definisce l'analisi LCA come *"un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente: la valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso e lo smaltimento finale"*. La norma UNI EN ISO 14040 definisce la LCA come *"compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto"*.

La parola sistema comprende due categorie: sistema industriale, ovvero l'insieme delle procedure che hanno la funzione di produrre beni utili, il quale è diviso dal sistema ambiente da confini ben definiti e collegato tramite scambio di input e output; l'ambiente è dunque tutto ciò che non è compreso all'interno dei confini del sistema industriale considerato. Tra gli input si considera tutto ciò che è connesso al consumo di risorse, mentre tra gli output si annoverano problemi legati all'inquinamento.

La struttura di una LCA proposta dalla ISO 14040 è suddivisa in quattro fasi:

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi
2. Analisi di Inventario
3. Analisi degli impatti
4. Interpretazione e Miglioramento

Le quali verranno successivamente analizzate nel dettaglio.

Le quattro fasi dell'analisi LCA possono essere raffigurate come:

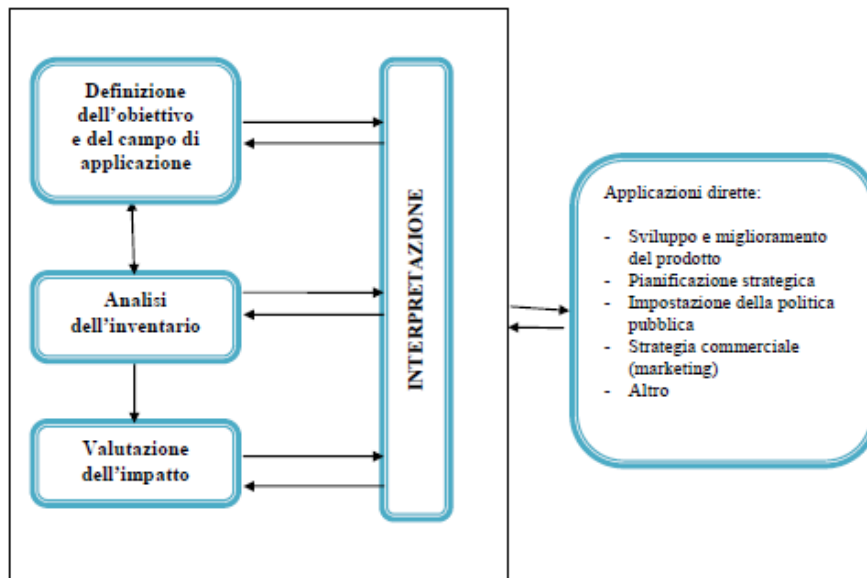


Figura 6: Struttura di un'analisi LCA

3.1 DEFINIZIONE DEGLI SCOPI E DEGLI OBIETTIVI

In questa fase vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni ed i limiti; è necessario anche definire la tipologia di interlocutore con il quale ci si vuole interfacciare e se i risultati verranno poi divulgati ed utilizzati per altri fini: è forse la fase più importante, nella quale è necessario prestare maggior attenzione, in quanto su di essa si basa tutta l'analisi.

Innanzitutto, è necessario definire il sistema che verrà sottoposto all'analisi, suddiviso per semplicità di studio in operazioni unitarie, ognuna delle quali riceve gli input dalle operazioni a monte e genera degli output per le operazioni a valle: il sistema è, dunque, un insieme di operazioni unitarie collegate tra loro; ogni operazione unitaria deve essere definita nelle sue caratteristiche e prestazioni. Fondamentale in questa fase è la definizione dell'unità funzionale, che deve essere coerente sia con l'obiettivo che con il campo di applicazione, e viene utilizzata come riferimento per normalizzare i flussi di input e output del sistema: è l'unità di riferimento con la quale verranno poi presentati i risultati. Per poter definire quali operazioni unitarie considerare, è necessario definire i confini del sistema, sempre in relazione agli scopi e obiettivi che ci si è prefissati per l'analisi.

Da sottolineare ed analizzare con cura in questa fase è l'analisi energetica: il modo in cui vengono trattati gli input energetici può far variare di molto i risultati dell'analisi LCA. I carichi energetici possono essere classificati nelle seguenti categorie:

- Energia di investimento: comprende la realizzazione di macchinari e infrastrutture necessarie all'utilizzo del sistema; solitamente essa è trascurabile rispetto alle altre;
- Energia diretta: è l'energia consumata per il funzionamento del processo;
- Energia indiretta: considera la quota di energia necessaria per produrre e trasportare l'energia ed i materiali usati nel processo;
- Energia di feedstock: è un'energia fittizia, in quanto è la somma dell'energia potenzialmente contenuta nei materiali che sono usati come tali e non come combustibili;
- Energia dei lavoratori e per il loro trasporto: solitamente è anch'essa trascurabile.

La somma di tutti questi contributi è detta GER, Gross Energy Requirement, e corrisponde all'energia che complessivamente deve essere resa disponibile dalle risorse energetiche allo stato naturale e consumata dal sistema in modo tale da mantenerlo in produzione.

3.2 ANALISI DI INVENTARIO

L'analisi di inventario è anche detta Life Cycle Inventory (LCI); essa comprende la raccolta dei dati ed i metodi di calcolo che permettono di quantificare i dati in ingresso e in uscita per un sistema-prodotto e la loro organizzazione in un modello lungo l'intero ciclo di vita. È necessario che questa fase sia il più possibile completa e oggettiva: non è prevista una valutazione degli impatti o un'analisi critica, le quali saranno affidate alle fasi successive, ma è una semplice raccolta e organizzazione dati.

In questa fase è necessario andare a suddividere i dati in due categorie: "primary data" cioè dati raccolti direttamente sul campo, e "secondary data" ovvero dati derivati, ricavati da letteratura o da apposite banche dati (ad esempio SimaPro); l'utilizzo di banche dati semplifica molto la raccolta, tuttavia pone il problema dell'attendibilità della fonte e soprattutto della correttezza dell'interpretazione dei dati stessi. La scelta di utilizzare dati primari o dati secondari non dipende solo dall'effettiva disponibilità dei dati, ma anche e soprattutto dalle tempistiche di cui si dispone: l'acquisizione di "primary data" necessita di un quantitativo di tempo molto più elevato, di cui spesso non si dispone quando ci si appresta a fare l'analisi LCA, tuttavia essi sono da preferire ai "secondary data" in quanto permettono di ottenere dei risultati il più vicino possibile al caso analizzato. Per permettere una migliore organizzazione, si costruisce un modello grafico che metta in luce tutte le interazioni fra le singole operazioni esaminate, e da qui si parte con la raccolta dati.

Fase cruciale dell'inventario è l'allocazione, la quale consiste nell'associare i carichi energetici ed ambientali ai vari coprodotti e sottoprodotti di un processo; essa può essere eseguita seguendo diversi criteri, sebbene il più utilizzato sia quello di usare come riferimento delle caratteristiche fisiche dei prodotti (ad esempio, il più utilizzato è quello per massa).

Al termine della fase di inventario si ha la presentazione dei risultati, raggruppati in sei categorie:

- Materie prime;
- Combustibili primari;
- Feedstock;
- Rifiuti solidi;
- Emissioni gassose;
- Emissioni liquide.

Questi sei parametri saranno la base di partenza per la terza fase dell'analisi LCA.

Un aspetto fondamentale da considerare quando si svolge un'analisi del ciclo di vita di un sistema è la valutazione delle ricadute ambientali legate alla gestione della fine del ciclo di vita dei materiali utilizzati nel processo. Quando un bene ha terminato la sua vita utile, gli si presentano tre strade percorribili:

1. Recupero di materia: esso deve essere distinto tra riciclo e riuso; il primo permette il riutilizzo del materiale, dopo opportuni trattamenti, per realizzare lo stesso prodotto o un altro, mentre il secondo prevede l'utilizzo dello stesso dopo un eventuale ricondizionamento;
2. Recupero di energia: il materiale viene utilizzato come combustibile in un termovalorizzatore;
3. Smaltimento in discarica.

Ogni strada presenta i suoi aspetti ambientali, che devono essere analizzati e confrontati con i relativi benefici. Per valutare i benefici delle prime due strade è di consueto utilizzo la metodologia conosciuta come "impatti evitati": si vanno a sottrarre agli impatti ambientali associati a quello specifico scenario i flussi recuperati; in questo modo è possibile quantificare i benefici associati ad eventuali recuperi.

3.3 ANALISI DEGLI IMPATTI

Questa analisi è anche detta Life Cycle Impact Assessment (LCIA) e consiste nell'analizzare e commentare i risultati ottenuti nella fase precedente, con lo scopo di comprendere gli effetti ambientali, definiti come categorie di impatto, associati al sistema. Essa può essere suddivisa ulteriormente in due fasi, una obbligatoria e riguardante la conversione dei risultati dell'analisi di inventario in opportuni indicatori, utilizzabili direttamente o come base per successive valutazioni, e una fase opzionale in cui si vanno a normalizzare gli indicatori di categoria già calcolati. Ci si focalizzerà sulla fase obbligatoria.

Le categorie di impatto in base alle quali si raggruppano gli effetti ambientali sono definite secondo quattro principi fondamentali:

1. Ecologia, quindi effetti sulla popolazione e sull'ecosistema;
2. Salute, comprendendo anche la sicurezza nei confronti dell'uomo;
3. Risorse, che considera l'esaurimento di risorse ed energia;

4. Riflessi sociali, ovvero l'impatto su tutte le attività umane che interagiscono con il sistema considerato.

Sulla cui base sono stati scelti degli effetti specifici che caratterizzano le categorie di impatto:

- Effetto serra;
- Assottigliamento della fascia di ozono;
- Acidificazione;
- Eutrofizzazione;
- Formazione di smog fotochimico;
- Tossicità per l'uomo e per l'ambiente;
- Consumo di risorse non rinnovabili.

A questo punto è necessario classificare i processi della fase di inventario secondo queste categorie.

Verranno ora analizzate più in dettaglio le categorie sopracitate.

3.3.1 Effetto serra

L'effetto serra è un fenomeno del tutto naturale, indispensabile per la vita sulla Terra, in quanto esso permette di mantenere la superficie terrestre ad una temperatura adatta per lo sviluppo della vita. La Terra diffonde verso l'atmosfera quasi la totalità del calore che riceve, mantenendone la superficie ad una temperatura costante; la quantità di radiazione proveniente dalla superficie terrestre che è emessa verso lo spazio è bloccata in parte da diversi gas, presenti in atmosfera, che assorbono i raggi infrarossi. Il problema è sopraggiunto quando l'attività dell'uomo ha intensificato di molto la produzione di questi gas, accentuando di molto l'effetto serra naturale, rendendolo una delle cause principali del surriscaldamento globale.

Il vapore acqueo (H_2O) e l'anidride carbonica (CO_2) sono i due più importanti gas ad effetto serra; ad essi si aggiungono l'ossido nitrico (N_2O), l'esafluoruro di zolfo (SF_6), il metano (CH_4) ed i clorofluorocarburi (CFC e HCFC). Tutte le loro emissioni sono regolamentate dal protocollo di Kyoto del 1997.

L'indice caratteristico dell'effetto serra è il GWP (Global Warming Potential), ovvero qual è la capacità di un determinato gas di aumentare l'effetto serra, in relazione all'anidride carbonica, alla quale è stato assegnato $GWP=1$.

In Tabella 3-1 sono riportati i GWP dei maggiori gas ad effetto serra, come indicato dall'IPCC.

Tabella 3-1: GWP dei maggiori gas ad effetto serra

GAS	GWP
CO₂	1
CH₄	21
N₂O	310
HC_S	125-152
HCF_C_S	125
SF₆	23900

L'effetto del GWP viene calcolato in relazione a diversi periodi di esposizione, chiamati "tempi orizzonte", di 100, 200 o 500 anni; usualmente il riferimento è 100 anni.

Volendo calcolare l'effetto potenziale dovuto all'emissione di una certa quantità di kg di un certo gas, basterà moltiplicare il suo GWP per i kg di gas considerati.

3.3.2 Assottigliamento della fascia di ozono

Il Sole irradia la Terra anche con raggi UV e X, i quali sarebbero estremamente pericolosi se la Terra non avesse uno strato di ozono (O₃) presente in corrispondenza della stratosfera: esso va ad assorbire le radiazioni solari più pericolose; la sua concentrazione varia nel tempo e nello spazio, a causa di processi di formazioni, distruzione e trasporto. Il problema si pone in quanto esistono delle specie chimiche inquinanti (ad esempio NO, OH, Cl, F, Br) le quali, se presenti in atmosfera, attivano dei processi che portano alla distruzione della fascia di ozono e intaccando dunque la sua capacità protettiva nei confronti della Terra.

In questo caso, l'indicatore di categoria è l'ODP (Ozone Depletion Potential), esprimibile in kg equivalenti di R12. Il calcolo dell'effetto potenziale è fatto nello stesso modo del GWP.

3.3.3 Acidificazione

Questo fenomeno è relativo alla deposizione di alcune sostanze e dei rispettivi acidi sul suolo ed in acqua, causandone l'alterazione del PH naturale. L'acidificazione è molto pericolosa per le foreste, gli ecosistemi fluviali e lagunari, dunque sia per la flora che per la fauna. I principali composti che causando acidificazione sono gli ossidi di zolfo (SO_x), gli ossidi di azoto (NO_x) e l'ammoniaca (NH₃).

L'indicatore di categoria è l'AP (Acidification Potential), espresso in termini di kg equivalenti di SO₂ o H⁺, a cui solitamente viene attribuito AP=1. Anche in questo caso, il calcolo dell'effetto potenziale avviene nello stesso modo delle precedenti categorie di impatto.

3.3.4 Eutrofizzazione

Molto collegato al fenomeno dell'acidificazione, esso è legato ad un utilizzo smodato di fertilizzanti artificiali, in quanto tale effetto deriva dai composti a base di fosforo ed azoto: troppi fertilizzanti causando una smodata crescita di alghe in laghi e fiumi, e ciò è un pericolo per la fauna locale.

In questo caso l'indicatore di categoria è l'NP (Nutrification Potential), il quale valuta l'aumento della concentrazione di sostanze nutritive nel suolo e nell'acqua, ed è espresso in kg di NO_3 .

Esso è comunque un fattore legato alle condizioni locali.

3.3.5 Formazione di smog fotochimico

Esso è un particolare tipo di inquinamento dell'aria che si manifesta in certi periodi dell'anno, soprattutto quando le precipitazioni sono assenti per lunghi periodi; esso è legato agli scarichi dei vari mezzi di trasporto, i quali contribuiscono ad aumentare la concentrazione in atmosfera di idrocarburi (C_xH_y) ed ossidi di azoto (NO_x). Gli ossidi di azoto e gli idrocarburi provenienti dai gas di scarico reagiscono con il radicale ossidrile (OH) derivante da reazioni che coinvolgono l'ozono, andando a generare aldeidi, nitrati organici ed idrocarburi ossidati; quest'ultimi generano NO_x , che, in aggiunta a quello prodotto dai gas di scarico, comporta un aumento della sua concentrazione in atmosfera attorno a limiti di livello tossici.

Per ogni sostanza che è in grado di produrre smog fotochimico sono stati ricavati dei potenziali chiamati POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) espressi in termini di kg di C_2H_4 (etilene) equivalente.

3.3.6 Tossicità per l'uomo e per l'ambiente

Questa categoria di impatto è molto locale, dunque non è di facile interpretazione: questo perché dipende sia dalla modalità di esposizione che dalla naturale predisposizione dell'organismo interessato.

Ad oggi non è stato rilevato un metodo universale per poterne valutare gli effetti.

3.3.7 Consumo di risorse non rinnovabili

Esso viene espresso in MJ o in kg di materiale consumato. Il concetto di risorsa non rinnovabile è collegato al concetto di riserva, e dunque può essere considerato utile usare come indicatore il consumo attuale su base annua, rapportato alle riserve totali accertate. Proprio perché quest'ultima quantità non è fissa nel corso del tempo dal momento che nuovi giacimenti vengono scoperti e/o le tecnologie con cui vengono recuperate le risorse si migliorano, tale dato non è da considerarsi stabile nel corso del tempo.

3.4 INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO

Quest'ultima fase è regolamentata dalla norma ISO 14040, la quale la definisce come il momento in cui cercare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti, in modo tale da poter valutare la congruenza tra ciò che è stato ottenuto con gli scopi ed obiettivi iniziali: rappresenta dunque una sintesi di valutazione tramite un riesame critico.

Non esiste un effettivo riferimento per questa fase, sebbene la norma ISO 14044 sia dedicata questo e alla definizione iniziale; sta dunque a chi sta compiendo l'analisi e alla sua capacità di rielaborazione il capire se ciò che si è ottenuto è possibile migliorarlo oppure no.

Questa fase non è necessario avvenga alla fine, come quarta fase, ma c'è la possibilità, e solitamente viene consigliato, di analizzare i risultati al termine di ogni fase, per poter valutare se è stata svolta nel migliore dei modi. [6] [7] [8]

4 IL SOFTWARE SIMAPRO

In commercio esistono vari software atti a svolgere un'analisi LCA; in questo lavoro di tesi è stato applicato SimaPro, nella versione 9.0.0.47, recentemente rilasciata. Tale software, sviluppato dalla società olandese Pré Products Ecology Consultants, risulta essere quello maggiormente utilizzato sia in campo industriale che in campo accademico, a livello internazionale in oltre 80 Paesi.

La scelta di utilizzare un software per l'analisi ricade sul fatto che ciò comporta la possibilità di avere accesso ad una serie di banche dati molto dettagliate, frutto del lavoro di professionisti e vari centri di ricerca; a ciò si aggiunge anche la velocità e la potenza di calcolo.

SimaPro possiede una grande varietà di applicazioni, da report di sostenibilità, al calcolo dell'impronta carbonica, fino alla generazione di dichiarazioni ambientali. Esso permette di valutare, monitorare ed analizzare le prestazioni ambientali di prodotti e servizi analizzando in modo ordinato anche i cicli di vita complessi seguendo le linee guida delle norme ISO 14040 e ISO 14044. Il grande pregio di questo software è la possibilità di ottenere come risultati tabelle in formati compatibili con Excel, con la possibilità dunque di esportare e svolgere ulteriori analisi.

Le banche dati che SimaPro possiede sono: Agri-footprint (economic allocation, gross energy allocation, mass allocation), Ecoinvent 3 allocatio (system, unit), Ecoinvent 3 consequential (system, unit), ELCD, EU & DK Input Output Database, Industry data 2.0, Methods, Swiss Input Output Database, USLCI; la più utilizzata risulta essere Ecoinvent 3, sia allocation che consequential, poiché essa possiede la maggior parte dei dati che solitamente sono necessari alle analisi. Per avere un quadro più completo, nell'analisi compiuta per questa tesi sono state selezionate tutte.

Le fasi che SimaPro segue per l'implementazione sono le stesse descritte nel Capitolo 3 di questo elaborato:

1. Obiettivo e ambito: viene richiesto di selezionare le banche dati che si intendono utilizzare, oltre a descrivere lo scopo dell'analisi;
2. Inventario: si vanno a creare gli assemblaggi, selezionando dalle banche dati o creando i processi da zero, che serviranno poi per svolgere l'analisi del sistema; in questa fase si definiscono anche i vari scenari di dismissione e riciclo, ovvero il cosiddetto "fine vita";
3. Valutazione dell'impatto: il programma fornisce l'elaborazione dei risultati ottenuti con i vari metodi che si sono scelti per l'analisi;
4. Interpretazione: in cui è possibile aggiungere commenti finali relativi ai risultati dell'analisi.

Andando più nel dettaglio, la fase più lunga e complessa risulta essere la fase dell'inventario; essa è suddivisa in quattro parti, in cui le più importanti su cui è possibile operare sono le prime due: processi e fasi del prodotto. I vari processi sono suddivisi in sette categorie principali, all'interno delle quali sono presenti varie sottocategorie:

materiali, energia, trasporto, elaborazioni, uso, scenario di smaltimento, processo di smaltimento. Tramite queste categorie è possibile schematizzare tutti, o quasi, i processi. Le fasi che comportano la definizione del prodotto sono suddivise in:

- Assemblaggio: in esso vengono creati i vari assemblaggi, che serviranno poi per l'analisi, che definiscono il sistema in esame;
- Ciclo di vita: contiene un collegamento con l'assemblaggio, in quanto è in esso che si definisce il sistema finale sul quale si va a svolgere l'analisi. Esso comprende dunque anche la specifica di uno scenario di fine vita (smaltimento o riuso);
- Scenario di fine vita
- Disassemblaggio: vengono elencate le frazioni in cui verrà suddiviso il prodotto a fine vita, con i relativi scenari di smaltimento e trattamento dei rifiuti;
- Riuso: contiene un elenco di processi che descrivono il carico ambientale relativo all'operazione di riuso ed un riferimento all'assemblaggio oggetto del riuso.

Una volta fatta partire la simulazione, è possibile andare ad analizzare i risultati. Essi possono essere riportati sotto diverse rappresentazioni: solitamente, si utilizza lo schema "ad albero" (come riportato in Figura 7) per la raffigurazione schematica del sistema, successivamente si prosegue più nel dettaglio all'analisi andando ad analizzare le varie tabelle e gli istogrammi.

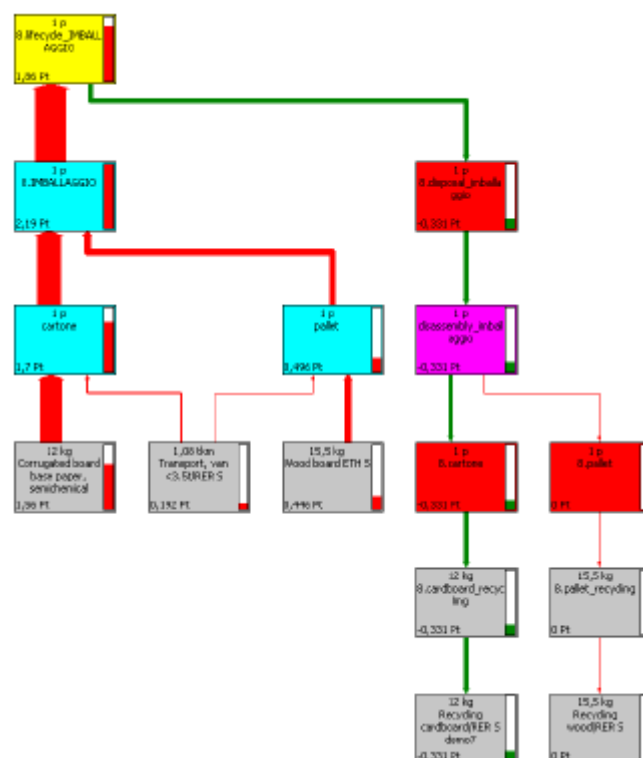


Figura 7: Esempio di raffigurazione sistema in SimaPro

4.1 METODI

Per quanto riguarda il calcolo dell'analisi vera e propria, è necessario selezionare la metodologia che si vuole applicare; nel database di SimaPro sono presenti molteplici metodi, suddivisi in sette categorie:

- European: CML-IA baseline, CML-IA non-baseline, Ecological Scarcity 2013, EDIP 2003, EPD (2013), EPS 2015d, EPS 2015dx, ILCD 2011 Midpoint+, IMPACT 2002+;
- Global: ReCiPe 2016 Endpoint (E), ReCiPe 2016 Endpoint (H), ReCiPe 2016 Endpoint (I), ReCiPe 2016 Midpoint (E), ReCiPe 2016 Midpoint (H), ReCiPe 2016 Midpoint (I);
- North American: BEES+, TRACI 2.1;
- Single issue: Cumulative Energy Demand, Cumulative Exergy Demand, Ecosystem Damage Potential, Greenhouse Gas Protocol, IPCC 2013 GWP 100a, IPCC 2013 GWP 20a, Selected LCI results, USEtox 2 (recommended + interim), USEtox 2 (recommended only);
- Superseded: BEES, CML 1992, CML 2 baseline 2000, CML 2001 (all impact categories), Eco-indicator 95, Eco-indicator 99 (E), Eco-indicator 99 (H), Eco-indicator 99 (I), Ecological footprint, Ecological Scarcity 2006, Ecopoints 97 (CH), EDIP/UMIP 97, EDIP/UMIP 97 (resources only), EPD (2008), EPD 2007 (draft version), EPS 2000, ILCD 2011 Midpoint, IPCC 2001 GWP 100a, IPCC 2001 GWP 20a, IPCC 2001 GWP 500a, IPCC 2007 GWP 100a, IPCC 2007 GWP 20a, IPCC 2007 GWP 500a, IPCC 2013 GWP 500a, ReCiPe Endpoint (E), ReCiPe Endpoint (H), ReCiPe Endpoint (I), ReCiPe Midpoint (E), ReCiPe Midpoint (H), ReCiPe Midpoint (I), TRACI, TRACI 2, USEtox (consensus only), USEtox (default), USEtox (recommended + interim), USEtox (sensitivity), USEtox Recommended, USEtox Recommended + Interim;
- Water footprint: AWARE, Berger et al 2014 (Water Scarcity), Boulay et al 2011 (Human Health), Boulay et al 2011 (Water Scarcity), Ecological Scarcity 2006 (Water Scarcity), Hoekstra et al 2012 (Water Scarcity), Motoshita et al 2010 (Human Health), Pfister et al 2009 (Eco-indicator 99), Pfister et al 2009 (Water Scarcity), Pfister et al 2010 (ReCiPe);

C'è da sottolineare che SimaPro offre la possibilità di comparare i risultati dell'analisi ottenuti con metodi diversi.

