



**Università Degli Studi Di Padova**  
**Dipartimento di Ingegneria industriale**  
**Corso Di Laurea Magistrale In Ingegneria Energetica**

Analisi LCA di sistemi per la produzione di  
energia elettrica integrati con accumulatori  
elettrochimici e FER

**Relatore:**

Prof.ssa Anna Stoppato

**Laureanda:**

Vittoria Gasparello

1180305

**2020**



# Abstract

La costante e continua ricerca per il miglioramento dei sistemi di accumulo stazionario, li pone oggi come strumenti fondamentali per la gestione e la risoluzione delle problematiche legate alla stabilità di rete, alla diversificazione energetica e alla gestione delle smart-grids, con particolare attenzione agli approvvigionamenti da FRNP.

Considerata la forte variazione del sistema energetico verificatasi negli ultimi anni, i sistemi di accumulo stazionario si sono dimostrati utili nel supporto alle reti per la gestione dei picchi di domanda e possono fornire un valido contributo alle centrali per la produzione elettrica convenzionale da fonti fossili. Inoltre, gli incessanti perfezionamenti delle tecnologie utilizzate per le celle elettrochimiche, le problematiche relative alla gestione del fine vita e gli impatti associati ai metalli preziosi coinvolti nei processi produttivi, hanno portato l'attenzione verso nuovi materiali e tecnologie promettenti che si propongono come valida alternativa alle soluzioni ad oggi mature e consolidate, gli ioni di sodio.

In quest'ottica, questo lavoro di tesi si propone di valutare gli impatti associati all'intera vita utile di alcuni sistemi utilizzati per l'accumulo stazionario e una tecnologia che si propone come innovativa e sostenibile, tramite l'utilizzo dell'analisi LCA. Per valutare la convenienza dei diversi sistemi di accumulo, verranno modellati alcuni scenari in ambiente SimaPro, che si riferiscono a realtà esistenti nelle isole minori italiane non interconnesse. Insieme all'integrazione del sistema SdA sono stati effettuati degli studi di fattibilità relativi agli incrementi delle quote FRNP per le isole in questione, che dimostreranno come l'integrazione di queste due diverse tecnologie, sia ambientalmente conveniente. Si analizzeranno gli impatti associati ai diversi storage integrati agli impianti elettrici e impianti FRNP, si mostrerà la convenienza dal punto di vista ambientale e si valuterà la notevole riduzione dell'utilizzo delle centrali termoelettriche che i sistemi SdA possono garantire.

# Sommario

1	Sostenibilità.....	10
1.1	L'evoluzione della Sostenibilità.....	10
1.2	Dal protocollo di Kyoto ad oggi.....	14
2	L'analisi LCA.....	17
2.1	La metodologia LCA.....	17
2.2	Applicabilità del LCA.....	18
2.3	L'LCA nel settore energetico.....	20
2.4	Le fasi dell'analisi LCA.....	21
2.4.1	Definizione degli scopi e degli obiettivi.....	22
2.4.2	Analisi di inventario.....	25
2.4.3	Valutazione degli impatti.....	26
2.4.4	Interpretazione dell'LCA.....	29
2.4.5	I limiti dell'analisi LCA.....	30
3	Il metodo di calcolo.....	31
3.1	Introduzione a SimaPro.....	31
3.2	Modellare in ambiente SimaPro.....	31
3.3	Metodi per la valutazione degli impatti in ambiente SimaPro.....	34
4	La generazione distribuita e le FRNP.....	37
4.1	I Principali Cambiamenti nella Rete Elettrica.....	37
4.2	I Sistemi Di Accumulo.....	38
4.2.1	L'accumulo nei Servizi di potenza e di energia.....	39
4.2.2	Gli accumulatori elettrochimici considerati.....	42
4.2.3	Caratteristiche degli accumulatori.....	42
4.2.4	Batterie agli ioni di sodio.....	44
5	Modellazione della batteria in SimaPro.....	47
5.1	Caratterizzazione della batteria.....	47
5.2	Assunzioni e ipotesi nel modello.....	48
5.3	I componenti della batteria agli ioni di sodio.....	49
5.3.1	Battery pack.....	49
5.3.2	Sistema di gestione della batteria -BMS.....	50
5.3.3	La cella agli ioni di sodio.....	50
5.3.4	Involucro della cella.....	51
5.3.5	L'elettrolita.....	52
5.3.6	Il catodo.....	54
5.3.7	L'anodo.....	56