Data la grande abbondanza di metodi a disposizione, verranno ora descritti più nello specifico quelli più utilizzati, e quelli utilizzati in questo elaborato.

4.1.1 IPCC 2013

Questo metodo prende in considerazione i fattori che l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) considera come cause del cambiamento climatico, calcolati su un periodo di tempo da 20 a 100 anni.

L'applicazione di questa procedura di analisi si basa su delle eccezioni relativamente ai fattori che caratterizzano il potenziale di riscaldamento globale diretto delle emissioni nell'atmosfera, non considerando il metano (CH₄); in particolare: non si tiene conto del

range degli effetti indiretti dato dall'IPCC, non si vanno ad includere le formazioni indirette di N₂O che provengono dalle emissioni di azoto (N), non si tiene conto del forzante radiativo dovuto alle emissioni di NO_x, acqua, solfato, etc. nello strato inferiore della stratosfera ed in quello superiore della troposfera, non si includono le formazioni di CO₂ da emissioni di CO.

Al contrario di altri metodi, questo non prevede nessun tipo di normalizzazione e ponderazione. [9]

4.1.2 Cumulative Energy Demand (CED)

Questo metodo permette di effettuare una valutazione energetica di un processo tramite l'analisi LCA. Esso si basa su una versione di Ecoinvent modificata e migliorata da Pré in modo da essere applicabile alle risorse energetiche disponibili del database del software SimaPro.

Esso si basa sul consumo di risorse energetiche ed ha come obiettivo l'analisi dell'uso dell'energia attraverso l'intero ciclo di vita del sistema prodotto analizzato: si considerano quindi sia gli usi diretti che indiretti di energia. Dai risultati ottenuti da questo metodo è possibile rilevare quali sono le fasi che consumano più energia e poter dunque andare a svolgere un'azione più mirata.

I fattori di caratterizzazione sono dati per le risorse energetiche e sono suddivisi in cinque categorie di impatto:

1. Non rinnovabile, fossile
2. Non rinnovabile, nucleare
3. Rinnovabile, biomassa
4. Rinnovabile, vento, solare, geotermia
5. Rinnovabile, acqua

Anche in questo caso, non si considera la normalizzazione; per poter ottenere una domanda di energia totale (cumulativa), ad ogni categoria di impatto è assegnato un fattore di ponderazione pari a 1. [9]

4.1.3 Eco-indicator 99

È un metodo sviluppato da Pré Consultants in collaborazione con il Ministero dell'Ambiente Olandese. La prima versione è stata elaborata nel 1995, migliorata poi nel 1999.

La particolarità per il quale questo metodo viene preferito ad altri sta nel fatto che consente di delineare dei risultati di endpoint, espressi in relazione a tre categorie di danno. Le valutazioni dei danni sono sommabili tra loro in un singolo punteggio, l'Eco-indicator espresso in Point (Pt) o MilliPoint (MPt), che rappresenta le prestazioni complessive del sistema considerato. È necessario dunque indicare dei valori di normalizzazione con i relativi fattori di conversione; tali valori di normalizzazione sono ricavati per ogni categoria di danno e sono calcolati a livello europeo.

Il metodo è strutturato in tre diverse tipologie a seconda del punto di vista dal quale di intende approfondire l'analisi:

1. **Egalitaria:** il periodo di tempo considerato è a lungo termine; scegliendo questa prospettiva, i danni non possono essere evitati e potrebbero portare ad eventi catastrofici;
2. **Individualista:** il periodo di tempo considerato è a breve termine (100 anni o meno), e si va a considerare solo quello di cui si hanno effetti provati; i danni sono assunti risolvibili dallo sviluppo tecnologico e/o economico;
3. **Gerarchica:** il periodo di tempo considerato è a lungo termine, e i materiali sono considerati solo se c'è consenso in relazione ai loro effetti; i danni sono considerati evitabili se si sposa una buona gestione del processo.

Solitamente viene utilizzato l'approccio gerarchico in quanto è quello più spendibile anche con gli altri metodi; gli altri due approcci vengono utilizzati per conferire spessore all'analisi LCA.

L'Eco-indicator 99 viene preferito ad altri metodi in quanto utilizza un approccio orientato al danno ambientale, principalmente suddiviso in tre categorie:

- I. **Salute umana**, espresso come il numero di anni di vita persi e il numero di anni vissuti con disabilità; questi fattori vengono uniti e considerati come DALYs (Disability Adjusted Life Years), un indice che viene usato anche dalla World bank e dal WHO;
- II. **Qualità dell'ecosistema**, espresso come perdita di specie animali in una certa area considerata, in un determinato periodo di tempo considerato;
- III. **Esaurimento delle risorse**, espresso come il surplus di energia necessario per la futura estrazione di minerali e fonti fossili.

Ogni categoria di danno è a sua volta suddivisa in categorie di impatto, come mostrato in Figura 8.

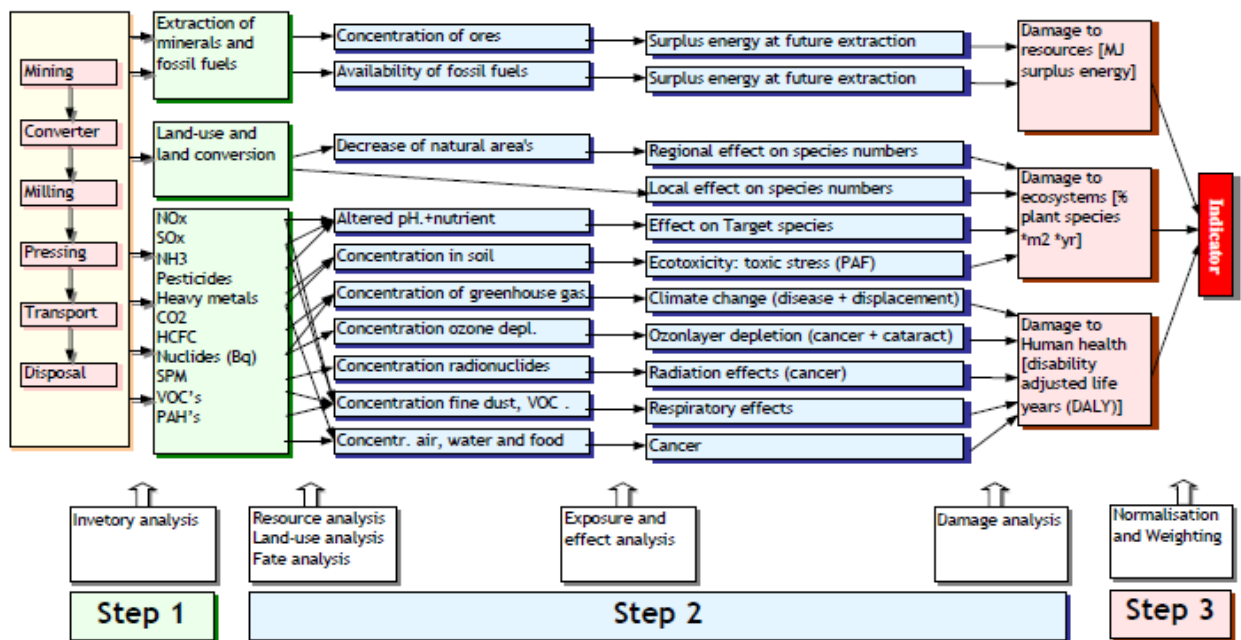


Figura 8: Rappresentazione dettagliata di un modello di danno [10]

È possibile notare come la categoria di danno salute umana (damage to human health) comprende le seguenti categorie di impatto:

- Danni causati da sostanze cancerogene
- Danni causati da sostanze che influenzano le vie respiratorie
- Danni causati dalle radiazioni ionizzanti
- Danni causati dall'assottigliamento dello strato di ozono
- Danni causati dal cambiamento climatico (cancro + cataratta)

La categoria di danno qualità dell'ecosistema (damage to ecosystems) comprende le seguenti categorie di impatto, suddivise in due:

- Danni causati dalle emissioni tossiche (eco tossicità) e danni su un certo tipo di specie animale, entrambe all'interno della categoria emissioni;
- Danni su un certo numero di specie a livello regionale e a livello locale, entrambi all'interno della categoria uso e trasformazione del territorio.

L'esaurimento delle risorse comprende i danni causati dalla necessità di un surplus di energia per l'estrazione futura, in relazione alla concentrazione dei materiali e dei combustibili fossili. [9]

È da sottolineare come le tre diverse categorie di danno sono espresse con tre differenti unità di misura: DALY per *human health*, $\text{PDF} * \text{m}^2 * \text{year}/\text{m}^2$ per *ecosystem*, surplus di energia in MJ per *resources*; è dunque necessaria la fase di normalizzazione, nella quale si rapportano i risultati ottenuti ad un valore di riferimento. I vari pesi con cui poter confrontare le diverse categorie di danno sono:

Tabella 4-1: Valori percentuali di come sono pesate le varie categorie

	Human Health	Ecosystem Quality	Resources
Egalitarian perspective	30%	50%	20%
Hierarchist perspective	40%	40%	20%
Individualist perspective	55%	25%	20%

4.1.4 ReCiPe 2016

Questo metodo può essere considerato come il successore di "Eco-indicator 99"; lo scopo iniziale era quello di creare un metodo che unisse l'approccio orientato al problema del metodo CML-IA e l'approccio orientato al danno del metodo Eco-indicator 99. Il primo metodo definiva le categorie di impatto ad un livello *midpoint*, mentre il secondo ad un livello *endpoint*. Entrambi gli approcci presentavano delle problematiche: il primo, prendendo in considerazione una vasta gamma di impatti, si traduce in una grande difficoltà nell'analisi dei risultati, mentre il secondo, considerando solo tre categorie di impatto, permette un'interpretazione molto più facile, ma con un elevato livello di incertezza. Il metodo ReCiPe è stato sviluppato per poter unire gli aspetti positivi di

entrambe le metodologie, in cui i fattori di caratterizzazione *midpoint* sono moltiplicati per i fattori di danno, per ottenere i valori di caratterizzazione *endpoint*.

All'interno del livello *midpoint*, sono comprese 18 categorie di impatto:

1. Riduzione dell'ozono
2. Tossicità per l'uomo
3. Radiazioni ionizzanti
4. Formazione di ossidanti fotochimici
5. Formazione di particolato
6. Acidificazione terrestre
7. Cambiamento climatico
8. Ecotossicità terrestre
9. Occupazione di suolo agricolo
10. Occupazione di suolo urbano
11. Trasformazione di suolo naturale
12. Ecotossicità marina
13. Eutrofizzazione marina
14. Eutrofizzazione dell'acqua pura
15. Ecotossicità dell'acqua pura
16. Esaurimento dei combustibili fossili
17. Esaurimento dei minerali
18. Esaurimento dell'acqua pura

A livello *endpoint*, la maggior parte delle categorie di impatto appena elencate sono moltiplicate per i fattori di danno e aggregate nelle tre categorie *endpoint*:

1. Salute umana
2. Ecosistema
3. Costi di eccedenza delle risorse

Queste tre categorie sono normalizzate, ponderate ed aggregate in un unico punteggio. La Figura 9 mostra la relazione che intercorre tra le categorie di impatto a livello *midpoint* e quelle a livello *endpoint*:

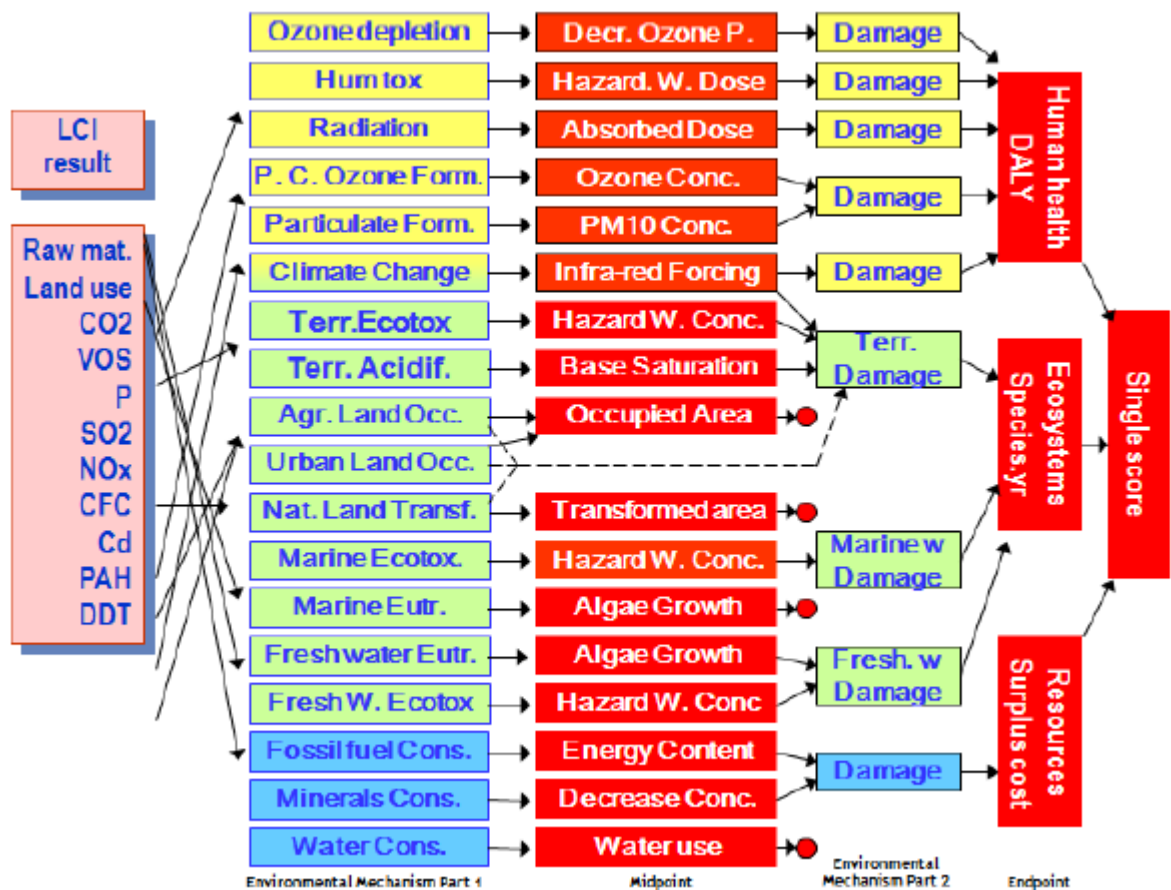


Figura 9: Rappresentazione della relazione tra inventario e le categorie midpoint e le categorie endpoint [10]

È ovvio che i meccanismi ambientali e i modelli di danno sono legati ad una forte incertezza. Nel metodo ReCiPe si è deciso di seguire il raggruppamento delle differenti fonti di incertezza in tre categorie/scenari come indicato dal metodo Eco-indicator 99; queste tre prospettive sono: egualitaria, individualistica e gerarchica.

In questo modello la normalizzazione viene riportata alla popolazione: solitamente viene considerata una popolazione di 464036294 cittadini per l'Europa, e di 6055000000 cittadini per il mondo. [10]

5 IL SISTEMA IN ESAME: FX-EVO 16-20

L'intero elaborato si basa sull'analisi di una turbina ad asse orizzontale di proprietà ESPE srl. In Figura 10 è possibile vederla rappresentata in foto.



Figura 10: Turbina eolica FX-EVO 16-20 [11]

L'utilizzo di questa turbina è ipotizzato per una classe di vento IEC Classe 1, ovvero velocità del vento 28 km/h. I dati caratteristici sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 5-1: Caratteristiche FX EVO 16-20 [11]

POTENZA NOMINALE [kW]	19.80
VELOCITÀ DI AVVIO (cut-in) [m/s]	3
VELOCITÀ DI ARRESTO (cut-out) [m/s]	25
VELOCITÀ NOMINALE [m/s]	8

L'aerogeneratore FX 16-20 è dunque una turbina da 20 kW, in grado di avviarsi quando la velocità del vento raggiunge i 3 m/s. raggiunta la velocità del vento di 8 [m/s], la pala raggiunge la sua potenza nominale che sarà mantenuta fino ai 25 m/s, velocità di arresto in cui la turbina verrà messa in posizione di sicurezza, fermandosi. Si denota dunque come questo aerogeneratore sia di piccole dimensioni.

Le curve caratteristiche, relative alla produzione annuale stimata e alla curva di potenza e la curva del coefficiente di potenza, sono riportate in seguito:

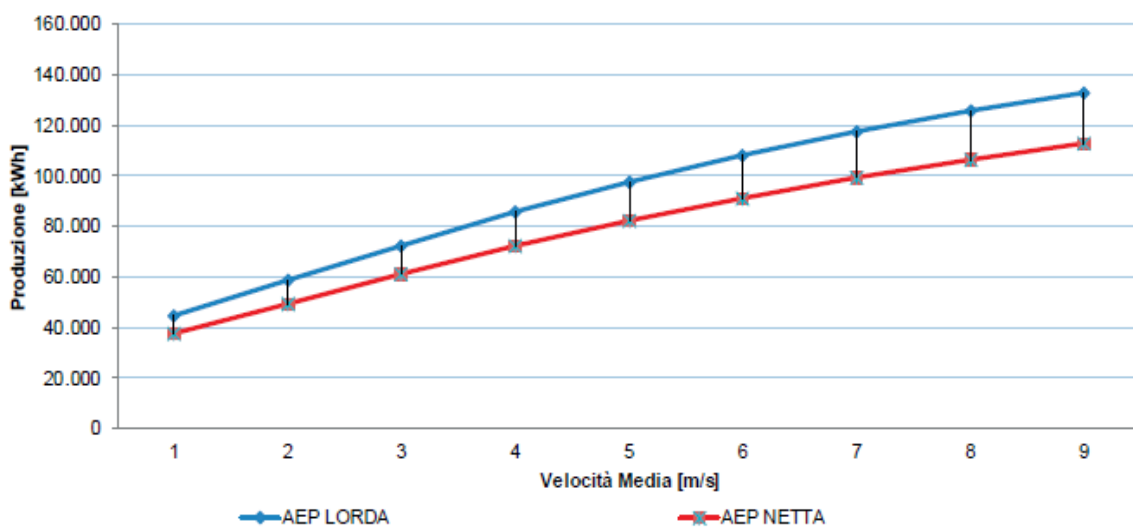


Figura 11: Produzione annuale stimata FX 16-20 [12]

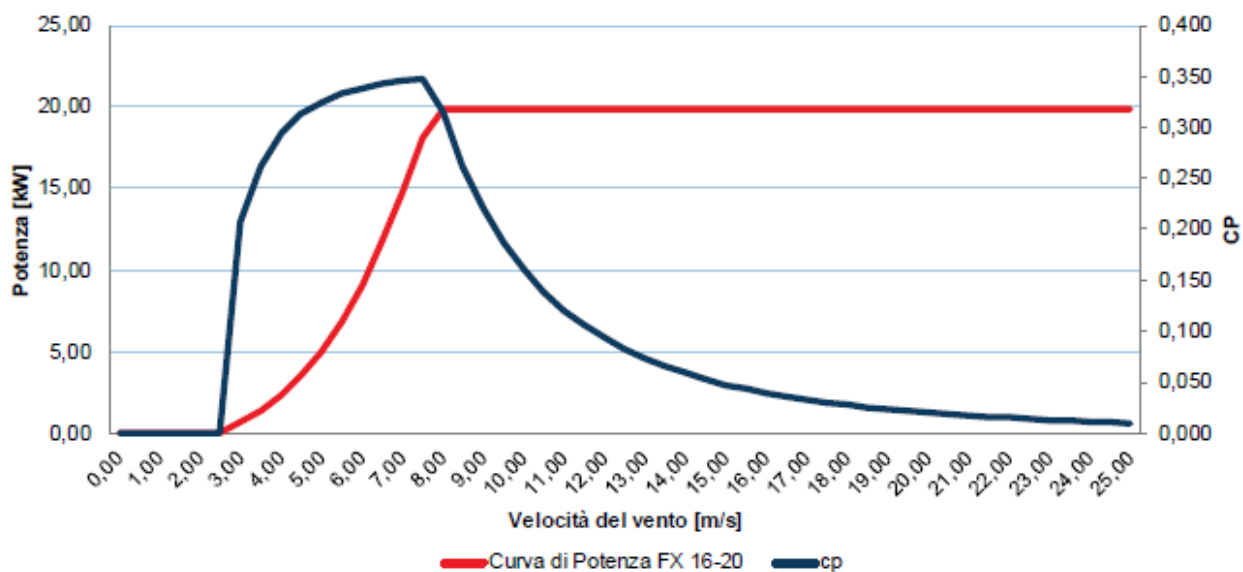


Figura 12: Curva di potenza e CP di FX 16-20 [12]

È da specificare che queste curve si riferiscono a valori stimati, e che ovviamente potenza e coefficiente di potenza differiscono in relazione al luogo di installazione della turbina in quanto dipendono dalla ventosità del sito. Per una maggiore comprensione di come sono state costruite queste curve, si rimanda ai datasheet relativi, facilmente reperibili nel sito di ESPE srl.

Dal punto di vista delle dimensioni, i valori sono:

Tabella 5-2: Geometria FX 16-20 [11]

DIAMETRO ROTORE [m]	15.94
AREA SPAZZATA DALLE PALE [m ²]	199.5
VELOCITÀ DI ROTAZIONE [rpm]	50
RANGE DI ROTAZIONE [rpm]	26.5 - 50
VELOCITÀ MASSIMA DI ROTAZIONE [rpm]	70

Il sistema è composto da:

- Fondazioni
- Torre, la quale può essere di tre differenti altezze (18 m, 26 m, 40 m) in base al sito di installazione scelto e dunque dalle caratteristiche del vento relative;
- Navicella, al cui interno essa risulta essere composta principalmente da: generatore a magneti permanenti della serie PMG Soga EV400 L, inverter del tipo elpower cleanverter 20 TL e quadro elettrico, imbardata con relativo freno;
- Pale

- Hub

Per la componentistica nel dettaglio, si rimanda al capitolo successivo, in cui verrà analizzato il sistema, considerando la sua implementazione nel software SimaPro. [11] [12] [13] [14]

6 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO DELLA TURBINA FX EVO 16-20 IN SIMAPRO

In questo capitolo verrà brevemente illustrato come è stata implementata l'analisi del sistema in SimaPro, avendo cura di evidenziare i vari passaggi. Per completezza, ci si è inizialmente concentrati sul sistema in generale, per poi entrare nel dettaglio per analizzare i singoli componenti.

In prima analisi, si è scelta come unità funzionale a cui riferire i risultati una turbina, e successivamente si è riportato il tutto al kWh per poter dunque avere dei risultati confrontabili con altre tipologie di macchine; è da sottolineare come, nel caso di una turbina eolica, il kWh prodotto non dipende solo dal design della macchina, ma anche e soprattutto dal sito di analisi scelto: questo perché la potenza prodotta è relativa alla ventosità del sito, dunque siti diversi presentano ventosità diverse. In questo caso si è scelto come sito in esame la provincia di Foggia, in particolare la città di Candela. Questa scelta è stata fatta tenendo conto del fatto che, in Italia, è Foggia la provincia con maggior potenza installata, dunque è uno dei casi di più probabile installazione della macchina.

A seguire, si è svolta la stessa analisi per un secondo sito, Monte d'Aria, in località Serrapetrona in provincia di Macerata, per poter fare dei confronti e valutare come il sito influisce sugli impatti.

Ci si riferisce al sito di Candela per la descrizione del sistema; per quanto riguarda il sito di Monte d'Aria, si mantiene lo stesso procedimento, modificando i dati caratteristici del sito.

Per il calcolo della potenza a cui ci si riferisce, ci si è serviti dei datasheet relativi alla turbina in esame e della ventosità del sito.

Tabella 6-1: Dati per la costruzione della curva di potenza e del C_p riferiti alla turbina FX EVO 16-20 [12]

Velocità [m/s]	Potenza [kW]	C_p
0	0	0
0,5	0	0
1	0	0
1,5	0	0
2	0	0
2,5	0	0
3	0,69	0,207
3,5	1,36	0,262
4	2,33	0,294
4,5	3,53	0,313
5	5,02	0,325
5,5	6,85	0,333
6	9,05	0,339
6,5	11,64	0,343
7	14,66	0,345
7,5	18,14	0,348
8	19,8	0,314
8,5	19,8	0,262
9	19,8	0,221

9,5	19,8	0,188
10	19,8	0,161
10,5	19,8	0,139
11	19,8	0,121
11,5	19,8	0,106
12	19,8	0,093
12,5	19,8	0,082
13	19,8	0,073
13,5	19,8	0,065
14	19,8	0,059
14,5	19,8	0,053
15	19,8	0,048
15,5	19,8	0,043
16	19,8	0,039
16,5	19,8	0,036
17	19,8	0,033
17,5	19,8	0,03
18	19,8	0,028
18,5	19,8	0,025
19	19,8	0,023
19,5	19,8	0,022
20	19,8	0,02
20,5	19,8	0,019
21	19,8	0,017
21,5	19,8	0,016
22	19,8	0,015
22,5	19,8	0,014
23	19,8	0,013
23,5	19,8	0,012
24	19,8	0,012
24,5	19,8	0,011
25	19,8	0,01

I dati riportati in Tabella 6-1 sono stati forniti da ESPE Srl, e da loro ottenuti studiando il design della turbina di riferimento. La tabella risulta di facile lettura in quanto, in relazione al sito scelto e dunque alla velocità media annua del vento di tale sito, è possibile leggere il coefficiente di potenza e la potenza media relativi. È quindi necessario risalire alla ventosità del sito scelto (in questo caso Candela). Per fare ciò, ci si è affidati all'atlante eolico interattivo, recuperabile dal sito RSE (Ricerca Sistema Energetico). [17]

Per valutare la ventosità del sito, si ricerca a quale classe IEC del vento esso appartiene: le classi si riferiscono a vari valori di velocità media, raffiche e turbolenza del vento, e sono normate dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale: Candela rientra nella classe 2 del vento, a cui si riferisce una velocità media annua del vento di 7.5 [m/s].

Alla velocità di 7.5 [m/s], corrisponde una potenza di 18.14 [kW], dunque l'energia producibile annualmente a Candela è calcolata come:

$$24 * 365 * 18.14 = 150199 [kWh/anno]$$

Si deve valutare tuttavia che le ore annue di effettivo utilizzo della turbina sono nettamente inferiori, questo perché bisogna considerare i momenti in cui la turbina deve essere spenta per manutenzione, ma anche quando i livelli del vento sono troppo bassi o

troppo alti per l'utilizzo, e dunque per fattori di sicurezza si deve provvedere allo *shut down*. È necessario dunque moltiplicare tale valore per un fattore di utilizzazione di 0.4, che tiene conto di questi momenti. L'energia prodotta annualmente è dunque:

$$150199 * 0.4 = 60080 [kWh/anno]$$

6.1 INVENTARIO

Per meglio comprendere come si è svolta l'analisi, in Figura 13 viene mostrato il diagramma che descrive il sistema; in questo modo sono facilmente intuibili anche i confini del sistema.

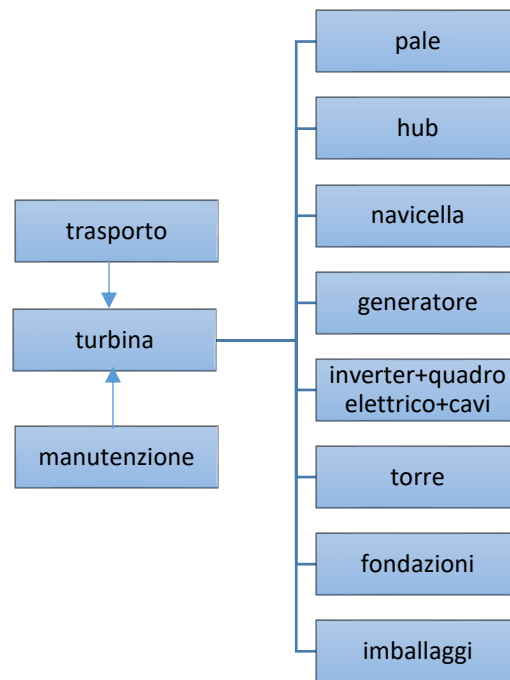


Figura 13: Diagramma per l'analisi del sistema turbina

La turbina è dunque formata dai vari sottosistemi: pale, hub, navicella, generatore, inverter + quadro elettrico + cavi, torre, fondazioni, imballaggi; a questo, si vanno ad aggiungere trasporto dei relativi sottosistemi e manutenzione, i quali, per una migliore lettura dei risultati, sono stati considerati separatamente.

Si vanno ora ad analizzare più nel dettaglio i singoli componenti.

6.1.1 Fondazioni

Una volta scelto il sito, si vanno a costruire le fondazioni: viene gettata una colata di cemento iniziale, sulla quale vengono poi posizionati i ferri. La taglia e le caratteristiche delle fondazioni dipendono da diversi fattori: la geologia del sito, la sua ventosità e ogni regolamentazione da seguire relativa al sito scelto. In questo caso, per le dimensioni, e dunque il peso, ci si riferisce ad un parallelepipedo di dimensioni $6 \times 6 \times 1.6 \text{ m}^3$, a cui è associato un dosaggio minimo di cemento di 300 kg/m^3 . La colata avrà dunque in volume di 57.6 m^3 , che verrà poi riempito con barre di acciaio, per un totale di 96 barre, lunghe 8 m, con un peso di 2.466 kg/m .

In sintesi, dunque, riportando anche il materiale scelto dal database di SimaPro, le fondazioni sono state costruite come definite in Tabella 6-2.

Tabella 6-2: Fondazioni

Elementi	Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Colata di cemento	Cemento armato	Pre-cast concrete, min. reinf., prod mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER S	300*57,6=17280
Barre di acciaio	Acciaio B50C	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	96*8*2,466=1894
Peso totale [kg]			19174

6.1.2 Torre

La torre per questo tipo di turbina può avere tre differenti altezze: 18 m, 26 m, 40 m. in questo caso, si è scelto come altezza 26. La torre viene costruita suddivisa in diverse parti in numero dipendente dall'altezza, in questo caso tre parti, per facilitarne il trasporto. Essa risulta essere fatta di acciaio zincato a caldo, ed ogni parte viene provvista di flange per rendere l'assemblaggio in sito più facile. In questo sottosistema viene considerata come parte integrante anche la gabbia di ancoraggio, costituita anch'essa di acciaio zincato. Per le specifiche si rimanda alla Tabella 6-3.

Tabella 6-3: Torre

Elementi	Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Torre	Acciaio zincato a caldo	Reinforcing steel {RoW} production APOS, U	16700
Gabbia di ancoraggio	Acciaio zincato	Reinforcing steel {RoW} production APOS, U	899
Peso totale [kg]			17599

Dal database SimaPro si è scelto di considerare l'acciaio zincato come acciaio rinforzato, in quanto le specifiche di questo elemento risultano essere maggiormente simili al materiale nella realtà rispetto a tutti gli altri.

6.1.3 Generatore

Sebbene esso si trovi all'interno della navicella, si è preferito analizzarlo separatamente perché ritenuto necessario. Il generatore che si trova nella turbina FX 16-20 è un

generatore a magneti permanenti di proprietà Soga S.p.A. energyteam, con dicitura PMG Soga EV400 L. La serie EV, grazie alla particolare struttura “naked”, risulta essere molto più leggera e dunque molto più efficiente rispetto alle normali soluzioni; proprio per questa sua caratteristica è stato scelto per essere utilizzato in questa turbina. A seguire, in Tabella 6-4, sono riportate in dettaglio le caratteristiche.

Tabella 6-4: Generatore a magneti permanenti

Elementi	Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Albero	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	170
Cuscinetti	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	29
Ghiera	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	2
Avvolgimento+collegamenti	Rame	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1mm ² (duplicate) EU-15 S S	99
Lamierini statore	Ferro	Iron and steel, production mix/US	218
Flange	Ferro	Iron and steel, production mix/US	26
Profilo statore	Ferro	Iron and steel, production mix/US	43
Coppia	Ghisa	Cast iron {GLO} market for APOS, U	44
Rotore	Ghisa	Cast iron {GLO} market for APOS, U	186
Scudi	Ghisa	Cast iron {GLO} market for APOS, U	159
Magnet permanenti	NdFeBo	Permanent magnet, for electric motor	29

		{GLO} production APOS, U	
Varie	Componenti elettronici	Electronics, for control units {GLO} market for APOS, U	28
Peso totale [kg]			1033

6.1.4 Navicella

La navicella viene spedita già imballata, dunque non è ESPE che si carica della costruzione, ma solo della messa in opera. Si ricordi che al suo interno risulta esserci anche il generatore a magneti permanenti, ma non viene menzionato in questo specifico assemblaggio in quanto, per scelta di analisi, si preferito studiarlo a sé e dunque esso possiede un assemblaggio separato. In Tabella 6-5 sono riportati i dati come inseriti nel software SimaPro; non viene menzionata la bullonistica in quanto di un peso nettamente inferiore rispetto ai componenti che si è deciso considerare, anche e soprattutto perché i materiali di cui sono composti risultano già ampiamente considerati in altri elementi.

Tabella 6-5: Navicella

Elementi	Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Cover navicella	Vetroresina	Continuous filament glass fibre (wet chopped strands), at plant RER S	28
Telaio navicella	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	1043.86
Brake hub	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	56.4
Brake disk hub	Ghisa	Cast iron {GLO} market for APOS, U	173.62
Yaw brake	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	10.87
Yaw disk brake	Acciaio inox	Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO	292.951
Yaw motor	Motore a magneti permanenti	Permanent magnet, for electric motor	12

		{GLO} production APOS, U	
Cuscinetti imbardata	Acciaio da bonifica	Steel sections, including recycling, blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	82.4
Trasmissione motore	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	75
Centralina idraulica	Materiale elettronico	Electronics, for control units {GLO} market for APOS, U	20
Positive brake	Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	16
Olio freni	Q8 HANDEL/46 (olio minerale paraffinico ad altissimo indice di viscosità)	Oil, crude	366
Peso totale [kg]			2177.101

6.1.5 Inverter, quadro elettrico e cavi di collegamento

Per quanto riguarda questo assemblaggio, è stato costruito come unione di altri assemblaggi, sempre per facilità di analisi. Le specifiche sono riportate in Tabella 6-6, Tabella 6-7, Tabella 6-8 che seguono. In particolare, l'inverter è del tipo elpower CLEANVERTER 20 TL, con una potenza nominale di 20 kW, realizzato in quadro da esterno, senza trasformatore ed in configurazione doppio inverter con controllo digitale DSP (Digital Signal Processor); la scelta di questo inverter è dovuta alla notevole capacità di sovraccarico degli inverter che consente di sfruttare al meglio le raffiche di vento.

Tabella 6-6: Inverter

Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Rame	Copper sheet, technology mix, consumption mix, at plant, 0.6 mm thickness EU-15 S	76.67
Acciaio	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc	153.33

	furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	
	Peso totale [kg]	230

Tabella 6-7: Quadro elettrico

Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Rame	Copper sheet, technology mix, consumption mix, at plant, EU-25 S	15
Lamiera di ferro	Steel sections (ILCD), blast furnace route/electric arc furnace route, production mix, at plant, 1 kg GLO S	1
Plastica	Plastic mixture average carbon content (dry matter), use only in PAS2050 wizard	14
	Peso totale [kg]	30

Per quanto riguarda la parte dei cavi di collegamento, si sono considerati quelli principali che collegano la navicella al resto della struttura; in relazione all'isolamento del cavo, esso sarebbe in neoprene. Poiché nel database SimaPro tale materiale non è presente, si è scelto di considerare il tetrafluoroetilene in quanto anch'esso elastomero come il neoprene.

Tabella 6-8: Cavi di collegamento

Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Rame	Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1mm2 (duplicate) EU-15 S S	90
Isolamento in neoprene	Tetrafluoroethylene {GLO} market for APOS, U	10
	Peso totale [kg]	100

6.1.6 Pale e hub

In questo caso si modella una pala, che poi verrà considerata tre volte per considerare le tre pale. Le specifiche tecniche sono riportate in Tabella 6-9. In particolare, è da sottolineare come ogni pala è provvista di uno scaricatore per fulmini, fondamentale per preservare la struttura della turbina da eventuali danni prodotti da temporale.

Tabella 6-9: Pale

Elementi	Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
Trattamenti superficiali	Vetroresina	Continuous filament glass fibre (wet chopped strands), at plant RER S	98.9
Scaricatore fulmini	Rame	Copper sheet, technology mix, consumption mix, at plant, 0.6 mm thickness EU-15 S	1.86
Bulloni a t	Acciaio	Steel hot rolled coil, including recycling, blast furnace, production mix, at plant, 1kg, typical thickness between 2-7 mm	9.1
Copertura in gel	Resina poliestere	Polyester resin, unsaturated {GLO} market for APOS, U	5.8
Flangia radicolare	Acciaio inox	Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO	2.7
Peso netto pala	Resina poliestere	Polyester resin, unsaturated {GLO} market for APOS, U	85.5
Peso totale [kg]			203.86

Tabella 6-10: Hub

Materiali	Definizione in SimaPro	Peso [kg]
ghisa	Cast iron {GLO} market for APOS, U	308

6.1.7 Imballaggi

Essi vengono considerati come assemblaggio separato dal resto, in modo tale che sia così possibile analizzarne gli effetti in modo più semplice e completo. Per quanto riguarda gli imballaggi, vengono considerati quelli relativi a navicella + hub (trasportati assieme), pale e inverter.

La maggior parte dell'imballaggio è pallet di legno (wooden pallet), tranne una piccola percentuale relativa all'imballaggio delle pale che è in polistirene per proteggerle meglio dagli urti durante il trasporto.

Tabella 6-11: Imballaggi

Componente	Definizione in SimaPro	Peso totale [kg]
Imballaggio navicella+hub, pale, inverter	Dummy wooden pallet (EURO)	1977.02
Strato protettivo pala (considero 3 pale già)	Polystyrene, general purpose {GLO} market for APOS, U	32.34*3
Peso totale [kg]		2074.02

6.1.8 Trasporto e Manutenzione

Anche in questo caso si preferisce andare a costruire un assemblaggio a sé per poter analizzare al meglio gli impatti derivanti dal trasporto e dalla manutenzione, anche e soprattutto perché considerati forse la parte più impattante in tutta l'analisi.

Dal punto di vista del trasporto, si considera che esso avvenga esclusivamente tramite camion bilico, in SimaPro *"Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight, 27 t max payload RER S"*.

Vengono considerati separatamente i seguenti casi:

- Torre: viene trasportata divisa in tre parti, quindi su tre camion diversi; la torre proviene da Tirana, in Albania, dunque la distanza Tirana-Candela (sito prescelto dove andare a posizionare la turbina) risulta pari a 1835 km;
- Generatore: esso proviene da Montecchio Maggiore (sito Soga S.p.A. energyteam), e viene trasportato fino a Grantorto in sede ESPE, in cui viene assemblato alla navicella; distanza percorsa 40 km;
- Navicella: essa viene spedita, assieme al generatore e all'hub, nel sito prescelto; distanza Grantorto-Candela=728 km;
- Pale: ogni pala viene trasportata singolarmente, quindi tre pale corrispondono a tre camion; esse provengono da Castel Volturno (in provincia di Caserta), dunque la distanza da considerare sono 171 km.

Dal punto di vista della manutenzione, è possibile solo fare una stima in quanto non è possibile conoscere in precedenza di quanta manutenzione necessiterà la turbina nel futuro una volta installata; questo perché dipende da vari fattori di imprevedibilità. ESPE si avvale della manutenzione in loco, affidandosi quindi a centri prescelti. Si è ipotizzato per l'analisi un tragitto percorso di 10 km, 10 km per andare e 10 km per tornare, con una cadenza di due volte l'anno; considerando dunque una vita utile della turbina di 20 anni, il tragitto totale percorso sono $(10 + 10) * 2 * 20 = 800 \text{ km}$. Si considera una macchina diesel, in SimaPro *"Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 {GLO}| market for | APOS, U"*.

6.2 SMALTIMENTO

Considerando il fatto che si tratta di un'analisi LCA, molto importante da considerare sono anche i processi di smaltimento applicati nella turbina. Per avere dei risultati più completi, si è scelto di procedere alla creazione di scenari di smaltimento relativi ad ogni assemblaggio (generatore, fondazioni, torre, inverter+quadro elettrico+cavi di collegamento, navicella, hub, pale); in questo modo è possibile avere dei risultati meglio spendibili nel mercato in quanto si può decidere dove concentrarsi maggiormente per il miglioramento dei processi.

Per lo svolgimento di questa analisi in particolare, non è necessaria la costruzione di processi di smaltimento ad hoc, ma vengono utilizzati quelli all'interno del database di SimaPro.

Verrà ora descritto il procedimento generale che si è seguito per la costruzione dei vari scenari di smaltimento.

Prodotti							
Specificazione del rifiuto	Quantità fisica	Unità di misura	Categoria	Commento			
	0	kg	Altri				
Input							
Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)	Quantità fisica	Unità di misura	Distribuzione	SD ² o 2*SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)							
Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)	Quantità fisica	Unità di misura	Distribuzione	SD ² o 2*SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)							
Output							
I tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream rifiuto	Tipo di Materiale / Rifiuto		Percentuale	Commento			
(Inserisci linea qui)	Tutti i tipi di rifiuto		0 %				
Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione	Percentuale	Commento					
(Inserisci linea qui)	0 %						

Figura 14: Schermata scenario di smaltimento

Si fa riferimento alla Figura 14. Ogni scenario di smaltimento è stato modellato considerando come base 1 kg di rifiuto. Dal punto di vista della costruzione degli output:

1. nella casella "Tipo di materiale/rifiuto" viene inserito il rifiuto in generale (steel, copper, ferro metals, etc.) che va a comporre l'assemblaggio a cui ci si riferisce, in modo tale che venga considerato ogni elemento che contiene il rifiuto che si vuole analizzare; nella casella "Tipi di materiale e/o rifiuto separati dallo stream rifiuto" si inserisce il processo di smaltimento considerato per il materiale/rifiuto inserito, da scegliere nella lista già presente all'interno del software. È necessario inserire la percentuale relativa a tale processo: per l'acciaio, si è considerato uno smaltimento del 95%, per il rame del 99%, mentre per gli altri materiali si è considerato un processo del 100% in discarica.
2. Nella casella "flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione" è necessario definire cosa succede a ciò che non viene definito nelle percentuali indicate nelle linee precedenti, ovvero si va a porre che il 100% di quello che rimane diventa un generale rifiuto "waste, unspecified". Tale linea è fondamentale da inserire per non inficiare l'intero scenario di smaltimento.

La scelta delle percentuali di smaltimento è stata fatta in modo oculato: per il rame, dato il suo elevato costo e difficile reperibilità, è stata imposta una massima percentuale di smaltimento (viene considerato il caso 100% di recupero ideale, dunque sono state ipotizzate 1% di perdita); per quanto riguarda l'acciaio, esso risulta il materiale tra tutti più riciclabile, con un massimale di 95%, in quanto è uno dei materiali più utilizzati. [15]
[16]

6.3 CICLO DI VITA

Per finire l'impostazione dell'analisi, è necessario impostare i cicli di vita, andando ad indicare l'assemblaggio di riferimento e lo scenario di smaltimento relativo: si creano dunque i cicli di vita di generatore, fondazioni, torre, navicella, hub, pale, inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento. Viene inoltre creato il ciclo di vita totale della turbina, nel quale vengono aggiunti gli assemblaggi relativi a trasporto e a manutenzione: per fare ciò, poiché si vuole mantenere i risultati ottenuti con i cicli di vita specifici di ogni componente, si ricorre all'utilizzo dei cicli di vita supplementari.

Non viene aggiunto nessun riferimento ad energie, in quanto già considerate all'interno di tutti i processi selezionati.

7 ANALISI DEGLI IMPATTI DELLA TURBINA FX-EVO 16-20 IN SIMAPRO

In questo capitolo verranno presentati i risultati ottenuti con l'analisi della turbina, applicando i metodi precedentemente analizzati: Cumulative Energy Demand, IPCC 2013 GWP (con periodo di tempo sia di 20 anni che di 100 anni), ReCiPe 2016 (metodo gerarchico, sia considerando il midpoint che l'endpoint). Si è scelto di non utilizzare il metodo Eco-indicator 99 poiché è obsoleto.

Per semplicità di lettura, si è preferito considerare ogni metodo separatamente, analizzando i cicli di vita di ogni componente e della turbina, considerando confronti tra i vari componenti e tra i componenti e la turbina, per andare a valutare quale sia quello più impattante; infine, verranno tratte le conclusioni generali, valutando dove poter intervenire.

7.1 SMALTIMENTO: VANTAGGIO O SVANTAGGIO?

È innanzitutto interessante andare a valutare se sia o no vantaggioso il processo di smaltimento per ogni componente, in quanto in certi casi può risultare meno conveniente dal punto di vista degli impatti andare a compiere processi di smaltimento. Per l'analisi si è scelto il metodo ReCiPe 2016, poiché è il più recente tra quelli proposti nella libreria SimaPro, ed inoltre esso permette il calcolo del Global warming, come kg CO₂ equivalente. Le conclusioni sono state fatte considerando i vari grafici ad albero ottenuti con l'analisi. Vengono riportati in seguito i vari alberi relativi ai vari componenti. Per un maggiore ordine, in questo capitolo sono riportate solo le conclusioni relative a questa tematica, gli alberi sono raccolti nell'Appendice.

Si decide di considerare come valore di riferimento per valutare se il processo di smaltimento sia vantaggioso o meno almeno un 20% di kg CO₂ equivalente: questo valore è relativo all'efficienza del processo, in quanto certamente un qualsiasi valore di risparmio è da considerarsi positivo, ma risulta importante anche valutarlo in relazione ai costi necessari per il processo di riciclo rispetto al produrlo da materia prima. [16]

TORRE: dal punto di vista dei kg CO₂ equivalente, lo smaltimento della torre risulta molto vantaggioso; questo, come facilmente intuibile, è da riferirsi alla totale composizione della torre di acciaio, precisamente acciaio rinforzato. Con lo smaltimento è possibile un risparmio di 245 kg CO₂ equivalente, ovvero poco più dell'80%: ciò vuol dire che risulta molto vantaggioso andare a considerare il totale smaltimento di questo assemblaggio;

FONDAZIONI: dal punto di vista dei kg CO₂ equivalente, lo smaltimento delle fondazioni risulta molto vantaggioso, con un risparmio di 26.3 kg CO₂ equivalente (circa il 76%); è necessario però considerare che questo valore si riferisce allo smaltimento dei ferri di acciaio, i quali risultano però immersi nel cemento armato, dunque spesso non ha senso effettuare smaltimento e il sito di fondazione rimane anche dopo la dismissione della turbina;

GENERATORE: in questo caso dal punto di vista dei kg CO₂ equivalente non è assolutamente vantaggioso lo smaltimento, in quanto si riesce a ridurre solo 1.19 kg CO₂ equivalente (circa il 4%): questo è dovuto alla presenza di componenti elettroniche e magneti permanenti, considerati come RAEE (=rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche);

NAVICELLA: dal punto di vista dei kg CO₂ equivalente il suo smaltimento risulta essere decisamente vantaggioso, in quanto si va a risparmiare 8.85 kg CO₂ equivalente, pari al 56%. Anche in questo caso, la componente elettronica e magneti permanenti vengono considerati come rifiuto RAEE, tuttavia la parte più preponderante risulta essere quella relativa all'acciaio, smaltito al 95%;

PALE: lo smaltimento in questo caso non risulta vantaggioso, in quanto il quantitativo di kg CO₂ equivalente risparmiato è 0.44 kg CO₂ equivalente, circa il 3%; questo dato è relativo al fatto che la componentistica maggioritaria è vetroresina e resina poliesteri, non smaltibile o, se smaltibile, assolutamente non conveniente;

INVERTER+QUADRO ELETTRICO+CAVI DI COLLEGAMENTO: considerando i kg CO₂ equivalente risparmiati, sono 0.684, poco più del 5%, dunque il processo non risulta vantaggioso: ciò è dovuto alla grande presenza di componenti elettriche, smaltite dunque come RAEE.

Nella tabella seguente vengono riassunti i risultati ottenuti, con le percentuali esatte di kg CO₂ equivalente recuperata.

Tabella 7-1: Smaltimento: vantaggio o svantaggio?

	assemblaggio	smaltimento	percentuale recuperata
	kg CO2 eq	kg CO2 eq	[%]
generatore	27,3	-1,19	4,358974359
hub	4,55	-0,0104	0,228571429
inverter + q.el + cavi di collegamento	12,1	-0,684	5,652892562
navicella	15,8	-8,85	56,01265823
pale	14	-0,44	3,142857143
torre	298	-245	82,2147651
fondazioni	34,3	-26,3	76,67638484

A conclusione, si decide di impostare lo studio della turbina con le varie metodologie considerando inizialmente la turbina nel suo insieme con l'imposizione dello smaltimento di tutti gli assemblaggi, in seguito viene analizzata la turbina imponendo solo gli smaltimenti vantaggiosi: torre e navicella.