5.4	Adeguamento alla potenza di riferimento e rendimento delle batterie.....	59
5.5	Scenario di fine vita.....	60
5.5.1	Gli scenari di smaltimento.....	61
	Smaltimento dell'alluminio.....	63
	Componenti metalliche.....	63
	Componenti elettroniche.....	63
5.5.2	Gli scenari di riuso.....	64
6	LCIA della batteria agli ioni di sodio.....	66
6.1	Na-ion.....	66
6.2	Confronto con le altre tecnologie.....	69
6.3	Considerazioni finali sull'LCIA delle batterie.....	70
7	Le isole italiane minori non interconnesse.....	72
7.1	Ventotene.....	74
7.1.1	Il calcolo del combustibile risparmiato - Ventotene.....	75
7.1.2	La fonte solare sull'isola di Ventotene.....	76
7.1.3	La fonte eolica sull'isola di Ventotene.....	78
7.2	Pantelleria.....	81
7.2.1	Il calcolo del combustibile risparmiato -Pantelleria.....	82
7.2.2	La fonte solare sull'isola di Pantelleria.....	83
7.2.3	La fonte eolica sull'isola di Pantelleria.....	85
8	Scenari di riferimento, LCIA e confronti.....	88
8.1	Ventotene.....	89
8.1.1	Ventotene zero.....	89
8.1.2	Ventotene 1.....	89
8.1.3	Ventotene 2.....	93
8.1.4	Ventotene 3.....	97
8.2	Pantelleria.....	101
8.2.1	Pantelleria 0.....	101
8.2.2	Pantelleria 1.....	102
8.2.3	Pantelleria 2.....	105

# Elenco delle tabelle

Tabella 1: I principi base del processo Agenda 21 .....	13
Tabella 2: Caratteristiche chimiche principali di Sodio e Litio (Brian I. et.al, 2012).....	45
Tabella 3: LCI del pacco batteria per celle agli ioni di sodio .....	49
Tabella 4: LCI BMS per batteria agli ioni di sodio .....	50
Tabella 5: LCI della cella agli ioni di sodio .....	51
Tabella 6: LCI dell'involucro della cella per batteria agli ioni di sodio.....	51
Tabella 7: LCI dell'elettrolita per batterie agli ioni di sodio.....	52
Tabella 8: LCI del sale NaPF6 per batterie agli ioni di sodio .....	53
Tabella 9: LCI del componente DMC per batteria agli ioni di sodio .....	52
Tabella 10: LCI del catodo per batterie agli ioni di sodio .....	54
Tabella 11: LCI NMMT active material per celle agli ioni di sodio .....	55
Tabella 12: LCI del MgOH2 per batteria agli ioni di sodio .....	55
Tabella 13: LCI NiCO3 per batteria agli ioni di sodio .....	56
Tabella 14: LCI anodo per batteria agli ioni di sodio.....	57
Tabella 15: LCI SBR per batteria agli ioni di sodio .....	58
Tabella 16: Peso complessivo dell'accumulatore agli ioni di sodio per accumulo stazionario.....	59
Tabella 17: Percentuali di riciclo dei materiali componenti per accumulatori stazionari.....	61
Tabella 18: Scenario di fine vita per batteria agli ioni di sodio.....	62
Tabella 19: Scenario di smaltimento delle materie plastiche .....	62
Tabella 20: Scenario di smaltimento dell'alluminio .....	63
Tabella 21: Scenario di smaltimento delle componenti metalliche .....	63
Tabella 22: Scenario di smaltimento per componenti elettroniche.....	64
Tabella 23: Scenario di riutilizzo dell'alluminio.....	64
Tabella 24: Scenario di riutilizzo delle plastiche.....	65
Tabella 25: Scenario di riutilizzo dei metalli.....	65
Tabella 26: Situazione attuale isole minori non interconnesse (Fonte: Terna, 2019 - Ispra, 2017) .....	73
Tabella 27: Il triplice obiettivo fissato dal Decreto MiSE.....	73
Tabella 28: Calcolo del combustibile risparmiato per MWh stoccato - Ventotene.....	75
Tabella 29: Calcolo della radiazione solare globale giornaliera media mensile (Rggmm) su superficie orizzontale ENEA-SOLTERM- Ventotene .....	77
Tabella 30: Ipotesi per il dimensionamento degli impianti fotovoltaici .....	78
Tabella 31: Calcolo del combustibile risparmiato per MWh stoccato - Pantelleria .....	83
Tabella 32: Calcolo della radiazione solare globale giornaliera media mensile (Rggmm) su superficie orizzontale ENEA-SOLTERM - Pantelleria .....	84
Tabella 33: Ipotesi per il dimensionamento degli impianti fotovoltaici - Pantelleria.....	85
Tabella 34: Ipotesi sul numero di cicli degli accumulatori.....	88
Tabella 35: Ventotene 0, situazione attuale impianti e produzione esistenti.....	89
Tabella 36: Combustibile consumato (Litri).....	89
Tabella 37: MWh accumulati - Ventotene 1.....	90
Tabella 38: Litri di combustibile risparmiati - Ventotene 1 .....	90
Tabella 39: MWh accumulati - Ventotene 2.....	93
Tabella 40: Litri combustibile fossile risparmiati - Ventotene 2.....	93
Tabella 41: Valutazione dei danni, inventario, FRNP Ventotene 0, 13000 cicli - Ventotene 2, 13000 cicli ..	97
Tabella 42: MWh accumulati nella batteria.....	98
Tabella 43: Combustibile necessario al fabbisogno e combustibile risparmiato.....	98
Tabella 44: Valutazione dei danni per processo FRNP - Ventotene 3, 13000 cicli .....	101
Tabella 45: Diversificazione energetica MWh - Pantelleria.....	102
Tabella 46: Combustibile consumato .....	102
Tabella 47: MWh accumulati - Pantelleria 1.....	102