7.2 CUMULATIVE ENERGY DEMAND (CED)

Questo metodo ha come obiettivo quello di analizzare l'uso dell'energia attraverso l'intero ciclo di vita del sistema, considerando sia gli usi diretti che indiretti. Si procede considerando prima la turbina nel suo complesso, poi componente per componente, confrontando i risultati ottenuti.

Considerando il sistema turbina in generale, si nota dalla Figura 15, come era già possibile intuire, che il processo più impattante, quello che ha in questo caso una maggiore richiesta di energia non rinnovabile (da fonte fossile) è la torre, questo perché essa è il componente di maggior peso.

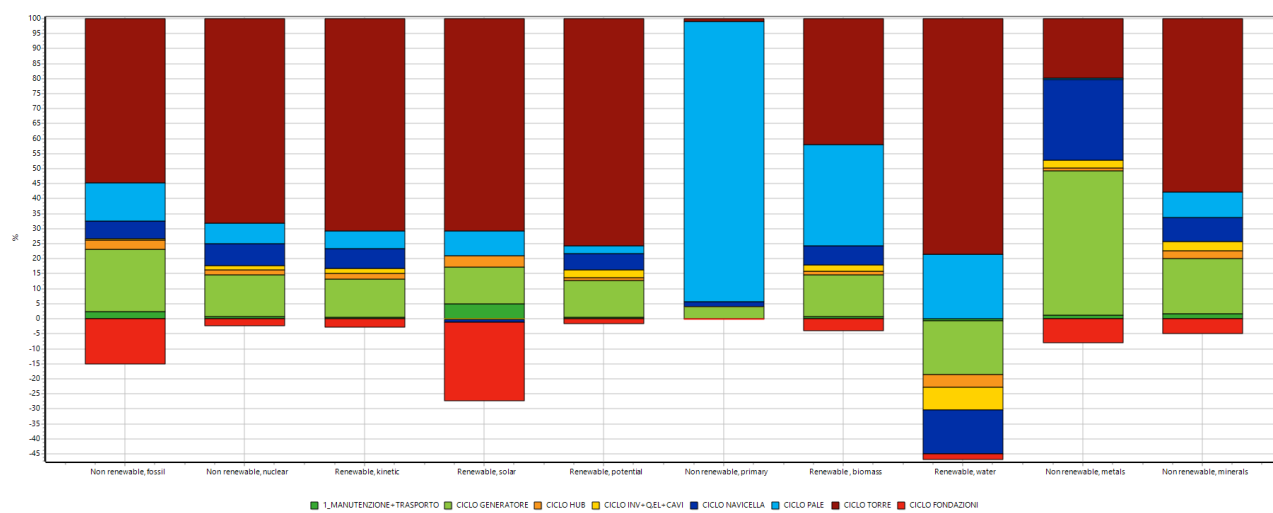


Figura 15: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo CED

Andando a valutare più nel dettaglio la richiesta di energia, si ottiene la Tabella 7-2. I dati riportati in tabella si riferiscono all'impatto "non renewable, fossil fuel" in quanto viene ritenuto il più rappresentativo per questo elaborato.

Tabella 7-2: Confronti richieste di energia per "non renewable, fossil": inventario turbina con lo smaltimento di tutti i componenti

	Energia [MJ]
Manutenzione + trasporto	28.2
Generatore	236
Hub	35.6
Inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento	4.87
Navicella	67.5
Pale	144
Torre	626
Fondazioni	-172

I componenti che rilevano una maggiore richiesta di energia sono, in ordine: torre, generatore, navicella, pale, fondazioni, hub, inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento.

Si procede ora a fare un confronto tra tutti gli assemblaggi e la turbina, sempre andando a valutare la maggiore richiesta di energia.

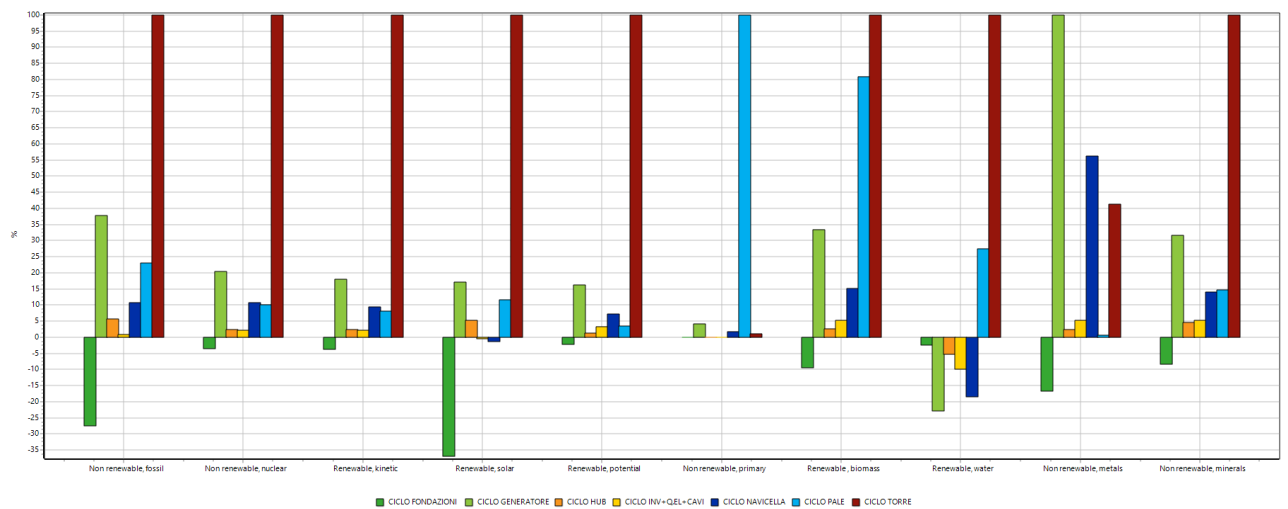


Figura 16: Confronto tra i vari componenti con metodo CED

In questo modo è possibile valutare quali componenti presentano energie confrontabili con la turbina, e soprattutto considerare quali sono i materiali o processi che pesano di più sulla richiesta di energia.

Valutando la specifica per sostanza, si rileva come il peso maggiore è da assegnare al quantitativo di energia necessario per l'estrazione di carbone, gas naturale e petrolio; poiché la torre è il componente che presenta una maggiore quantità di acciaio, risulta comprensibile come essa sia quella che richieda il maggior consumo di energia.

Tutte le considerazioni fatte in precedenza, si riferiscono alla turbina composta con l'imposizione dello smaltimento di tutti i componenti. Risulta essere più verosimile considerare lo studio della turbina impostata con i soli smaltimenti di torre e navicella, ovvero quelli ritenuti vantaggiosi.

In questo caso, la figurazione della valutazione degli impatti viene presentata in Figura 17.

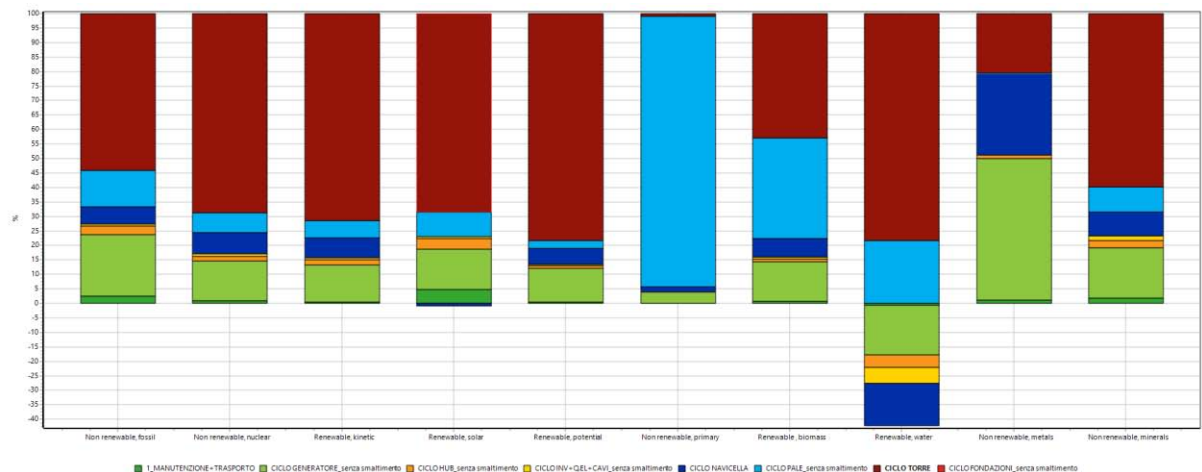


Figura 17: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento dei soli componenti torre e navicella con metodo CED

Anche con il sistema così impostato, l’impatto maggiore risulta essere quello relativo alla torre; ciò che cambia rispetto all’analisi precedente sono i valori relativi alle richieste di energia.

Tabella 7-3: Confronti richieste di energia per “non renewable, fossil”: inventario turbina con lo smaltimento di torre e navicella

	Energia [MJ]
Manutenzione + trasporto	28.2
Generatore	245
Hub	35.3
Inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento	8.72
Navicella	67.5
Pale	147
Torre	626
Fondazioni	-

Confrontando i valori ottenuti in Tabella 7-2 e Tabella 7-3 si notano delle diversità relative al fatto che nel secondo caso, non essendo imposto lo smaltimento di tutti i componenti, quelli che non presentano smaltimento hanno un consumo di energia maggiore, relativo al non recupero dell’energia utile nel ciclo.

Per valutare quale sia l’assemblaggio maggiormente impattante, viene anche in questo caso imposto un confronto tra i vari componenti, presentato in Figura 18.

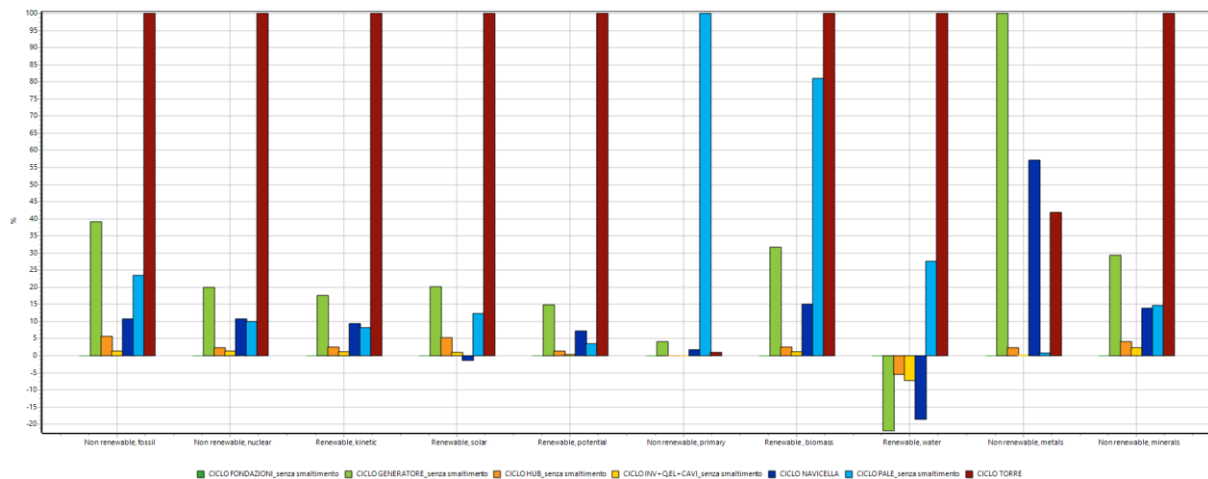


Figura 18: Confronto tra i vari componenti con metodo CED

Anche in questo caso la torre risulta essere il componente più impattante, come era già chiaro dalla Tabella 7-3. Per quanto riguarda le specifiche, si fa riferimento al caso precedente in quanto, poiché le impostazioni di analisi non sono cambiate, anche i risultati rimangono invariati.

Come precedentemente annunciato, l’analisi è stata fatta considerando l’impatto “non renewable, fossil” in quanto è stato ritenuto quello tra tutti più caratterizzante per questo sistema.

In seguito, viene proposto un riassunto che tiene conto di tutte le altre categorie di impatto, considerate dalla metodologia CED, che possono essere valutate interessanti.

Tabella 7-4: Risultati metodologia CED

	non renewable, fossil [MJ]		non renewable, primary [MJ]		non renewable, metals [MJ]		non renewable, minerals [MJ]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzione + trasporto	28,2	28,2	0,00194	0,00194	4,5	4,5	0,0769	0,0769
generatore	236	245	0,113	0,112	194	191	0,832	0,769
hub	35,6	35,3	0,000899	0,000892	4,54	4,54	0,122	0,109
inverter + q.el + cavi di collegamento	4,87	8,72	0,0017	0,000302	10,1	0,254	0,14	0,064
navicella	67,5	67,5	0,0486	0,0486	109	109	0,366	0,366
pale	144	147	2,73	2,73	1,37	1,59	0,384	0,385
torre	626	626	0,0272	0,0272	80	80	2,63	2,63
fondazioni	-172	(-)	-0,00358	(-)	-32,4	(-)	-0,219	(-)

Dalla Tabella 7.4 è possibile notare come, passando dal sistema turbina formato con tutti gli smaltimenti al sistema in cui sono presenti i soli smaltimenti di torre e navicella, si ha una diminuzione dei valori degli impatti per tutti gli assemblaggi (si ricorda come manutenzione + trasporto, navicella e torre sono considerati nello stesso modo, dunque non si hanno variazioni nei risultati degli impatti relativi a quest'ultimi).

Si possono fare le seguenti considerazioni:

- Nella categoria “non renewable, fossil fuel” c'è un aumento del quantitativo di energia richiesta per ogni componente nel passaggio dal caso in cui viene considerato lo smaltimento di ogni componente al caso in cui si considera solo lo smaltimento di navicella e torre: questo è legato al fatto che il riciclo comporta un recupero dell'energia primaria contenuta all'interno dei materiali;
- Nelle categorie “non renewable, primary”, “non renewable, metals”, “non renewable, minerals” è presente una diminuzione della richiesta di energia, legata all'eliminazione dei processi di riciclo che richiedono quel tipo di energia.
- Le fondazioni, quando considerate con lo smaltimento, presentano un valore di energia negativo: questo è legato al fatto che l'impostazione del riciclo dell'acciaio contenuto all'interno del cemento è solo ideale e non fattibile nella realtà.

La variazione è comunque molto piccola, in tutti i casi ad eccezione dell'assemblaggio inverter + q. el + cavi di collegamento:

- Nella categoria “non renewable, fossil fuel” si ha un raddoppio da 4.87 MJ a 8.72 MJ
- Nella categoria “non renewable, metals” si ottiene una diminuzione da 10.1 MJ a 0.254 MJ

Questi valori così diversi tra i due casi sono da imputare alla forte presenza di componentistica elettronica in quest'ultimo assemblaggio, la quale viene riciclata come RAEE, processo che assorbe una grande quantità di energia.

7.3 IPCC 2013

In questo caso si considerano le emissioni, calcolate in kg equivalenti di CO₂, nei periodi di tempo 20 anni e 100 anni. Viene considerato inizialmente il caso 20 anni, interessante soprattutto perché il tempo di vita della turbina in esame risulta essere proprio 20 anni; successivamente si esegue il calcolo considerando anche i 100 anni perché è interessante valutare anche il lungo termine.

Anche in questo caso si segue lo stesso metodo di analisi della metodologia precedente, analizzando inizialmente la turbina con smaltimenti imposti in tutti gli assemblaggi, per poi considerare solo lo smaltimento di torre e navicella.

7.3.1 Intervallo di tempo 20 anni

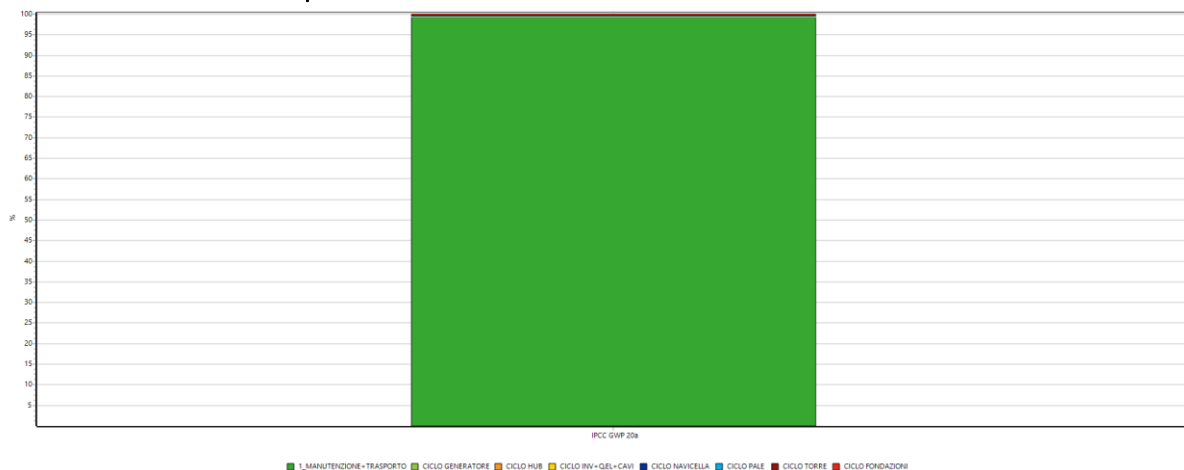


Figura 19: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo IPCC 20a

Dalla Figura 19 è possibile notare come l'assemblaggio maggiormente impattante in questo caso, ovvero quello che produce maggior kg CO₂ equivalente, risulta essere la manutenzione assieme al trasporto; tale risultato era facilmente intuibile in relazione al fatto che per il trasporto e la manutenzione sono stati impiegati solo mezzi su strada, molto impattati in quanto comportano la combustione di combustibili fossili. Dunque, sebbene anche la produzione dei vari componenti della turbina abbiano un impatto non nullo, in relazione al trasporto su strada il loro impatto risulta quasi indifferente.

Valutando più concretamente, si riportano i dati ottenuti dall'inventario.

Tabella 7-5: Confronti kg CO₂ equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di tutti i componenti

	kg CO ₂ equivalente
Manutenzione + trasporto	1.63E4
Generatore	26.1
Hub	4.56
Inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento	11.4

Navicella	6.95
Pale	13.6
Torre	53.7
Fondazioni	7.98

Dalla Tabella 7-5 si rileva come il contributo dell'assemblaggio manutenzione + trasporto risulta essere di quattro ordini di grandezza maggiore rispetto agli altri: il valore è 1.63E4 kg CO₂ equivalente, decisamente molto elevato.

Si nota che il secondo componente più impattate in questo caso è sempre la torre, con 53.7 kg CO₂ equivalente; esso è un valore decisamente più basso rispetto a quello riferito all'assemblaggio manutenzione + trasporto, ma sempre elevato rispetto agli impatti degli altri assemblaggi.

A supporto di ciò, anche il confronto tra i vari componenti porta allo stesso risultato, come riporta Figura 20.

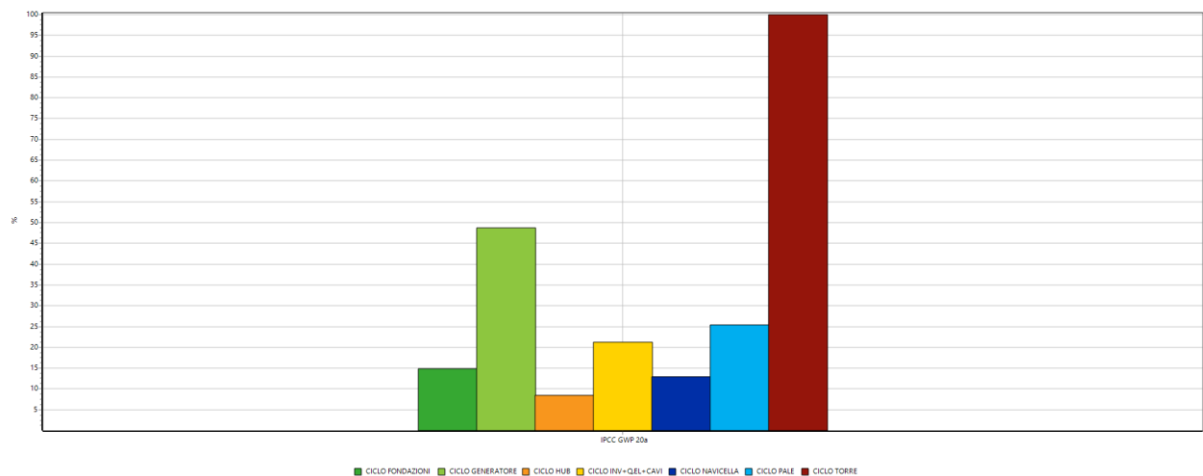


Figura 20: Confronto tra i vari componenti con metodo IPCC 2013 20a

È possibile notare come, in percentuale, la torre ed il generatore producano la maggior parte dei kg CO₂ equivalente; a seguire il resto degli assemblaggi che compongono la turbina.

Per un maggior dettaglio, si vanno ad analizzare separatamente gli assemblaggi manutenzione + trasporto e torre.

MANUTENZIONE + TRASPORTO

Considerando come è stato formato l'assemblaggio, è facilmente intuibile come ciò che impatta effettivamente è il trasporto su strada: sia per una maggiore distanza chilometrica sia per un maggior peso trasportato, tra le due cose ciò che impatta nettamente di più è il trasporto (basti pensare che la torre proviene da Tirana). Come sostanze, ciò che produce i dati riportati in Tabella 7-5 sono il metano ed il diossido di carbonio, imputabili alla combustione dei motori.

TORRE

In questo caso il contributo ai kg CO₂ equivalente dipende soprattutto, come facilmente intuibile, all'estrazione di ferro e carbone, e all'utilizzo di energia elettrica per poter lavorare l'acciaio. Anche in questo caso, come sostanze rilevati, ci si riferisce a metano e diossido di carbonio.

Ponendo l'attenzione sull'analisi dell'assemblaggio turbina formato considerando gli smaltimenti relativi ai soli componenti in cui c'è un effettivo vantaggio, la situazione risulta essere molto simile.

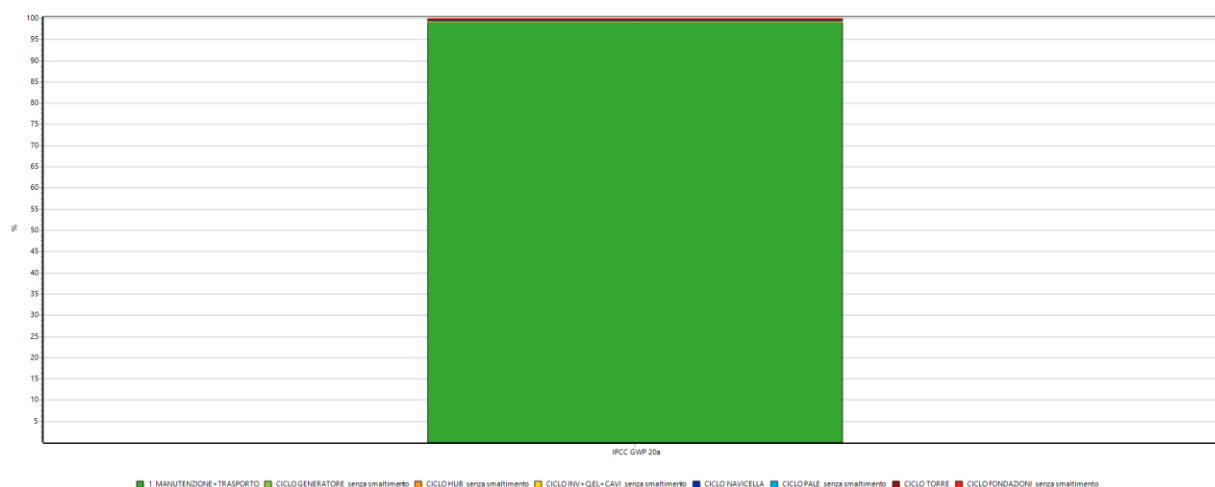


Figura 21: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento dei soli torre e navicella con metodo IPCC 20a

Anche in questo caso, risulta più utile l'analisi dei dati, come riportato in Tabella 7-6 Tabella 7-6.