Tabella 48: Litri di combustibile risparmiato - Pantelleria 1 .....	103
Tabella 49: MWh accumulati per numero di cicli - Pantelleria 2.....	106
Tabella 50: Combustibile necessario al fabbisogno e combustibile risparmiato con SdA.....	106
Tabella 51: Valutazione dei danni per processo FRNP - Pantelleria 2, 13000 cicli.....	111

# Elenco Delle Figure

Figura 1: La metodologia LCA .....	17
Figura 2: Fasi principali dell'analisi LCA proposta da SETAC (SETAC,1990).....	18
Figura 3: Etichette ambientali tipo I (ISPRAambiente, 2015) .....	19
Figura 4: Schematizzazione delle fasi di una analisi LCA (Reteclima,2008) .....	21
Figura 5: Flussi in ingresso e in uscita dall'unità di processo .....	22
Figura 6: Flussi al sistema prodotto LCA.....	23
Figura 7: Fasi dell'LCI .....	25
Figura 8: Schematizzazione degli indicatori di categoria.....	27
Figura 9: Modellazione di Processo in ambiente SimaPro .....	33
Figura 10: Fase di analisi d'inventario in ambiente SimaPro.....	33
Figura 11: Categorie d'impatto e relazioni nel modello ReCiPe2016 (SimaPro.com, 2017) .....	36
Figura 12: Accumulatori elettrochimici power intensive e energy intensive (TERNA,2017) .....	39
Figura 13: Curva d'esempio di Load levelling (Prudentenergy 2012) .....	40
Figura 14: Mappa mondiale delle riserve di litio (Wordpress.com, 2015).....	44
Figura 15: Schema compositivo per batteria agli ioni di sodio (Wikimedia Commons, 2016).....	46
Figura 16: Composizione percentuale in peso di una singola cella Na-ion (Peters, Jens, et al. 2016).....	48
Figura 17: Legenda valutazione dei danni - assemblaggio Na-ion.....	66
Figura 18: Caratterizzazione Na-ion.....	66
Figura 19: Valutazione dei danni - Na-ion .....	67
Figura 20: Valutazione dei danni - Assemblaggio Na-ion, smaltimento + riuso .....	67
Figura 21: Caratterizzazione - Assemblaggio Na-ion, smaltimento + riuso.....	68
Figura 22: Caratterizzazione - Na-ion, scenario di fine vita.....	68
Figura 23: Valutazione dei danni - confronto tra le tecnologie di accumulo .....	69
Figura 24: Caratterizzazione - confronto tra le tecnologie di accumulo.....	70
Figura 25: Diversificazione energetica e fabbisogno sull'isola di Ventotene (Fonte: Legambiente-CNR,2019) .....	74
Figura 26: Area Ventotene, zone protette (RSE, 2020).....	76
Figura 27: Energia giornaliera (media Agosto, 2019) [kWh/m2] .....	76
Figura 28: Velocità media annua del vento a 25 m s.l.t./s.l.m (ATLAEOLICO-RSE, 2020) .....	78
Figura 29: Risorsa eolica Ventotene con aerogeneratore SEI SOL 60 17 60 KW .....	79
Figura 30: Risorsa eolica Ventotene con aerogeneratore NPS 20-18.....	79
Figura 31: Consumi elettrici mensili in ambito residenziale - Pantelleria (Comune di Pantelleria, 2017) ....	81
Figura 32: Diversificazione energetica - Pantelleria .....	82
Figura 33: Aree di interesse naturalistico-ambientali. Pantelleria (RSE, 2020).....	83
Figura 34: Energia giornaliera (media Agosto, 2019) [kWh/m2] - Pantelleria .....	84
Figura 35: Velocità media annua del vento a 100 m s.l.t./s.l.m - Pantelleria (ATLAEOLICO-RSE, 2020)...	86
Figura 36: Risorsa eolica per aerogeneratore WES 30 250 kW WIND ENERGY SOLUTION - Pantelleria	86
Figura 37: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 3000 cicli .....	90
Figura 38: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 3000 cicli - esclusione del lungo termine.....	91
Figura 39: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 5000 cicli .....	92
Figura 40: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 13000 cicli .....	92
Figura 41: Valutazione dei danni - Ventotene 2, 3000 cicli .....	94
Figura 42: Valutazione dei danni per singolo indicatore - Human Health- Ventotene 2 LPF, 3000 cicli.....	94
Figura 43: Valutazione dei danni - Ventotene 2, 5000 cicli .....	95
Figura 44: Valutazione dei danni - Ventotene 2, 13000 cicli .....	96
Figura 45: Valutazione dei danni - Ventotene 3, 3000 cicli .....	98
Figura 46: Valutazione dei danni - Ventotene 3, 5000 cicli .....	99
Figura 47: Valutazione dei danni - Ventotene 3, 13000 cicli .....	100
Figura 48: Valutazione dei danni - Pantelleria 1, 3000 cicli .....	103



Figura 49: Valutazione dei danni - Pantelleria 1, 5000 cicli .....	104
Figura 50: Valutazione dei danni - Pantelleria 1, 13000 cicli .....	104
Figura 51: Valutazione dei danni - Pantelleria 2, 3000 cicli .....	106
Figura 52: Valutazione dei danni - Pantelleria 2, 5000 cicli .....	107
Figura 53: Caratterizzazione - Pantelleria 2, 5000 cicli A.....	108
Figura 54: Caratterizzazione - Pantelleria 2, 5000 cicli B.....	109
Figura 55: Mineral Resource Scarcity - Pantelleria 2, 5000 LPF.....	110
Figura 56: Mineral Resource Scarcity - Pantelleria 2, 5000 Na-ion.....	110
Figura 57: Valutazione dei danni - Pantelleria 2, 13000 cicli .....	111

# Introduzione

L'efficienza energetica e la sostenibilità degli impianti stanno ottenendo sempre più importanza in ambito ingegneristico, ma anche sociale, culturale ed economico. Con l'obiettivo di valutare la convenienza ambientale dei sistemi e dei prodotti, l'analisi LCA è ritenuta oggi il più valido strumento che riesce a fornire risultati oggettivi e di rilevanza scientifica in relazione agli obiettivi iniziali.