Tabella 7-6: Confronti kg CO₂ equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di torre e navicella

	kg CO ₂ equivalente
Manutenzione + trasporto	1.63E4
Generatore	27.5
Hub	4.55
Inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento	12.1
Navicella	6.95
Pale	14
Torre	53.7
Fondazioni	34.3

È possibile valutare che, al contrario del caso in cui vengono considerati tutti gli smaltimenti, in questo caso secondo alla torre, sono le fondazioni le più impattanti e non il generatore; questo perché dal punto di vista della formazione di kg CO₂ equivalente, il non smaltimento del cemento armato e dell'acciaio presenti nelle fondazioni, risultano decisamente molto impattanti: un eventuale smaltimento del generatore, essendo formato da componentistica elettronica, comporterebbe lo smaltirli come RAEE (rifiuti di

apparecchiature elettriche ed elettroniche), al contrario l'acciaio presente nelle fondazioni potrebbe ipoteticamente essere smaltito e riutilizzato.

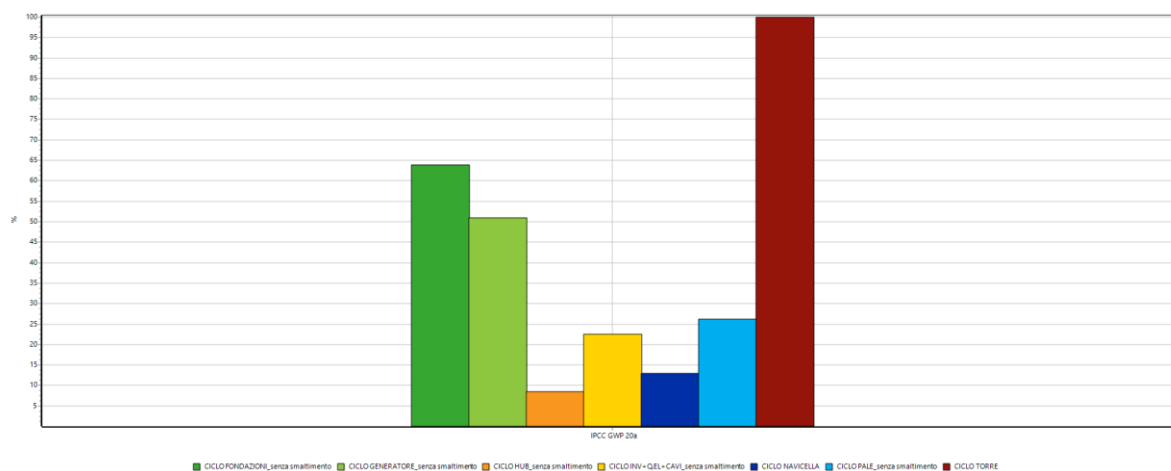


Figura 22: Confronto tra i vari componenti con metodo IPCC 2013 20a

A supporto di tale tesi, il confronto tra i vari componenti produce risultati concordanti, i quali vedono la torre sempre la più impattante, con a seguire fondazioni e generatore.

7.3.2 Intervallo di tempo 100 anni

Poiché l'analisi si riferisce allo stesso assemblaggio e con la stessa metodologia, ciò che cambia è solo il periodo di tempo, risulta utile riportare i soli dati e non anche la visualizzazione ad istogramma.

Tabella 7-7: Confronti kg CO₂ equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di tutti i componenti

	kg CO ₂ equivalente
Manutenzione + trasporto	1.55E4
Generatore	22.6
Hub	3.92
Inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento	9.59
Navicella	5.92
Pale	11.5
Torre	47.3
Fondazioni	8.42

Confrontando la Tabella 7-5 con la Tabella 7-7 è possibile notare come i "rapporti" di equilibrio rimangono gli stessi, ma le quantità variano: si rileva una diminuzione aumentando l'intervallo di tempo nella produzione di kg CO₂ equivalente, com'era facilmente intuibile, sebbene la diminuzione non risulta così evidente da variare gli ordini di grandezza.

Lo stesso può essere detto considerando l'assemblaggio turbina con i soli smaltimenti vantaggiosi, considerando per il confronto la Tabella 7-6, la Tabella 7-6 e la Tabella 7-8.

Tabella 7-8: Confronti kg CO₂ equivalente: inventario turbina con lo smaltimento di torre e navicella

	kg CO ₂ equivalente
Manutenzione + trasporto	1.55E4
Generatore	23.6
Hub	3.91
Inverter + quadro elettrico + cavi di collegamento	10.2
Navicella	5.92
Pale	11.9
Torre	47.3
Fondazioni	31.2

7.3.3 Confronto tra i due intervalli di tempo

È interessante confrontare tra di loro i risultati ottenuti nei due intervalli di tempo permessi dal software (20 anni e 100 anni). Per facilità, si raggruppano i risultati.

Tabella 7-9: Confronto IPCC 20a e 100a

	IPCC GWP 20a [kg CO ₂ equivalente]		IPCC GWP 100a [kg CO ₂ equivalente]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzione + trasporto	1,63E+04	1,63E+04	1,55E+04	1,55E+04
generatore	26,1	27,3	22,6	23,6
hub	4,56	4,55	3,92	3,91
inverter + q.el + cavi di collegamento	11,4	12,1	9,59	10,2
navicella	6,95	6,95	5,92	5,92
pale	13,6	14	11,5	11,9
torre	53,7	53,7	47,3	47,3
fondazioni	7,98	34,5	8,42	31,2

Dalla Tabella 7-9 si evince una diminuzione del GWP considerando il periodo di tempo più lungo (100 anni): considerando qualche esempio numerico, l'assemblaggio torre vede una diminuzione da 53.7 kg CO₂ equivalente nel caso del periodo di tempo 20 anni a 47.3 kg CO₂ equivalente nel caso del periodo di tempo 100 anni, per la manutenzione ed il trasporto si riscontra una diminuzione da 1.63E4 kg CO₂ equivalente a 1.55E4 kg CO₂ equivalente. E così anche per tutti gli altri assemblaggi.

Sebbene la diminuzione sia molto lieve, risulta comunque importante. Tutto ciò è in linea con la teoria, in quanto lo stesso impatto presenta un apporto inferiore nel tempo se il periodo considerato risulta essere più lungo. Come rapporto di diminuzione, tutti i componenti presentano circa lo stesso rapporto, con lo stesso ordine di grandezza.

7.4 RECIPE 2016

Il metodo permette l'analisi di specifiche categorie di impatto, legate sia all'uomo che a flora e fauna. Esso può essere considerato il più completo tra quelli scelti.

In questo specifico caso, viene applicata la visione gerarchica (H in SimaPro), sia dal punto di vista midpoint che dal punto di vista endpoint in quanto risulta interessante trarre conclusioni in relazione ad entrambi gli approcci.

7.4.1 ReCiPe (H) midpoint

Viene considerata, come nei metodi precedenti, inizialmente la turbina con tutti gli smaltimenti, e successivamente la turbina con i soli smaltimenti efficienti.

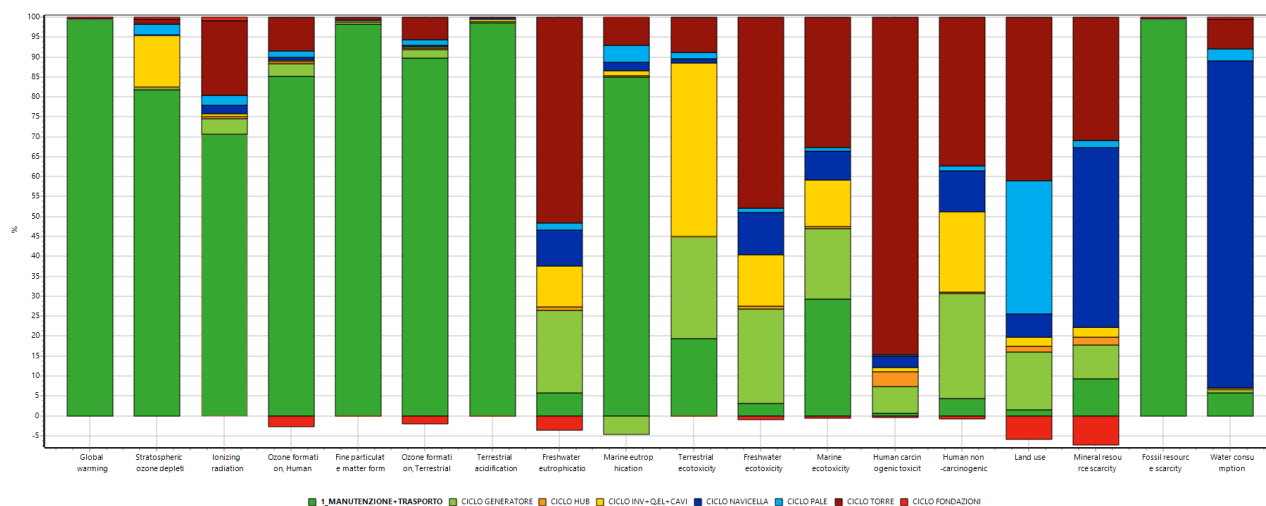


Figura 23: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo ReCiPe 2013 (H) midpoint

L'analisi dei risultati in questo caso risulta più lunga e complessa, in quanto è necessario valutare 18 categorie di impatto differenti. Per una maggiore comprensione della Figura 23 ci si affida ai numeri.

Tabella 7-10: Valori categorie di impatto turbina

	global warming [kg CO2 eq]	stratospheric ozone depletion [kg CFC11 eq]	ionizing radiation [kBq Co-60 eq]	ozone formation, human health [kg Nox eq]	fine particulate matter formation [kg PM2,5 eq]	ozone formation, terrestrial ecosystems [kg Nox eq]	terrestrial acidification [kg SO2 eq]	freshwater eutrophication [kg P eq]	marine eutrophication [kg N eq]
manutenzione + trasporto generatore	1,55E+04	0,00152	18,7	1,32	17,7	2,13	51	0,0083	0,0203
hub	23	9,96E-06	0,153	0,048	0,0812	0,0494	0,225	0,0109	-0,00186
inverter + q.el + cavi di collegamento	10,5	0,00024	0,0904	0,00602	0,0756	0,00597	0,261	0,00608	7,10E-05
navicella	6,05	5,08E-06	0,136	0,0102	0,0122	0,0101	0,0309	0,00498	0,000245
pale	11,9	4,91E-05	0,306	0,0246	0,0158	0,0317	0,0389	0,000618	0,00086
torre	48	2,29E-05	0,455	0,133	0,124	0,136	0,178	0,0166	0,000197
fondazioni	8,28	8,38E-06	0,379	-0,0436	-0,018	-0,0464	-0,00622	-0,000683	0,000335
	terrestrial ecotoxicity [kg 1.4-DCB]	freshwater ecotoxicity [kg 1.4-DCB]	marine ecotoxicity [kg 1.4-DCB]	human carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]	human non-carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]	Land use [m2a crop eq]	mineral resource scarcity [kg Cu eq]	fossil resource scarcity [kg oil eq]	water consumption [m3]
manutenzione + trasporto generatore	1,39E+03	0,479	12,9	0,616	31,4	0,0508	0,506	4,72E+03	1,39
hub	1830	0,0674	0,925	1,59	34,5	0,505	0,457	5,8	0,196
inverter + q.el + cavi di collegamento	3,11E+03	0,0177	1,35	0,641	55,6	0,0771	0,141	0,707	0,0785
navicella	76,1	0,0399	0,125	0,578	2,73	0,208	2,44	7,21	19,9

pale	115	0,0115	0,0617	0,0759	2,22	1,16	0,0963	4,07	0,717
torre	632	0,297	0,757	20,8	19,5	1,42	1,67	13,9	1,83
fondazioni	-10,9	-0,00732	-0,0166	-0,0411	-0,392	-0,203	-0,396	1,89	0,129

Nella maggior parte delle categorie, l'assemblaggio con maggior peso risulta essere quello riferito alla manutenzione ed il trasporto: questo era certamente già intuibile, tuttavia, come già enunciato in precedenza, non sono valori evitabili in quanto i fornitori dei vari componenti non sono imputabili ad un unico territorio e sicuramente non è possibile averli vicini al sito scelto; ciò nonostante, non si può non evidenziare come, considerando la maggior parte delle categorie di impatto, il valore relativo a questo assemblaggio risulta essere di molti ordini di grandezza più grande rispetto a quelli degli altri assemblaggi: 1.55E4 kg CO₂ equivalente per "global warming", ben 4 ordini di grandezza rispetto agli altri, 4.72E3 kg oil equivalente per "fossil resource scarcity", 3 ordini di grandezza rispetto agli altri, sono solo degli esempi.

Poiché gli impatti relativi a manutenzione + trasporto non sono evitabili, si preferisce porre l'attenzione sugli assemblaggi che compongono la turbina. A tal proposito, da Tabella 7-10 è possibile notare come la componente maggiormente impattante risulta essere la torre, in quasi tutte le categorie tranne per "terrestrial ecotoxicity" e "terrestrial acidification" in cui è il generatore che possiede il più alto impatto, e per "stratospheric ozone depletion" è l'assemblaggio inverter + q.el + cavi di collegamento. Tale comportamento è facilmente visibile anche da Figura 24.

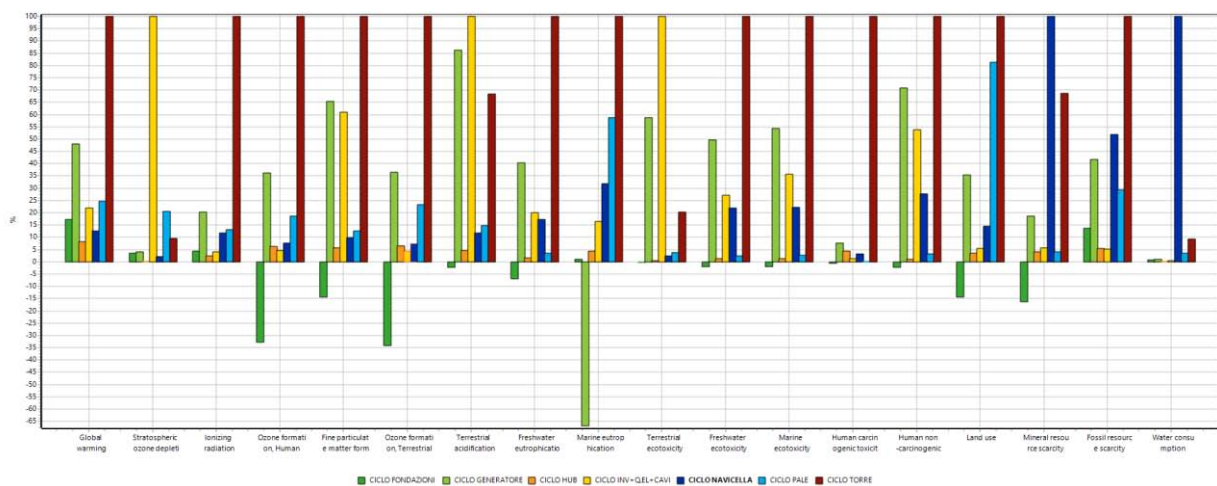


Figura 24: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto

È interessante confrontare, seppur in prima analisi, questi tre assemblaggi che presentano il maggior peso sulle varie categorie di impatto, ovvero torre, generatore ed inverter + q. elettrico + cavi di collegamento. Con riferimento alla Figura 25 è possibile notare come il generatore presenti un valore negativo per la categoria di impatto "marine eutrophication": ciò è imputabile alla composizione del generatore ed al suo utilizzo. Interessante è anche notare come tutti e tre gli assemblaggi presentano valori elevati nella categoria di impatto "terrestrial acidification", da Tabella 7-10 si rilevano valori 0.261 kg SO₂ equivalente per inverter + q. elettrico + cavi di collegamento, 0.225 kg SO₂ equivalente per il generatore e 0.178 kg SO₂ equivalente per la torre: tali valori sono di un ordine di grandezza superiore rispetto agli altri

assemblaggi che compongono la turbina, e sono imputabili principalmente al processo di smaltimento, come verrà mostrato dai valori rilevati in seguito.

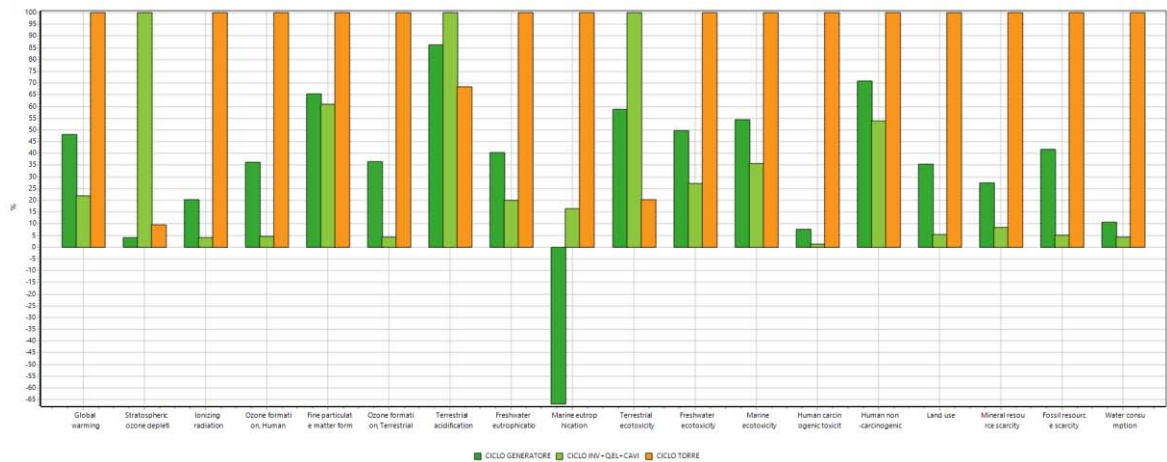


Figura 25: Confronto assemblaggi con maggior peso nelle varie categorie di impatto

Si passa ora all'analisi della turbina composta con l'imposizione dei soli smaltimenti vantaggiosi, ovvero quelli riferiti alla torre ed alla navicella.

I risultati ottenuti possono essere considerati molto simili al caso appena descritto, tuttavia si differenziano nel peso e nell'importanza data agli impatti di alcuni elementi rispetto ad altri.

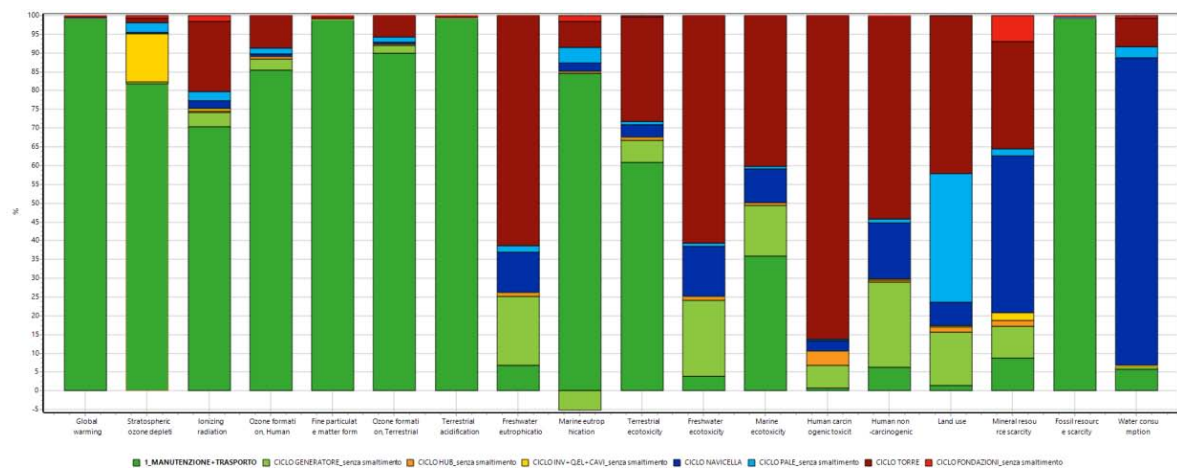


Figura 26: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento dei soli torre e navicella con metodo ReCiPe 2013 (H) midpoint

Confrontando Figura 26 con Figura 23 è possibile notare come la torre risulta avere ancor più un peso maggiore sulle categorie di impatto considerate, ed in questo caso la navicella risulta più impattante del generatore; a sostegno di quanto detto si allega la Tabella 7-11.

Tabella 7-11: Valori categorie di impatto turbina

	global warming [kg CO2 eq]	stratospheric ozone depletion [kg CFC11 eq]	ionizing radiation [kBq Co-60 eq]	ozone formatio, human health [kg Nox eq]	fine particulate matter formation [kg PM2,5 eq]	ozone formation, terrestrial ecosystems [kg Nox eq]	terrestrial acidification [kg SO2 eq]	freshwater eutrophication [kg P eq]	marine eutrophication [kg N eq]
manutenzione + trasporto generatore	1,55E+04	0,00152	18,7	1,32	17,7	2,13	51	0,0083	0,0203
hub	24	8,95E-06	0,151	0,0476	0,0439	0,0493	0,0916	0,00764	-0,00188
inverter + q.el + cavi di collegamento	3,98	8,12E-07	0,0123	0,00839	0,007	0,00882	0,0118	0,000149	6,46E-06
navicella	11,1	0,000239	0,086	0,00131	0,034	0,00139	0,00968	5,68E-05	3,90E-05
pale	6,05	5,08E-06	0,136	0,0102	0,0122	0,0101	0,0309	0,00498	0,000245
torre	12,2	4,91E-05	0,306	0,0252	0,0141	0,0323	0,0322	0,000444	0,000859
fondazioni	48	2,29E-05	0,455	0,133	0,124	0,136	0,178	0,0166	0,000197
	31,4	1,17E-05	0,406	0,000497	0,0184	0,0008	0,0562	5,17E-06	0,000364
	terrestrial ecotoxicity [kg 1.4-DCB]	freshwater ecotoxicity [kg 1.4-DCB]	marine ecotoxicity [kg 1.4-DCB]	human carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]	human non-carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]	land use [m2a crop eq]	mineral resource scarcity [kg Cu eq]	fossil resource scarcity [kg oil eq]	water consumption [m3]
manutenzione + trasporto generatore	1,39E+03	0,479	12,9	0,616	31,4	0,0508	0,506	4,72E+03	24,3
hub	132	0,0586	0,192	1,26	4,82	0,478	0,493	5,99	0,194
inverter + q.el + cavi di collegamento	17,4	0,0142	0,0295	0,869	0,838	0,047	0,1	0,758	0,0184
navicella	3,72	0,000923	0,00343	0,0532	0,93	0,0128	0,117	0,785	0,0723
pale	76,1	0,0399	0,15	0,578	2,79	0,208	2,44	7,21	19,9
torre	19,8	0,0111	0,0207	0,0587	0,567	1,16	0,108	4,13	0,717
fondazioni	632	0,297	0,757	20,8	19,5	1,42	1,67	13,9	1,83
	8,28	0,000814	0,00537	0,00961	0,909	(-)	0,4	5,53	0,185

Anche in questo caso l'impatto preponderante è da assegnare alla parte di manutenzione e trasporto, sempre per i motivi elencati in precedenza nel corso di questo elaborato. A seguire si hanno la torre, la navicella per "mineral resource scarcity" e "water consumption" e l'assemblaggio inverter + q. elettrico + cavi di collegamento per "stratospheric ozone depletion". A tal proposito, Figura 27 permette la visualizzazione di quanto enunciato.

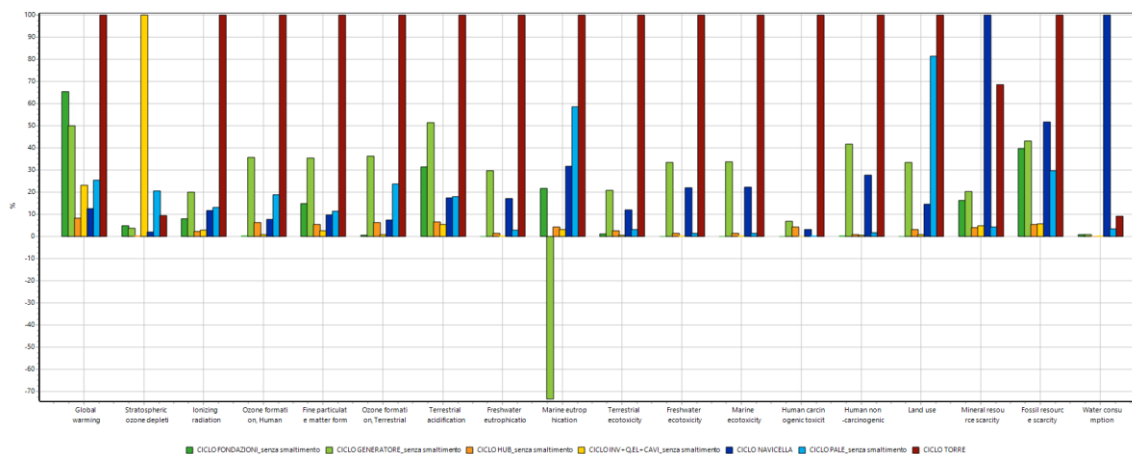


Figura 27: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto

Anche in questo caso risulta interessante un confronto più dettagliato, confrontando solo i tre assemblaggi di torre, navicella e inverter + q. elettrico + cavi di collegamento.

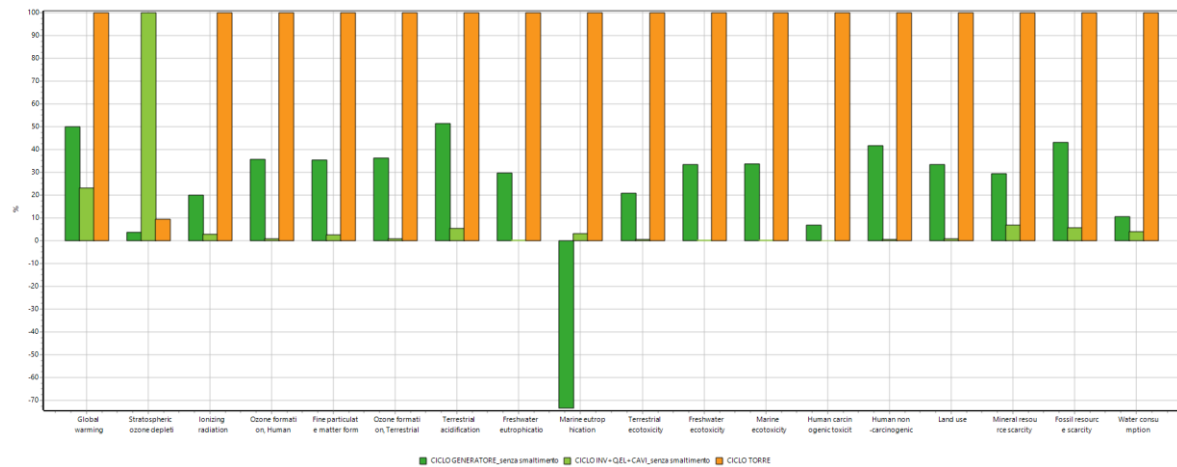


Figura 28: Confronto assemblaggi con maggior peso nelle varie categorie di impatto

Il confronto tra i tre assemblaggi, Figura 28, mostra come il peso preponderante lo assume quasi sempre la torre. Il valore negativo da imputare al generatore in relazione alla categoria di impatto “marine eutrophication”, con un valore di -0.00188 kg N equivalente, è da assegnare alla composizione del generatore in sé ed ai processi per il suo utilizzo, e non all’eliminazione del processo di smaltimento, in quanto anche nel caso in cui veniva considerato lo smaltimento di tale componente risultava un valore negativo di -0.00186 kg N equivalente.

7.4.2 ReCiPe (H) endpoint

L’approccio endpoint è sempre da considerare in quanto fornisce informazioni aggiuntive sul danno rispetto all’approccio midpoint, e soprattutto permette un confronto maggiore tra le varie categorie di impatto in quanto riporta i risultati con le stesse unità di misura.

Anche in questo caso viene considerato inizialmente il processo turbina con tutti gli smaltimenti assegnati ad ogni assemblaggio, e successivamente la turbina in cui sono imposti i soli smaltimenti di navicella e torre.

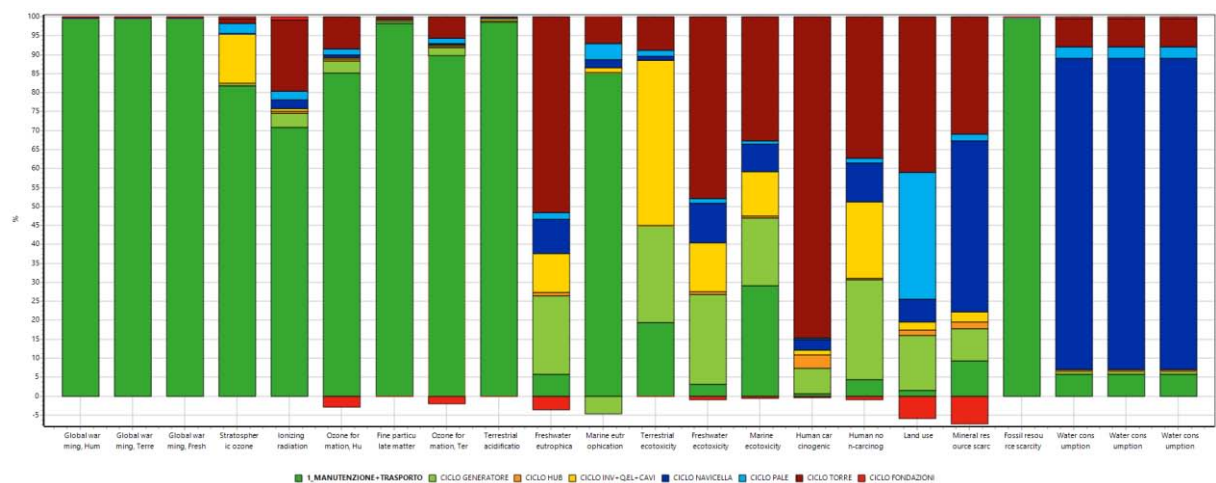


Figura 29: Valutazione dell’impatto turbina con lo smaltimento di tutti i componenti con metodo ReCiPe 2013 (H) endpoint

Come fatto per l'approccio midpoint, anche in questo caso si preferisce riportare i numeri per poter avere un quando più completo; ci si riferisce dunque alla

Tabella 7-12.

	global warming, human health [DALY]	global warming, terrestrial ecosystems [species.yr]	global warming, freshwater ecosystems [species.yr]	stratospheric ozone depletion [DALY]	ionizing radiation [DALY]	ozone formation, human health [DALY]	fine particulate matter formation [DALY]	ozone formation, terrestrial ecosystems [species.yr]	terrestrial acidification [species.yr]	freshwater eutrophication [species.yr]	marine eutrophication [species.yr]
manutenzione + trasporto generatore	1,44E-02	4,35E-05	1,19E-09	8,05E-07	1,59E-07	1,20E-06	1,11E-02	2,74E-07	1,08E-05	5,56E-09	3,45E-11
manutenzione + trasporto inverter + q.el hub	2,14E-05	6,45E-08	1,76E-12	5,29E-09	1,30E-09	4,37E-08	5,10E-05	6,38E-09	4,77E-08	7,29E-09	-3,18E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,44E-02	4,35E-05	1,19E-09	8,05E-07	1,59E-07	1,20E-06	1,11E-02	2,74E-07	1,08E-05	5,56E-09	3,45E-11
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	2,14E-05	6,45E-08	1,76E-12	5,29E-09	1,30E-09	4,37E-08	5,10E-05	6,38E-09	4,77E-08	7,29E-09	-3,18E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	9,78E-06	2,95E-08	8,05E-13	1,27E-07	7,69E-10	5,48E-09	4,74E-05	7,70E-10	5,53E-08	4,07E-09	1,21E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	3,70E-06	1,12E-08	3,05E-13	4,34E-10	1,06E-10	7,71E-09	4,41E-06	1,15E-09	2,51E-09	9,97E-11	1,10E-14
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	5,92E-06	1,69E-08	4,63E-13	2,69E-09	1,15E-09	9,27E-09	7,68E-06	1,30E-09	6,56E-09	3,33E-09	4,17E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,10E-05	3,32E-08	9,06E-13	2,61E-08	2,59E-09	2,24E-08	9,90E-06	4,08E-09	8,25E-09	4,14E-10	1,46E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	5,62E-06	1,69E-08	4,63E-13	2,69E-09	1,15E-09	9,27E-09	7,68E-06	1,30E-09	6,56E-09	3,33E-09	4,17E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,10E-05	3,32E-08	9,06E-13	2,61E-08	2,59E-09	2,24E-08	9,90E-06	4,08E-09	8,25E-09	4,14E-10	1,46E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	7,69E-06	2,32E-08	6,34E-13	4,45E-09	3,22E-09	-3,97E-08	-1,13E-05	-5,98E-09	-1,32E-09	-4,57E-10	5,69E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	4,46E-05	1,34E-07	3,67E-12	1,22E-08	3,86E-09	1,21E-07	7,80E-05	1,75E-08	3,77E-08	1,11E-08	3,36E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	4,46E-05	1,34E-07	3,67E-12	1,22E-08	3,86E-09	1,21E-07	7,80E-05	1,75E-08	3,77E-08	1,11E-08	3,36E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,58E-08	3,32E-10	2,14E-23	2,05E-06	7,16E-06	4,51E-10	0,117	2,13E+03	3,08E-06	1,87E-08	8,38E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,99E-10	9,88E-12	1,53E-24	2,88E-06	1,91E-07	4,32E-10	0,0231	0,15	4,16E-08	2,53E-10	1,13E-14
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	2,09E-08	4,67E-11	1,63E-23	5,27E-06	7,87E-06	4,48E-09	0,106	1,54	4,36E-07	2,65E-09	1,19E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,99E-10	9,88E-12	1,53E-24	2,88E-06	1,91E-07	4,32E-10	0,0231	0,15	4,16E-08	2,53E-10	1,13E-14
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	3,56E-08	1,23E-11	5,16E-25	2,13E-06	1,27E-05	6,84E-10	0,0325	0,158	1,74E-07	1,06E-09	4,74E-14
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	8,69E-10	2,77E-11	7,27E-24	1,92E-06	6,22E-07	1,85E-09	0,564	2,18	4,43E-05	2,69E-07	1,20E-11
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	7,22E-09	2,06E-10	5,72E-23	6,92E-05	4,44E-06	1,26E-08	0,386	4,25	4,05E-06	2,46E-08	1,10E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,31E-09	7,98E-12	1,90E-22	2,52E-07	5,07E-07	1,03E-08	0,0223	1,4	1,59E-06	9,68E-09	4,33E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	7,22E-09	2,06E-10	5,72E-23	6,92E-05	4,44E-06	1,26E-08	0,386	4,25	4,05E-06	2,46E-08	1,10E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	-1,25E-10	-5,07E-12	-3,79E-24	-1,36E-07	-8,94E-08	-1,80E-09	-0,0916	0,298	2,87E-07	1,75E-09	7,82E-14

Tabella 7-12: Valori categorie di impatto turbina

Come sempre succede, la componente maggiormente impattante è la manutenzione ed il trasporto; anche con questo metodo, si rileva un impatto riferito a questo assemblaggio di diversi ordini di grandezza maggiore rispetto agli altri componenti: 1.44E-2 DALY per “global warming, human health” (tre ordini di grandezza maggiore), 4.35E-5 DALY per “global warming, terrestrial ecosystems” (tre ordini di grandezza maggiore); tuttavia, come molte volte già enunciato, gli impatti relativi a questo assemblaggio non sono evitabili.

Si rileva un valore negativo di impatti per le fondazioni in 12 categorie di impatto, su un totale di 12: questo risultato può essere letto come l'idealità dello smaltimento fondazioni, ovvero che non è realmente fattibile il recupero dell'acciaio dei ferri delle fondazioni, immersi nel cemento armato, una volta necessaria la dismissione dell'impianto.

A supporto di ciò, si considera il confronto tra i vari componenti, riportato in Figura 30.

Ci si focalizza sugli assemblaggi della turbina: la torre occupa un ruolo preponderante, seguito dall'assemblaggio inverter + q. el + cavi di collegamento per le categorie di impatto "stratospheric ozone depletion", "terrestrial acidification", "terrestrial ecotoxicity" e "human non-carcinogenic toxicity" e dalla navicella per "mineral resource scarcity" e "water consumption".

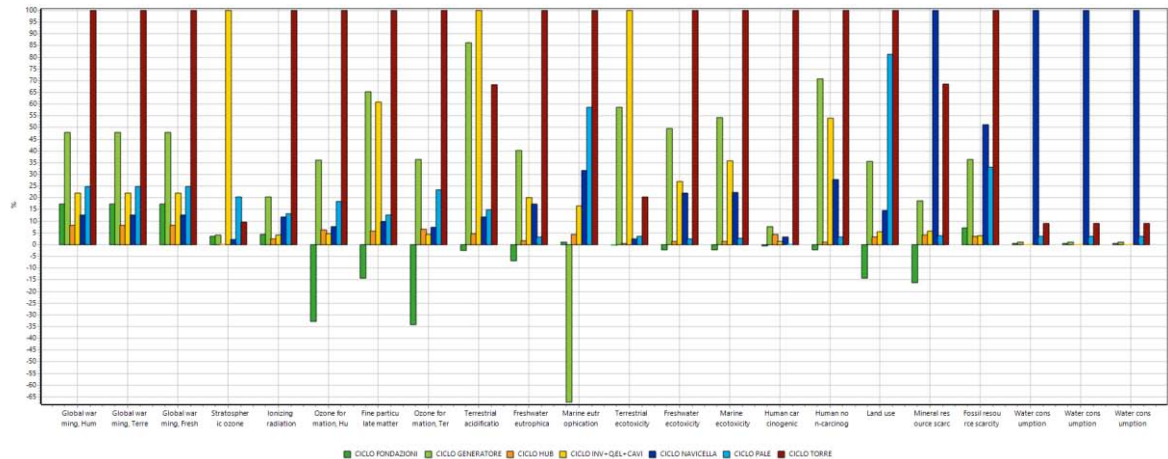


Figura 30: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto

I risultati, ottenuti con la Figura 30 erano già intuitibili considerando la Tabella 7.12.

	global warming, human health [DALY]	global warming, terrestrial ecosystems [species.yr]	global warming, freshwater ecosystems [species.yr]	stratospheric ozone depletion [DALY]	ionizing radiation [DALY]	ozone formation, human health [DALY]	fine particulate matter formation [DALY]	ozone formation, terrestrial ecosystems [species.yr]	terrestrial acidification [species.yr]	freshwater eutrophication [species.yr]	marine eutrophication [species.yr]
manutenzione + trasporto generatore	1,44E-02	4,35E-05	1,19E-09	8,05E-07	1,59E-07	1,20E-06	1,11E-02	2,74E-07	1,08E-05	5,56E-09	3,45E-11
hub	2,14E-05	6,45E-08	1,76E-12	5,29E-09	1,30E-09	4,37E-08	5,10E-05	6,38E-09	4,77E-08	7,29E-09	-3,18E-12
inverter + q.el + cavi di collegamento	3,70E-06	1,12E-08	3,05E-13	4,34E-10	1,06E-10	7,71E-09	4,41E-06	1,15E-09	2,51E-09	9,97E-11	1,10E-14
navicella	9,78E-06	2,95E-08	8,05E-13	1,27E-07	7,69E-10	5,48E-09	4,74E-05	7,70E-10	5,53E-08	4,07E-09	1,21E-13
pale	5,62E-06	1,69E-08	4,63E-13	2,69E-09	1,15E-09	9,27E-09	7,68E-06	1,30E-09	6,56E-09	3,33E-09	4,17E-13
torre	1,10E-05	3,32E-08	9,06E-13	2,61E-08	2,59E-09	2,24E-08	9,90E-06	4,08E-09	8,25E-09	4,14E-10	1,46E-12
fondazioni	4,46E-05	1,34E-07	3,67E-12	1,22E-08	3,86E-09	1,21E-07	7,80E-05	1,75E-08	3,77E-08	1,11E-08	3,36E-13
	7,69E-06	2,32E-08	6,34E-13	4,45E-09	3,22E-09	-3,97E-08	-1,13E-05	-5,98E-09	-1,32E-09	-4,57E-10	5,69E-13
	terrestrial ecotoxicity [species.yr]	freshwater ecotoxicity [species.yr]	marine ecotoxicity [species.yr]	human carcinogenic toxicity [DALY]	human non-carcinogenic toxicity [DALY]	land use [species.yr]	mineral resource scarcity [USD2013]	fossil resource scarcity [USD2013]	water consumption, human health [DALY]	water consumption, terrestrial ecosystems [DALY]	water consumption, aquatic ecosystems [DALY]
manutenzione + trasporto generatore	1,58E-08	3,32E-10	2,14E-23	2,05E-06	7,16E-06	4,51E-10	0,117	2,13E+03	3,08E-06	1,87E-08	8,38E-13
hub	2,09E-08	4,67E-11	1,63E-23	5,27E-06	7,87E-06	4,48E-09	0,106	1,54	4,36E-07	2,65E-09	1,19E-13
inverter + q.el + cavi di collegamento	1,99E-10	9,88E-12	1,53E-24	2,88E-06	1,91E-07	4,32E-10	0,0231	0,15	4,16E-08	2,53E-10	1,13E-14
navicella	3,56E-08	1,23E-11	5,16E-25	2,13E-06	1,27E-05	6,84E-10	0,0325	0,158	1,74E-07	1,06E-09	4,74E-14
pale	8,69E-10	2,77E-11	7,27E-24	1,92E-06	6,22E-07	1,85E-09	0,564	2,18	4,43E-05	2,69E-07	1,20E-11
torre	1,31E-09	7,98E-12	1,90E-22	2,52E-07	5,07E-07	1,03E-08	0,0223	1,4	1,59E-06	9,68E-09	4,33E-13
	7,22E-09	2,06E-10	5,72E-23	6,92E-05	4,44E-06	1,26E-08	0,386	4,25	4,05E-06	2,46E-08	1,10E-12

Tabella 7-12

Si procede ora a riportare i risultati relativi all'assemblaggio turbina con imposti i soli smaltimenti vantaggiosi di torre e navicella.

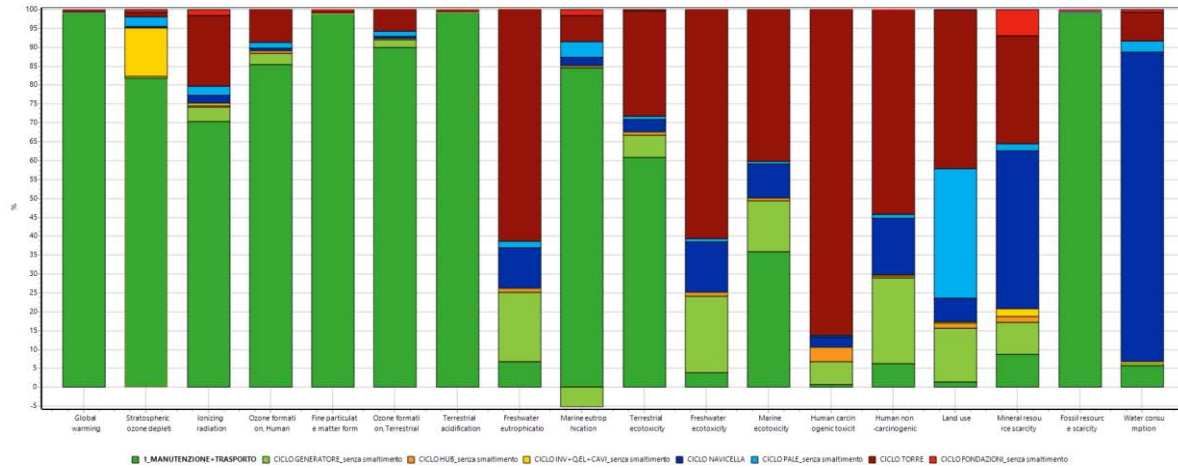


Figura 31: Valutazione dell'impatto turbina con lo smaltimento di torre e navicella con metodo ReCiPe 2013 (H) endpoint

Per un'analisi più dettagliata, ci si riferisce sempre ai valori numerici, in questo caso riportati in Tabella 7-13.

Tabella 7-13: Valori categorie di impatto turbina

	global warming, human health [DALY]	global warming, terrestrial ecosystems [species.yr]	global warming, freshwater ecosystems [species.yr]	stratospheric ozone depletion [DALY]	ionizing radiation [DALY]	ozone formation, human health [DALY]	fine particulate matter formation [DALY]	ozone formation, terrestrial ecosystems [species.yr]	terrestrial acidification [species.yr]	freshwater eutrophication [species.yr]	marine eutrophication [species.yr]
manutenzione + trasporto generatore	1,44E-02	4,35E-05	1,19E-09	8,05E-07	1,59E-07	1,20E-06	1,11E-02	2,74E-07	1,08E-05	5,56E-09	3,45E-11
hub	3,69E-06	1,11E-08	3,05E-13	4,31E-10	1,05E-10	7,64E-09	4,40E-06	1,14E-09	2,50E-09	9,95E-11	1,10E-14
inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	1,03E-05	3,11E-08	8,50E-13	1,27E-07	7,31E-10	1,19E-09	2,13E-06	1,79E-10	2,08E-09	3,80E-11	6,64E-14
pale	5,62E-06	1,69E-08	4,63E-13	2,69E-09	1,15E-09	9,27E-09	7,68E-06	1,30E-09	6,56E-09	3,33E-09	4,17E-13
torre	1,14E-05	3,43E-08	9,36E-13	2,61E-08	2,60E-09	2,29E-08	8,88E-06	4,16E-09	6,83E-09	2,98E-10	1,46E-12
fondazioni	4,46E-05	1,34E-07	3,67E-12	1,22E-08	3,86E-09	1,21E-07	7,80E-05	1,75E-08	3,77E-08	1,11E-08	3,36E-13
	2,91E-05	8,79E-08	2,40E-12	6,23E-09	3,45E-09	4,52E-10	1,15E-05	1,03E-10	1,19E-08	3,46E-12	6,19E-13
	terrestrial ecotoxicity [species.yr]	freshwater ecotoxicity [species.yr]	marine ecotoxicity [species.yr]	human carcinogenic toxicity [DALY]	human non-carcinogenic toxicity [DALY]	land use [species.yr]	mineral resource scarcity [USD2013]	fossil resource scarcity [USD2013]	water consumption, human health [DALY]	water consumption, terrestrial ecosystems [DALY]	water consumption, aquatic ecosystems [DALY]
manutenzione + trasporto generatore	1,58E-08	3,32E-10	1,36E-09	2,05E-06	7,16E-06	4,51E-10	0,117	2,13E+03	3,08E-06	1,87E-08	8,38E-13
hub	1,51E-09	4,06E-11	2,02E-11	4,20E-06	1,10E-06	4,24E-09	0,114	1,55	4,30E-07	2,62E-09	1,17E-13
hub	1,98E-10	9,87E-12	3,10E-12	2,88E-06	1,91E-07	4,17E-10	0,0231	0,147	4,09E-08	2,49E-10	1,11E-14

inverter + q.el + cavi di collegamento navicella	4,24E-11	6,40E-13	3,60E-13	1,77E-07	2,12E-07	1,14E-10	0,027	0,171	1,61E-07	9,76E-10	4,37E-14
pale	8,69E-10	2,77E-11	1,31E-11	1,92E-06	6,22E-07	1,85E-09	0,564	2,18	4,43E-05	2,69E-07	1,20E-11
torre	2,26E-10	7,72E-12	2,17E-12	1,95E-07	1,29E-07	1,03E-08	0,0251	1,41	1,59E-06	9,69E-09	4,33E-13
fondazioni	7,22E-09	2,06E-10	7,96E-11	6,92E-05	4,44E-06	1,26E-08	0,386	4,25	4,05E-06	2,46E-08	1,10E-12
	9,43E-11	5,65E-13	5,64E-13	3,19E-08	2,07E-07	(-)	0,0924	0,871	4,11E-07	2,50E-09	1,12E-13

Manutenzione e trasporto sono, come ci si aspettava, il componente più impattante anche in questo caso. A seguire, la torre ricopre quasi la totalità delle categorie di impatto. Per “stratospheric ozone depletion” e per “terrestrial ecotoxicity” è l’assemblaggio inverter + q.el + cavi di collegamento che possiede l’impatto maggiore, e l’assemblaggio navicella per “water consumption”. A supporto di quanto detto si allega la Figura 32.

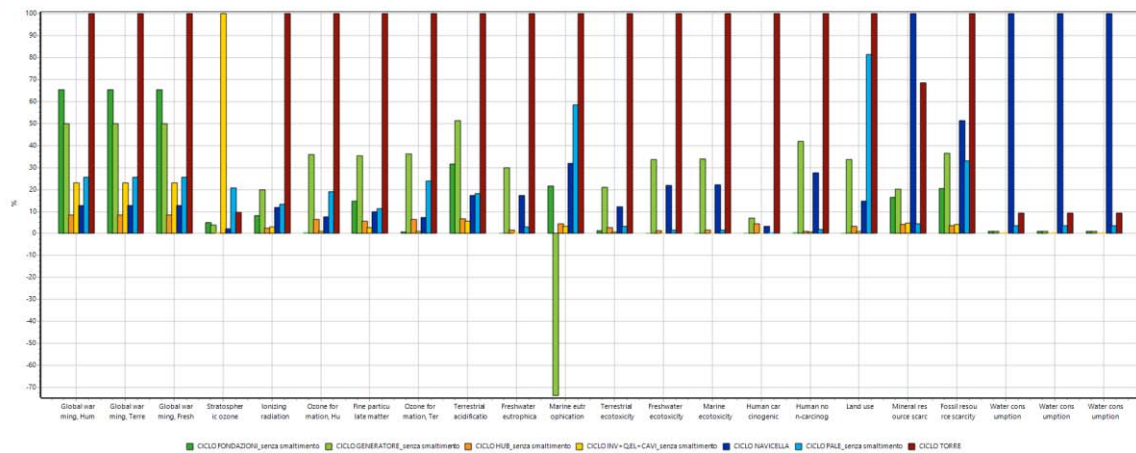


Figura 32: Confronto assemblaggi nelle varie categorie di impatto

Anche in questo caso, il peso maggiore sulle varie categorie di impatto è da affidarsi alla torre. Il valore negativo rilevato per il generatore in “marine eutrophication” è legato al componente in sé, come già descritto in relazione allo studio midpoint.