Quest'elaborato si propone di valutare la convenienza ambientale dell'integrazione di sistemi di accumulo stazionario con impianti per la produzione di potenza e fonti rinnovabili mediante la metodologia descritta dalla normativa UNI EN ISO 14040, Life Cycle Assessment. I sistemi per l'accumulo stazionario si sono rivelati negli ultimi tempi un valido meccanismo per la regolazione delle reti, per il supporto alla frequenza, e per la gestione dei picchi di domanda e offerta. Questi sistemi sono utilizzati nei più disparati ambiti, ma l'accoppiamento alle fonti rinnovabili sta facendo emergere le elevate potenzialità associate ad essi. L'aleatorietà intrinseca nella generazione da fonti rinnovabili viene gestita tramite il sistema di accumulo elettrochimico che riesce a separare nel tempo, nello spazio e nella forma, la generazione elettrica. L'integrazione dei sistemi di accumulo alla generazione distribuita si è dimostrata capace di fornire miglie nelle prestazioni delle reti, nei costi associati alla produzione energetica, ma soprattutto nella sostenibilità ambientale della produzione energetica finale. Le problematiche associate ai sistemi SdA riguardano l'utilizzo di metalli pesanti e componenti chimiche impattanti che pongono gli storage al centro di dibattiti sulla pericolosità ambientale. L'R&D si sta dedicando al potenziamento dei sistemi attuali e allo sviluppo di nuove tecnologie che prevedono l'utilizzo di sostanze altamente disponibili e poco inquinanti. Le batterie agli ioni di sodio sono una tecnologia nuova, non ancora matura, ma una volta implementate consentirebbero di svincolarsi dagli attuali elevati costi associati ai sistemi di accumulo e dalla disponibilità associata a materie prime come il litio.

L'analisi LCA, in oggetto in questa tesi, prevede la valutazione degli impatti associati a quattro tipologie di accumulatori, che verranno tra loro confrontati e successivamente valutati all'interno di diversi scenari energetici ipotizzati per due isole italiane, Ventotene e Pantelleria. Gli scenari verranno ampiamente descritti e discussi presentando le situazioni energetiche attuali in queste due isole minori non interconnesse. Per Ventotene e Pantelleria la generazione elettrica avviene ad opera di centrali a gasolio gestite da società private. Le due isole non sono connesse al sistema elettrico nazionale e i costi associati alla produzione elettrica risultano ben sei volte maggiori rispetto al costo medio italiano; ciò è dovuto ai frequentissimi picchi a cui le centrali devono far fronte e inoltre l'elevatissimo potenziale eolico e fotovoltaico in queste isole risulta non sfruttato con quote di generazione FRNP inferiori al 5%. Si è quindi ritenuto che il sistema di accumulo in località che presentano equilibri energetici così delicati, possa fornire un notevole supporto alla rete delle isole e possa fortemente contribuire al sostegno nello sviluppo delle FRNP.

La valutazione delle disponibilità delle diverse fonti e l'introduzione di relative quote di energie rinnovabili consentiranno, nei diversi scenari, di ridurre l'utilizzo della centrale termoelettrica e quindi di risparmiare ingenti quantità di combustibile.

L'analisi del ciclo di vita proposta analizzerà tutti i componenti citati, tenendo conto della vita utile degli accumulatori sulla base del loro numero di cicli, del tipo di tecnologia SdA utilizzata, delle quote di FRNP aggiunte e delle quantità di combustibile da fonte fossile risparmiato. La soluzione proposta avrà come riferimento la soluzione energetica attuale sull'isola, verrà quindi valutata la convenienza ambientale e le voci di impatto principali relative all'unità funzionale di 1MWh stoccato nell'accumulatore.

# 1 Sostenibilità

Le valutazioni associate all'impatto delle attività umane sull'ambiente hanno portato in tempi recenti, ad un certo grado di conoscenza delle problematiche associate. Le alterazioni ambientali inevitabili e spesso irreversibili di queste attività generano situazioni di cambiamento che portano a modifiche sostanziali del sistema ambientale; è inoltre ben noto che la scarsità delle risorse genererà esaurimenti delle stesse con conseguenti sostanziali modifiche alle attività, ai processi, ma anche agli stessi ecosistemi.

L'immissione nell'ambiente di sostanze chimiche, dà luogo, infatti, a mutazioni negli elementi che compongono la nostra atmosfera; queste sostanze chimiche possono essere di tipo primario oppure secondario in base al tipo di alterazione che generano. Le modificazioni che si verificano tra sistemi di conversione, energia e ambiente, possono essere classificate come emissioni di materia, energia oppure altre interazioni quali: occupazione del suolo ed impatto visivo.