7.4.3 Confronto

Non risulta così semplice come può sembrare un confronto tra i due approcci: questo perché, a differenza del midpoint, l’approccio endpoint permette di avere delle informazioni più dettagliate e analizzabili sul danno, in quanto i risultati sono forniti proprio in relazione alla categoria che vanno ad impattare (DALY, species/yr, USD2013); al contrario, l’approccio midpoint si focalizza sulle sostanze (i risultati sono forniti in kg sostanza impattante equivalente, m^2 , m^3).

L’andamento, inteso come rapporto tra i vari assemblaggi, risulta essere lo stesso con entrambi i metodi, quello che cambia sono ovviamente i valori numerici.

Per una questione prettamente di interesse relativa a questo elaborato, si è scelto di focalizzare l’attenzione su 6 categorie di impatto, le quali risultano essere più caratterizzanti per il sistema scelto: *global warming*, *ozone formation*, *human carcinogenic toxicity*, *human non-carcinogenic toxicity*, *mineral resource scarcity*, *fossil resource scarcity*.

Vengono dunque riportate due tabelle, le quali racchiudono in sintesi i risultati relativi alle categorie di impatto che su cui si è deciso porre l'attenzione.

Tabella 7-14: Confronto per metodo ReCiPe midpoint

	global warming [kg CO2 eq]		ozone formato, human health [kg Nox eq]		ozone formation, terrestrial ecosystems [kg Nox eq]		human carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]		human non- carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]		mineral resource scarcity [kg Cu eq]		fossil resource scarcity [kg oil eq]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzione + trasporto	1,55E+04	1,55E+04	1,32	1,32	2,13	2,13	0,616	0,616	31,4	31,4	0,506	0,506	4,72E+03	4,72E+03
generatore	23	24	0,048	0,0476	0,0494	0,0493	1,59	1,26	34,5	4,82	0,457	0,493	5,8	5,99
hub	3,99	3,98	0,00847	0,00839	0,0089	0,00882	0,869	0,869	0,838	0,838	0,1	0,1	0,164	0,758
invertor + q.el + cavi di collegamento	10,5	11,1	0,00602	0,00131	0,00597	0,00139	0,641	0,0532	55,6	0,93	0,141	0,117	0,707	0,785
navicella	6,05	6,05	0,0102	0,0102	0,0101	0,0101	0,578	0,578	2,73	2,79	2,44	2,44	7,21	7,21
pale	11,9	12,2	0,0246	0,0252	0,0317	0,0323	0,0759	0,0587	2,22	0,567	0,0963	0,108	4,07	4,13
torre	48	48	0,133	0,133	0,136	0,136	20,8	20,8	19,5	19,5	1,67	1,67	13,9	13,9
fondazioni	8,28	31,4	-0,0436	0,000497	-0,0464	0,0008	-0,0411	0,00961	-0,392	0,909	-0,396	0,4	1,89	5,53

Tabella 7-15: Confronto per metodo ReCiPe endpoint

	global warming, human health [DALY]		global warming, terrestrial ecosystems [species.yr]		global warming, freshwater ecosystems [species.yr]		ozone formato, human health [DALY]		ozone formation, terrestrial ecosystems [species.yr]		human carcinogenic toxicity [DALY]		human non-carcinogenic toxicity [DALY]		mineral resource scarcity [USD2013]		fossil resource scarcity [USD2013]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzione + trasporto	1,44E-02	1,44E-02	4,35E-05	4,35E-05	1,19E-09	1,19E-09	1,20E-06	1,20E-06	2,74E-07	2,74E-07	2,05E-06	2,05E-06	7,16E-06	7,16E-06	0,117	0,117	2,13E+03	2,13E+03
generatore	2,14E-05	2,23E-05	6,45E-08	6,72E-08	1,76E-12	1,84E-12	4,37E-08	4,33E-08	6,38E-09	6,35E-09	5,27E-06	4,20E-06	7,87E-06	1,10E-06	0,106	0,114	1,54	1,55
hub	3,70E-06	3,69E-06	1,12E-08	1,11E-08	3,05E-13	3,05E-13	7,71E-09	7,64E-09	1,15E-09	1,14E-09	2,88E-06	2,88E-06	1,91E-07	1,91E-07	0,0231	0,0231	0,15	0,147
invertor + q.el + cavi di collegamento	9,78E-06	1,03E-05	2,95E-08	3,11E-08	8,05E-13	8,50E-13	5,48E-09	1,19E-09	7,70E-10	1,79E-10	2,13E-06	1,77E-07	1,27E-05	2,12E-07	0,0325	0,027	0,158	0,171
navicella	5,62E-06	5,62E-06	1,69E-08	1,69E-08	4,63E-13	4,63E-13	9,27E-09	9,27E-09	1,30E-09	1,30E-09	1,92E-06	1,92E-06	6,22E-07	6,22E-07	0,564	0,564	2,18	2,18
pale	1,10E-05	1,14E-05	3,32E-08	3,43E-08	9,06E-13	9,36E-13	2,24E-08	2,29E-08	4,08E-09	4,16E-09	5,22E-07	1,95E-07	5,07E-07	1,29E-07	0,0223	0,0251	1,4	1,41
torre	4,46E-05	4,46E-05	1,34E-07	1,34E-07	3,67E-12	3,67E-12	1,21E-07	1,21E-07	1,75E-08	1,75E-08	6,92E-05	6,92E-05	4,44E-06	4,44E-06	0,386	0,386	4,25	4,25
fondazioni	7,69E-06	2,91E-05	2,32E-08	8,79E-08	6,34E-13	2,40E-12	-3,97E-08	4,52E-10	-5,98E-09	1,03E-10	-1,36E-07	3,19E-08	-8,94E-08	2,07E-07	-0,0916	0,0924	0,298	0,871

I due approcci rilevano delle congruenze:

- l'assemblaggio manutenzione + trasporto è quello che presenta valori maggiori in tutte le categorie di impatto; il valore maggiore risulta essere in "fossil resource scarcity" con 2.13E3 USD2013 per l'approccio endpoint e nella categoria "global warming" con 1.55E4 kg CO₂ equivalente per l'approccio midpoint;
- la torre risulta essere il componente della turbina maggiormente impattante: il valore maggiore anche in questo caso è per la categoria "fossil resource scarcity" con 4.25 USD2013 per l'approccio endpoint e nella categoria "global warming" con 48 kg CO₂ equivalente per l'approccio midpoint;

Focalizzandosi sull'approccio endpoint, che come si è evidenziato in precedenza, fornisce i risultati delle varie categorie di impatto con le stesse unità di misura, è possibile fare le seguenti conclusioni:

- l'impatto maggiore è da attribuire alla categoria di impatto "fossil resource scarcity", in quanto, in relazione a tutti gli assemblaggi, esso riporta il valore maggiore tra tutte le categorie di impatto considerate;
- analizzando lo smaltimento, si possono fare le seguenti considerazioni in relazione ad ogni categoria di impatto:
 - a. Per "global warming": lo smaltimento comporta un minor valore di impatto per tutti i componenti;
 - b. Per "ozone formation": lo smaltimento comporta un minor valore di impatto per pale e fondazioni, mentre un valore maggiore per generatore

- e inverter + q. elettrico + cavi di collegamento; questi risultati sono relativi al fatto che le apparecchiature elettroniche vengono smaltite come RAEE;
- c. Per “human carcinogenic toxicity”: lo smaltimento comporta un valore maggiore di impatto per tutti i componenti;
 - d. Per “human non-carcinogenic toxicity”: lo smaltimento comporta un valore maggiore di impatto per tutti i componenti;
 - e. Per “mineral resource scarcity”: lo smaltimento comporta un valore minore di impatto per tutti i componenti, ad eccezione di inverter + q. elettrico + cavi di collegamento;
 - f. Per “fossil resource scarcity”: lo smaltimento comporta un minor valore di impatto per tutti i componenti; questo risultato era facilmente intuibile in quanto lo smaltimento comporta il riutilizzo di un materiale che, in caso contrario, comporterebbe una nuova estrazione.

Queste affermazioni sono a supporto del perché si è scelto di fare smaltimento o no; si ricorda che i valori relativi alle fondazioni con annesso smaltimento sono da considerare ideali in quanto lo smaltimento dei ferri d'acciaio non risulta fattibile nella realtà.

8 CONFRONTO DEI RISULTATI CON UN ALTRO SITO

Viene scelto un altro sito su cui eseguire l'analisi: si tratta di monte d'Aria, in località Serrapetronia, in provincia di Macerata, in cui recentemente è stato costruito un piccolo parco eolico. A tale sito corrisponde una classe del vento 4, con velocità media del vento di 6 [m/s], a cui corrisponde un'energia di 29974 kWh/anno, calcolato come fatto per il caso di Candela.

Il sistema è stato costruito nello stesso modo del caso precedente, avendo cura di riportare a questo sito tutti i valori, e modificando il chilometraggio relativo all'assemblaggio trasporto.

Si ritiene opportuno non riportare tutta l'analisi, in quanto risulterebbe ripetitivo poiché uguale al caso precedente; si sceglie di riportare solo i risultati, per fare un confronto con il caso precedente.

Per semplicità, ci si riferisce al sito di Candela con caso 1 ed al sito di Monte d'Aria con caso 2.

8.1 CUMULATIVE ENERGY DEMAND (CED)

Per il confronto dei risultati relativi al caso 2, riportati in Tabella 7-4, ci si riferisce ai risultati ottenuti con la metodologia CED relativi al caso 1, riportati in Tabella 8-1.

Tabella 8-1: Risultati CED relativi a Monte d'Aria

	non renewable, fossil [MJ]		non renewable, primary [MJ]		non renewable, metals [MJ]		non renewable, minerals [MJ]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGI O	TURBINA	TURBINA VANTAGGI O	TURBINA	TURBINA VANTAGGI O	TURBINA	TURBINA VANTAGGI O
manutenzione + trasporto generatore	56,6	56,6	0,00389	0,00389	9,02	9,02	0,154	0,154
hub	71,4	70,8	0,0018	0,00179	9,09	9,09	0,245	0,218
inverter + q.el + cavi di collegamento	9,76	17,5	0,00341	0,000605	20,1	0,508	0,281	0,128
navicella	135	135	0,0974	0,0974	219	219	0,733	0,733
pale	288	294	5,47	5,47	2,74	3,19	0,769	0,772
torre	1,25E+03	1,25E+03	0,0546	0,0546	160	160	5,26	5,26
fondazioni	-344	(-)	-0,00717	(-)	-65	(-)	-0,44	(-)

Considerando inizialmente la sola Tabella 8-1, vengono fatte le seguenti considerazioni:

- La categoria di impatto che ha una richiesta di maggior energia è “non renewable, fossil fuel” per tutti gli assemblaggi, ad eccezione degli assemblaggi navicella e inverter + q. elettrico + cavi di collegamento per cui la categoria di impatto con valore più elevato tra tutte è “non renewable, metals”;
- La richiesta maggiore di energia è relativa alla torre, in cui, nella categoria di impatto “non renewable, fossil fuel” ha riportato 1.25E3 MJ;

- In particolare, nella categoria di impatto “non renewable, fossil fuel”, dal punto di vista dello smaltimento, si rileva un aumento dell’energia richiesta quando si considera di non riciclare, questo perché non è imposto il recupero dell’energia primaria contenuta nei vari materiali.

Confrontando infine i risultati tra i due siti, al caso 2 si rileva un raddoppio di tutti i risultati, in ogni categoria: questo può essere spiegato considerando che al caso 2 l’energia ottenuta annualmente è circa la metà rispetto al caso 1 (si parla di 29974 kWh/anno contro 60060 kWh/anno); dunque, poiché per riportare i valori all’unità funzionale kWh si è diviso per l’energia, è chiaro come i risultati del caso 2 siano il doppio rispetto a quelli del caso 1.

8.2 IPCC 2013

Per il confronto dei risultati relativi al caso 2, riportati in Tabella 7-9, ci si riferisce ai risultati ottenuti con la metodologia CED relativi al caso 1, riportati in Tabella 8-2.

Tabella 8-2: Risultati IPCC 2013 relativi a Monte d’Aria

	IPCC GWP 20a [kg CO2 equivalente]		IPCC GWP 100a [kg CO2 equivalente]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzione + trasporto generatore	2,74E+04	2,74E+04	2,60E+04	2,60E+04
hub	9,14	9,12	7,86	7,84
inverter + q.el + cavi di collegamento	22,9	24,2	19,2	20,4
navicella	13,9	13,9	11,9	11,9
pale	27,2	28,1	23,1	23,8
torre	108	108	94,8	94,8
fondazioni	16	68,8	16,9	62,4

Facendo riferimento alla Tabella 8-2, si possono fare le seguenti considerazioni:

- Considerando un periodo di tempo più lungo, 100 anni al posto di 20 anni, gli impatti risultano minori, seppur di poco;
- L’impatto maggiore è da attribuire all’assemblaggio manutenzione + trasporti, con un valore di 2.74E4 kg CO₂ equivalente per il caso 20 anni e 2.6E4 kg CO₂ equivalente per il caso 100 anni;

Anche in questo caso, confrontando i risultati tra i due siti, al caso 2 si rileva un raddoppio di tutti i risultati, in ogni categoria. Il motivo è lo stesso precedentemente enunciato.

8.3 ReCiPe 2016 MIDPOINT ED ENDPOINT

Per il confronto dei risultati relativi al caso 2, riportati in Tabella 7-14 per il caso midpoint e in Tabella 7-15 per il caso endpoint, ci si riferisce ai risultati ottenuti con la metodologia CED relativi al caso 1, riportati in Tabella 8-3 per il caso midpoint e in Tabella 8-4 per il caso endpoint.

Tabella 8-3: Risultati ReCiPe 2016 midpoint riferiti a Monte d'Aria

	global warming [kg CO2 eq]		ozone formatio, human health [kg Nox eq]		ozone formation, terrestrial ecosystems [kg Nox eq]		human carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]		human non- carcinogenic toxicity [kg 1.4-DCB]		mineral resource scarcity [kg Cu eq]		fossil resource scarcity [kg oil eq]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzione + trasporto	2,61E+04	2,61E+04	2,22	2,22	3,58	3,58	1,04	1,04	52	52,9	0,855	0,855	7,93E+03	7,93E+03
generatore	46,2	48,1	0,0961	0,0953	0,0991	0,0987	3,18	2,53	69,2	9,66	0,915	0,987	11,6	12
hub	8	7,98	0,017	0,0168	0,0178	0,0177	1,74	1,74	1,68	1,68	0,201	0,201	1,53	1,52
inverter + q.el + cavi di collegamento	21,1	22,3	0,0121	0,00262	0,012	0,00278	1,29	0,107	111	1,86	0,282	0,234	1,42	1,57
navicella	12,1	12,1	0,0204	0,0204	0,0201	0,0201	1,16	1,16	5,47	5,47	4,88	4,88	14,4	14,4
pale	23,7	24,5	0,0493	0,0505	0,0634	0,0647	0,152	0,118	4,46	1,14	0,193	0,217	8,15	8,27
torre	96,2	96,2	0,266	0,266	0,272	0,272	41,8	41,8	39,1	39,1	3,35	3,35	27,9	27,9
fondazioni	16,6	62,9	-0,0875	0,000995	-0,0929	0,0016	-0,082	0,0192	-0,786	1,82	-0,794	0,801	3,79	11,1

Tabella 8-4: Risultati ReCiPe 2016 endpoint riferiti a Monte d'Aria

	global warming, human health [DALY]		global warming, terrestrial ecosystems [species.yr]		global warming, freshwater ecosystems [species.yr]		ozone formatio, human health [DALY]		ozone formation, terrestrial ecosystems [species.yr]		human carcinogenic toxicity [DALY]		human non- carcinogenic toxicity [DALY]		mineral resource scarcity [USD2013]		fossil resource scarcity [USD2013]	
	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO	TURBINA	TURBINA VANTAGGIO
manutenzio ne + trasporto	2,43E-02	2,43E-02	7,32E-05	7,32E-05	2,00E-09	2,00E-09	2,03E-06	2,03E-06	4,62E-07	4,62E-07	3,47E-06	3,47E-06	1,21E-05	1,21E-05	0,198	0,198	3,58E+03	3,58E+03
generatore	4,28E-05	4,46E-05	1,29E-07	1,35E-07	3,53E-12	3,68E-12	8,75E-08	8,67E-08	1,28E-08	1,27E-08	1,06E-05	8,41E-06	1,58E-05	2,20E-06	0,211	0,228	3,09	3,11
hub	7,42E-06	7,40E-06	2,24E-08	2,23E-08	6,12E-13	6,10E-13	1,54E-08	1,53E-08	2,30E-09	2,28E-09	5,78E-06	5,78E-06	3,83E-07	3,83E-07	0,0464	0,0464	0,3	0,094
inverter + q.el + cavi di collegamen to	1,96E-05	2,07E-05	5,91E-08	6,23E-08	1,61E-12	1,70E-12	1,10E-08	2,38E-09	1,54E-09	3,59E-10	4,27E-06	3,55E-07	3,83E-07	4,25E-07	0,0651	0,0541	0,317	0,343
navicella	1,13E-05	1,13E-05	3,40E-08	3,40E-08	9,28E-13	9,28E-13	1,86E-08	1,86E-08	2,60E-09	2,60E-09	3,85E-06	3,85E-06	2,54E-05	1,25E-06	1,13	1,13	4,37	4,37
pale	2,20E-05	2,28E-05	6,65E-08	6,87E-08	1,82E-12	1,88E-12	4,49E-08	4,59E-08	8,17E-09	8,33E-09	5,05E-07	3,90E-07	1,25E-06	2,59E-07	0,0446	0,0503	2,8	2,82
torre	8,93E-05	8,93E-05	2,69E-07	2,69E-07	7,36E-12	7,36E-12	2,42E-07	2,42E-07	3,51E-08	3,51E-08	1,39E-04	1,39E-04	8,91E-06	8,91E-06	0,774	0,774	8,51	8,51
fondazioni	1,54E-05	5,84E-05	4,65E-08	1,76E-07	1,27E-12	4,81E-12	-	9,06E-10	-	2,07E-10	-	6,40E-08	-	4,15E-07	-	0,185	0,596	1,75

Considerando le affermazioni relative all'approccio endpoint, il quale rispetto a quello midpoint permette un confronto tra le varie categorie di impatto; si fanno dunque le seguenti considerazioni in relazione alla Tabella 8-4:

- La categoria di impatto più colpita risulta essere "fossil resource scarcity" per tutti gli assemblaggi considerati;
- Il valore di impatto maggiore è ottenuto dall'assemblaggio manutenzione + trasporto nella categoria "fossil resource scarcity" con un valore di 3.58E3 USD2013;
- La torre risulta il componente della turbina con maggior impatto, con un valore di 8.51 USD2013 nella categoria di impatto "fossil resource scarcity";

- Dal punto di vista dello smaltimento, i risultati ottenuti sono in linea con le affermazioni già enunciate per il caso 1.

Anche in questo caso, facendo il confronto tra i risultati ottenuti nel caso 1 e nel caso 2, si rileva un raddoppio di tutti i valori.

9 CONCLUSIONI

Scopo di questo elaborato è stato analizzare il ciclo di vita nel dettaglio di una turbina eolica, precisamente della turbina FX EVO 16-20 di proprietà ESPE group Srl. Per lo studio si sono applicate le norme della serie ISO 14040 e ISO 14044, riguardanti le valutazioni del ciclo di vita.

I dati utilizzati sono stati forniti dalla ditta produttrice, ESPE Srl, e, nella particolarità del generatore, si è contattato direttamente il fornitore SOGA Spa energyteam; su loro indicazione, non è possibile divulgare informazioni relative a tale componente in quanto sono state fornite con accordo di segretezza.

La modellazione del sistema e la sua analisi è stata fatta tramite il software SimaPro, sviluppato dalla società Pré Consultants, nella versione 9.0.0.47. Per l'analisi degli impatti sono stati scelti tre metodi, i quali vengono ritenuti i più adatti per il sistema analizzato. Tutti hanno riportato risultati molto simili, identificando nella fase di manutenzione e trasporto quella più impattante; tale fase tuttavia non può essere eliminata, in quanto i fornitori a cui si affida l'azienda sono dislocati nel territorio nazionale, e internazionale considerando la torre che proviene dall'Albania. Il forte impatto rilevato è anche dovuto al sito scelto per l'installazione: la decisione è stata presa in relazione alle rilevazioni del GSE, scegliendo il posto in cui c'è la maggior potenza installata e dunque la maggior probabilità di installare il sistema.

L'analisi è stata svolta considerando in parallelo due sistemi: il primo formato dai vari assemblaggi con tutti i loro smaltimenti, mentre il secondo con i vari assemblaggi ma solo gli smaltimenti relativi a torre e navicella, ritenuti, dopo aver analizzato in dettaglio ogni assemblaggio con il metodo IPCC 2013, gli unici vantaggiosi dal punto di vista dei kg di CO₂ equivalente prodotta. Vengono ora riportati i risultati degli impatti ritenuti più significativi.

Tralasciando il contributo della fase manutenzione e assemblaggio, il componente che riporta un maggior impatto dal punto di vista dei kg di CO₂ equivalente, sia nel primo che nel secondo caso, risulta essere la torre con:

- IPCC 2013: 53.7 kg di CO₂ equivalente (caso 20 anni) e 47.3 kg di CO₂ equivalente (caso 100 anni);
- ReCiPe (H): 48 kg di CO₂ equivalente (caso midpoint) e 4.46E-5 DALY per human health, 1.34E-7 species/yr per terrestrial ecosystems (caso endpoint).

Considerando in particolare poi l'analisi fatta con la metodologia ReCiPe, anche dal punto di vista degli altri indicatori la torre è la più impattante:

- Fossil resource scarcity: 13.9 kg oil eq (caso midpoint) e 4.25 USD2013 (caso endpoint);
- Ozone formation: 0.133 kg di NO_x equivalente per human health e 0.136 kg di NO_x equivalente per terrestrial ecosystems (caso midpoint) e 1.21E-7 DALY per human health e 1.75E-8 species/yr per terrestrial ecosystems (caso endpoint).

La metodologia CED, che considera il quantitativo totale di energia richiesta, ha rilevato, oltre che la torre, anche l'assemblaggio inverter + q. elettrico + cavi elettrici: questo è relativo alla grande presenza di componenti elettroniche in questo assemblaggio, le quali, anche se smaltite, comunque sono difficilmente riciclabili ma vengono considerati RAEE (rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche).

I risultati riportati sono relativi al caso del sito a Candela, in provincia di Foggia; è poi stato considerato un secondo sito, Monte d'Aria nelle marche, per poter valutare in che modo la scelta del sito si rispecchi nei risultati: è stato rilevato che, poiché il secondo sito è caratterizzato da un'energia circa la metà rispetto al sito di Candela (29974 kWh/anno rispetto a 60060 kWh/anno) gli impatti risultano il doppio rispetto al primo caso.

Da questo, è possibile concludere che la scelta del sito è molto importante dal punto di vista dei risultati: risulta migliore scegliere un sito che presenta una velocità media del vento abbastanza elevata, in modo da poter sfruttare la turbina il più possibile alla sua potenza nominale, ricavando dunque un'energia annua maggiore; questo si ripercuote anche negli impatti.

Tale elaborato non vuole essere in nessun modo un trattato necessario alla richiesta di certificazione EDP, ma un punto di partenza per successive analisi.

10 APPENDICE

Vengono riportati i grafici ad albero relativi ai vari componenti della turbina, utilizzati per l'analisi dello smaltimento. Tutte le figure si riferiscono all'analisi con il metodo IPCC 2013, con intervallo di tempo 20 anni.