Nello studio dell'impatto di un qualsivoglia prodotto, deve essere valutato l'impatto per la sua costruzione, per il suo funzionamento ed infine la fase di 'decommissioning', smantellamento e riutilizzo dei materiali. Questa tipologia di valutazione ha portato alla definizione dell'analisi LCA. Per la metodologia e la definizione del concetto di sostenibilità è indispensabile chiarire i significati di impatto ambientale, inquinamento ed emissioni. Questi tre termini associati all'ingegneria dei processi e delle attività costituiscono i pilastri della valutazione ambientale.

La definizione di impatto ambientale recita:

*“L'Impatto ambientale è l'alterazione qualitativa e/o quantitativa, diretta ed indiretta, a breve e a lungo termine, permanente e temporanea, singola e cumulativa, positiva e negativa dell'ambiente, inteso come sistema di relazioni fra i fattori antropici, naturalistici, chimico-fisici, climatici, paesaggistici, architettonici, culturali, agricoli ed economici, in conseguenza dell'attuazione sul territorio di piani o programmi o di progetti nelle diverse fasi della loro realizzazione, gestione e dismissione, nonché di eventuali malfunzionamenti.” (1) [art. 5, punto c) del D.lgs. 152/2006]*

L'inquinamento invece:

*“Alterazione o contaminazione di un qualsiasi materiale o ambiente ad opera di agenti inorganici od organici (scarichi, rifiuti, ecc.) o di batteri, derivanti dalle varie attività umane, produttive o stanziali: i. ambientale; i. atmosferico; i. delle acque, del suolo; i. acustico.” (1)*

Ed infine le emissioni vengono definite come:

*“Per emissioni si intende qualsiasi sostanza solida, liquida e gassosa introdotta nell'atmosfera da fonti puntiformi o diffuse dell'impianti, opere o infrastrutture” (1)*

## 1.1 L'evoluzione della Sostenibilità

I primi studi e ricerche effettuate in materia ambientale che risalgono alle esplorazioni del biologo Von Humboldt (1769-1859), riuscirono a scardinare quelle che erano le visioni del tempo in materia ambientale, e così pure le leggi e i pilastri che regolavano e governavano il rapporto tra genere umano e sistemi naturali. Grazie agli studi di Von Humboldt si generò, al tempo, una diversa consapevolezza negli studiosi che portò alle successive e ben più note teorie evoluzionistiche.

Charles Darwin (1809-1882) tramite la sua *“Sull'origine delle specie per mezzo della selezione naturale”*, dimostrò la correlazione esistente tra le specie viventi e l'ambiente per la contestualità della sopravvivenza del genere umano sul pianeta terra. Secondo Darwin tutto è basato sulla teoria evolutiva secondo la quale vige la selezione naturale.

Il termine *‘Ecologia’* fu introdotto per la prima volta dallo zoologo, filosofo e biologo Ernst Haeckel (1834-1919), la cui traduzione letterale fu data come *“Studio dell'ambiente”*, mise in relazione gli organismi viventi

e l'ambiente. La diffusione di questi nuovi studi permise di approfondire tali relazioni non più solo dal punto di vista empirico, ma in modo più approfondito e pratico.

Grazie alla pubblicazione di Perkins Marsh (1801-1882) su *“Man and Nature”* 1864 vennero denunciate le alterazioni ambientali generate dall'attività umana, egli fu infatti considerato il primo ambientalista della storia.

La parola *Ecosistema* fu invece coniata da Arthur George Tansley (1871-1955) nel 1935. L'ecosistema viene definito come: ‘costituito dall'intero complesso di organismi e dagli ambienti fisici che essi abitano’.

*” L'ecosistema è pertanto assimilabile a un sistema aperto, lontano dall'equilibrio, nel quale accadono cambiamenti irreversibili che ne determinano l'evoluzione e dove ogni trasformazione avviene lungo percorsi sempre diversi ed estremamente complessi.”* (2)

Successivamente vennero fondate le prime associazioni di categoria: scienziati, ricercatori, appassionati e giornalisti, che si occupavano di tematiche prevalentemente ambientali e di denuncia delle alterazioni causate dalle attività umane.