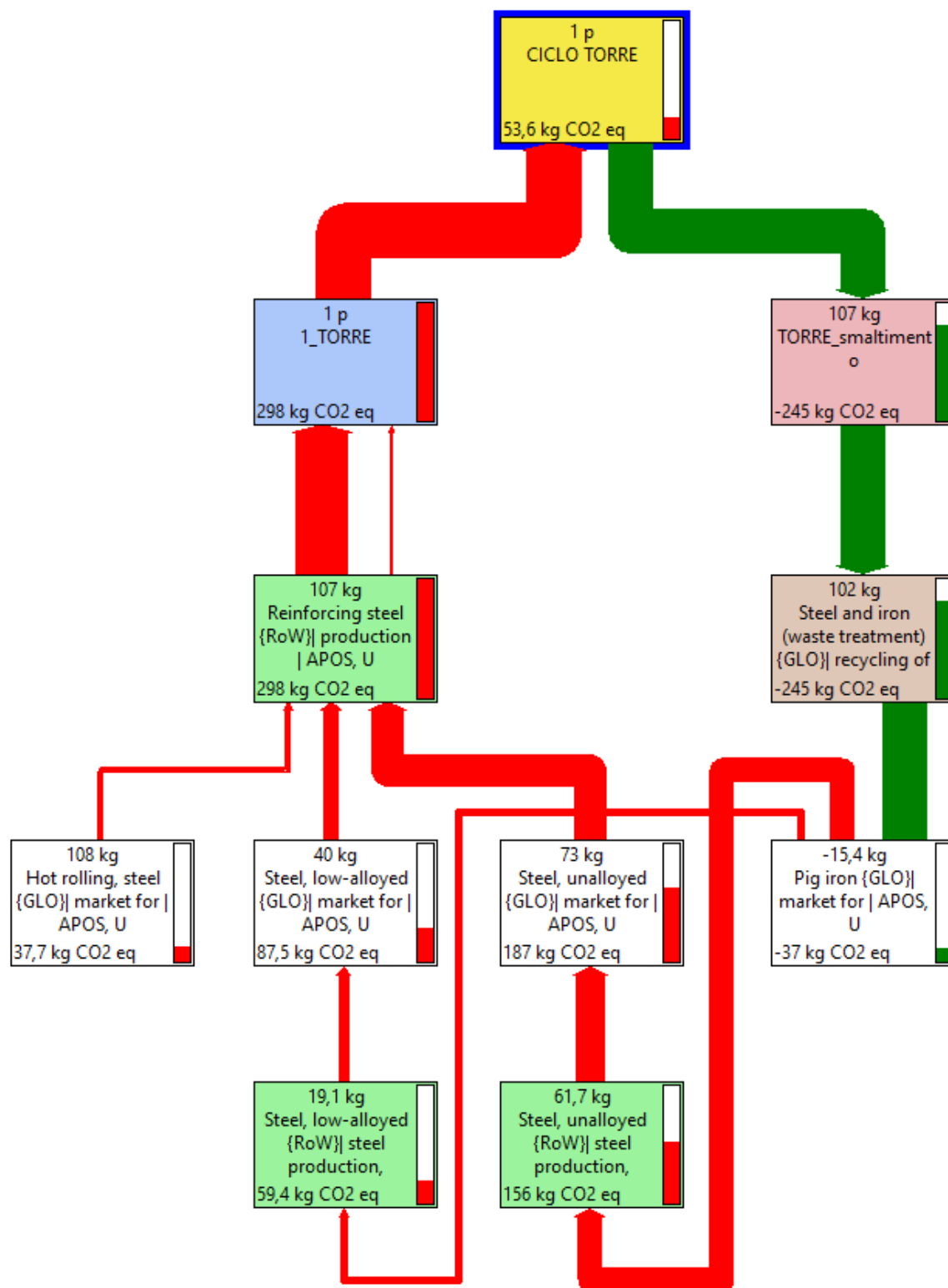


Figura 33: Torre

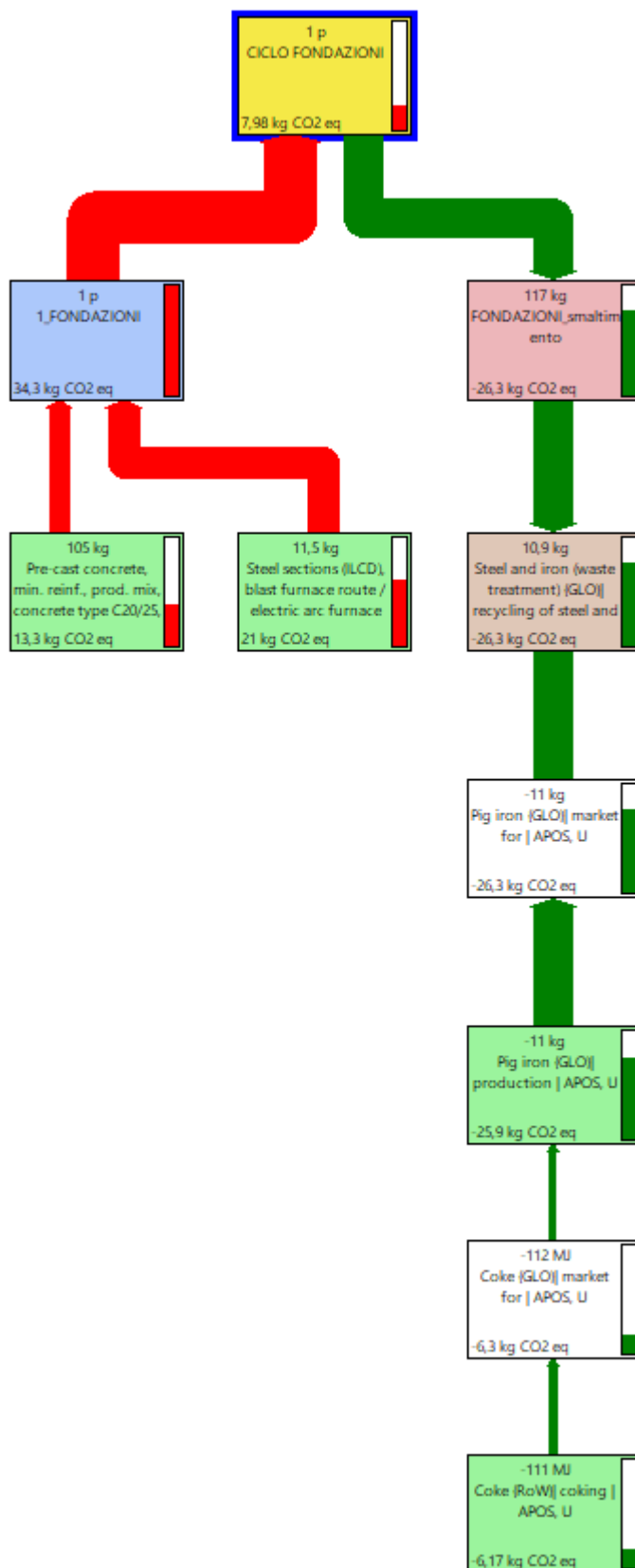


Figura 34: Fondazioni

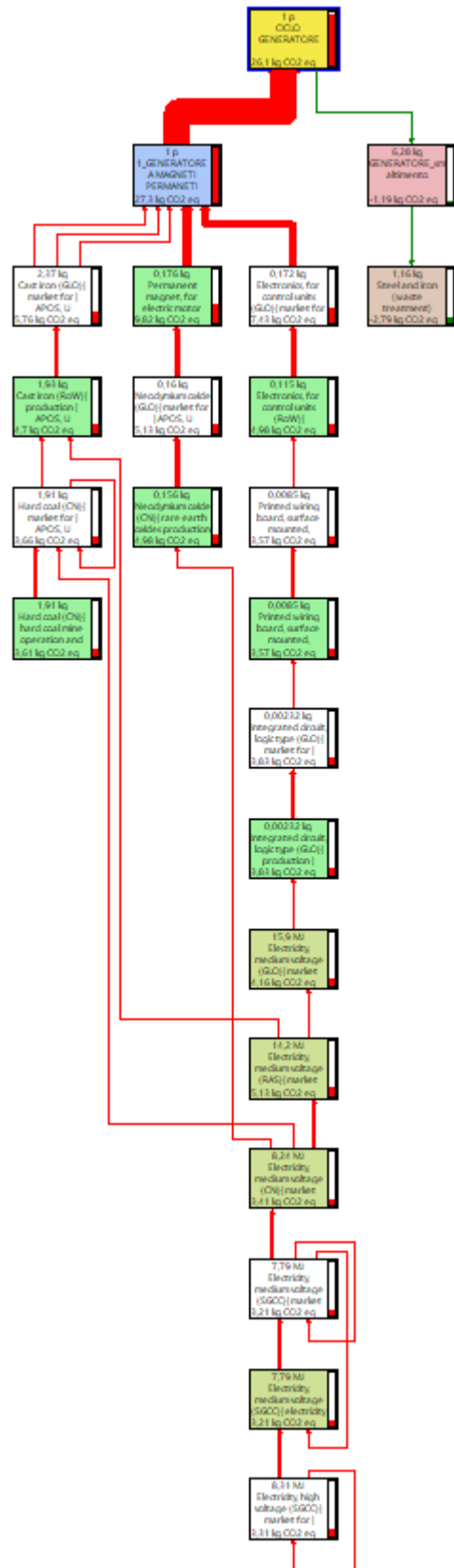


Figura 35:Generatore

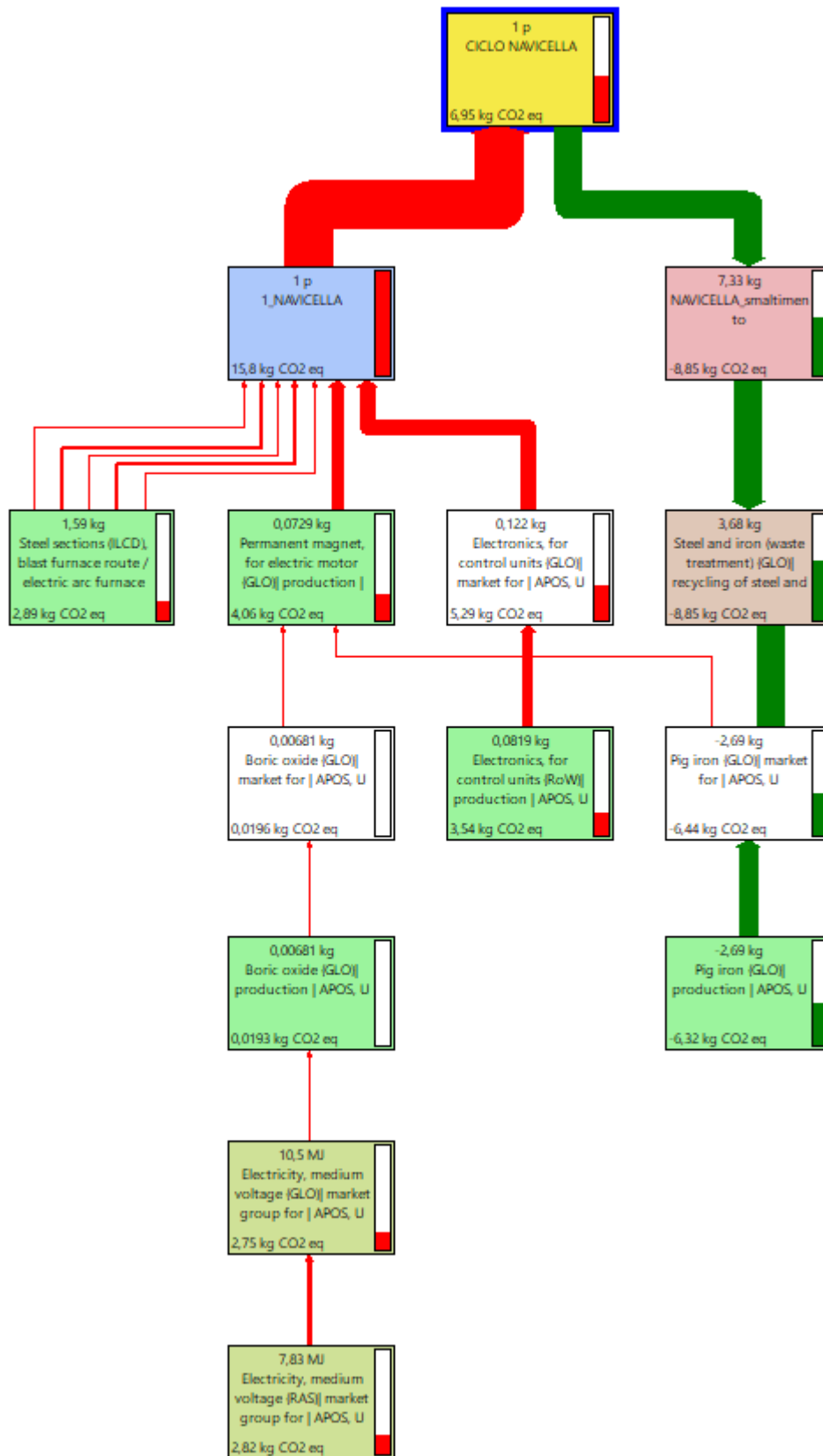


Figura 36: Navicella

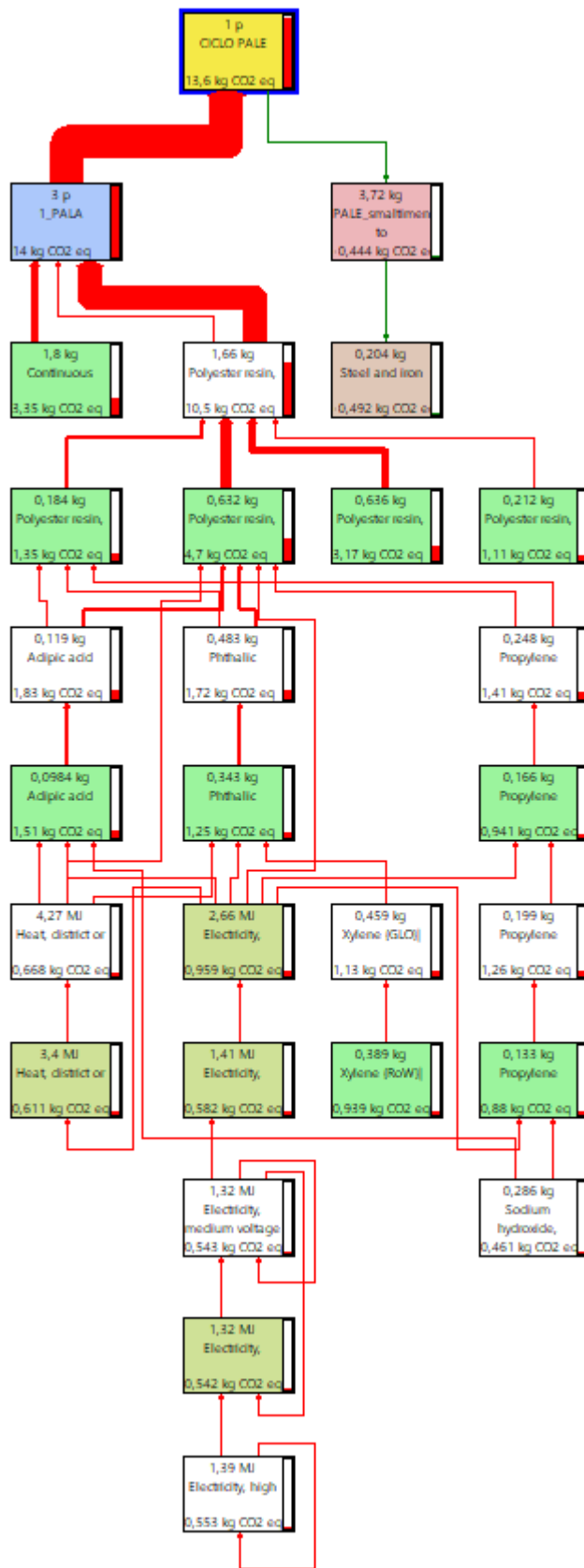


Figura 37: Pale

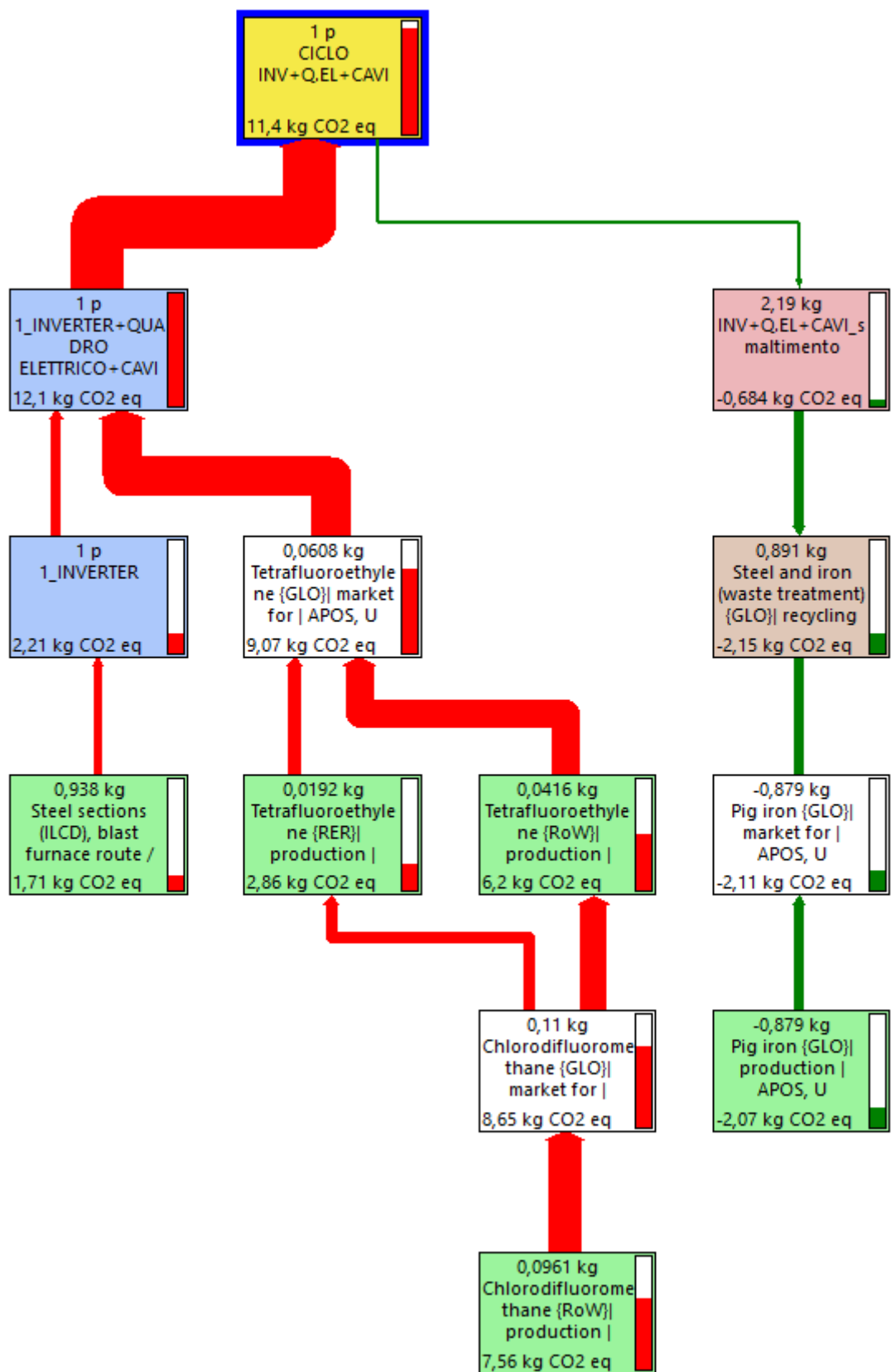


Figura 38: Inverter + q. el + cavi di collegamento

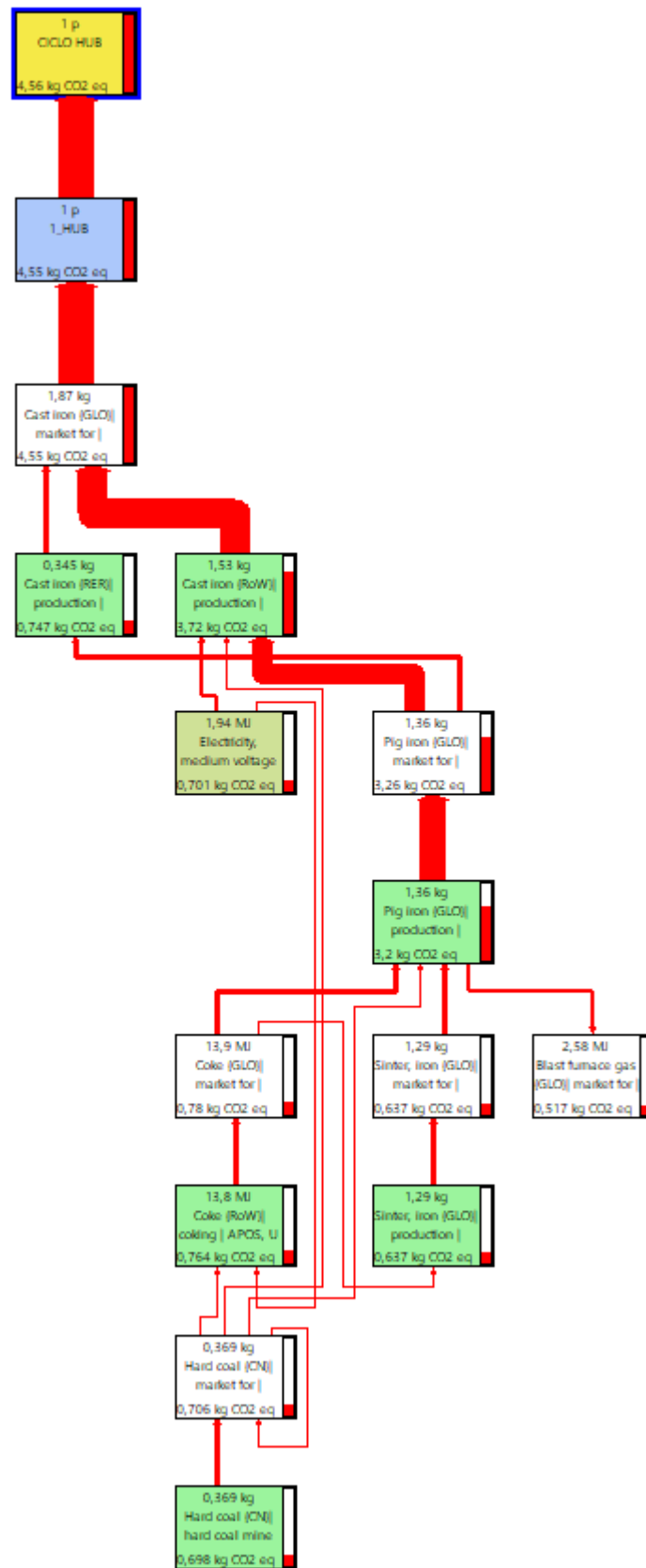


Figura 39: Hub

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Commission, *Accordo di Parigi*, 2016.
(https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it)
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2019 Executive Summary*, 2019.
- [3] Md. Shazib Uddin, S. Kumar, *Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique*. Journal of Cleaner Production, 2014.
- [4] Vestas, *Sustainability at Vestas, Life cycle assessment*.
(<https://www.vestas.com/en/about/sustainability#!life-cycle-assessment>)
- [5] SPA, Gestore dei Servizi Energetici. *Rapporto statistico 2018 – Fonti Rinnovabili*, 2019.
- [6] Stoppato Anna, *LCA – Life Cycle Assessment – Breve introduzione – note per il corso “ENERGETICA APPLICATA” – Anno Accademico 2015-2016*, 2015.
- [7] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. *UNI EN ISO 14040: Environmental management, LYFE CYCLE ASSESSMENT, Principles and guideline*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2006.
- [8] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. *UNI EN ISO 14044: Environmental management, LYFE CYCLE ASSESSMENT, Requirements and guideline*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2006.
- [9] Intergovernmental panel on climate change, *What is the Greenhouse Effect?*
(https://wg1.ipcc.ch/publications/wg1-ar4/faq/wg1_faq-1.3.html)
- [10] Pré, various authors, *SimaPro Database Manual Methods Library*, 2019.
- [11] ESPE Professione Energia, *User manual FX EVO 16-20-OK wind turbine generator*.
- [12] ESPE Professione Energia, *Datasheet FX EVO 16-20-OK-ITA rev. 2017-12*. (2017)
- [13] ESPE Professione Energia, *Maintenance manual FX EVO 16-20-OK wind turbine generator*.
- [14] ESPE Professione Energia, *Installation and commissioning manual FX EVO 16-20-OK wind turbine generator*.
- [15] Steel recycling institute, *Recycling*. (<https://www.steelsustainability.org/recycling>)
- [16] E. Worrel, M. Reuter, *Handbook of Recycling – State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists*, Elsevier, 2014.

[17]RSE Ricerca Sistema Energetico, *Atlante eolico interattivo*. (<http://atlanteeolico.rse-web.it/>)