Nacquero numerose associazioni, tra le più importanti: il BES (British Ecological Society) fondata 1913.

Fu proprio grazie a questi enti che nella metà del XX secolo divenne di fondamentale importanza lo studio delle tematiche ambientali. In America vennero fondate società simili come la Ecological Society of America, fondata da Henry Chandler Cowles nel 1915, che è oggi presente in oltre 90 stati nel mondo.

Furono proprio queste avveniristiche società a fornire dopo il '50 i primi report e studi sulle alterazioni ai danni dell'ambiente prodotti dall'epoca industriale.

La pubblicazione del 1972 da parte del MIT, su richiesta del club Roma, fondato dall'italiano Aurelio Peccei, manager del gruppo FIAT (1908-1984), pose per la prima volta la tematica ambientale in relazione alla crescita economica e divenne così di dibattito internazionale. La denuncia presentata nel documento *‘The limits of Growth’* mise in dubbio quella che fino ad allora era stata considerata come ‘l'infinita’ crescita economica, ponendola in relazione con la scarsità delle risorse esistenti sul pianeta.

Con la conferenza delle Nazioni Unite del 1972 a Stoccolma venne realizzata la cooperazione internazionale in tema di politiche e strategie per l'ambiente. Venne introdotto in quell'occasione il termine *‘Eco-sviluppo’* ovvero, “strategia di sviluppo fondato sull'utilizzo giudizioso delle risorse locali”.

Nell'anno 1973 ci fu una profonda crisi energetica che contribuì all'incremento degli studi in ambito di energie alternative, e proprio la crisi alimentò la necessità di un organismo superiore che potesse vigilare e fornire risposte; venne istituita la Commissione Mondiale sull'ambiente e sullo sviluppo. Il più celebre risultato della commissione, ottenuto sotto la guida di Gro Harlem Brundtland fu la pubblicazione di *“Our common future”* nel 1978. Il documento asserisce al concetto di sviluppo sostenibile così definito: «lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri».

Inoltre, viene riconsiderato il rapporto tra benessere e qualità ambientale:

*“Ambiente e sviluppo non sono realtà separate, ma al contrario presentano una stretta connessione. Lo sviluppo non può infatti sussistere se le risorse ambientali sono in via di deterioramento, così come l'ambiente non può essere protetto se la crescita non considera l'importanza anche economica del fattore ambientale. Si tratta, in breve, di problemi reciprocamente legati in un complesso sistema di causa ed effetto, che non possono essere affrontati separatamente, da singole istituzioni e con politiche frammentarie. Un mondo in cui la povertà sia endemica sarà sempre esposto a catastrofi ecologiche d'altro genere. [...] L'umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che esso soddisfi i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la possibilità di soddisfacimento dei bisogni di quelle future. [...] Il concetto di sviluppo sostenibile implica per le politiche ambientali e di sviluppo alcuni obiettivi cruciali, e in particolare che:*

- *si rianimi la crescita economica;*
- *si muti la qualità della crescita economica;*
- *si soddisfino i bisogni essenziali in termini di posti di lavoro, generi alimentari, energia, acqua e igiene;*

- *si assicurino un livello demografico sostenibile;*
- *si conservino e si incrementino la base delle risorse;*
- *si riorientino i rischi tecnologici e gestionali;*
- *si tenga conto, nella formulazione delle decisioni, degli aspetti ambientali ed economici*

*[...] In molte parti del mondo la popolazione sta crescendo a ritmi non sostenibili con le risorse ambientali disponibili. Il problema non riguarda solo il numero di individui, ma anche la correlazione tra questo e le risorse disponibili. [...] Le specie animali e vegetali della Terra sono minacciate, ma si è ancora in tempo per bloccare tale processo. La diversità delle specie è indispensabile per il normale funzionamento degli ecosistemi e della biosfera nella sua totalità. [...] I governi sono in grado di bloccare la distruzione di foreste tropicali e degli altri serbatoi di diversità biologica, pur sfruttandoli economicamente. Un indirizzo energetico sicuro è cruciale ai fini di uno sviluppo sostenibile; [...] Per portare i consumi energetici dei paesi in via di sviluppo al livello di quelli industrializzati, l'attuale uso globale di energia dovrebbe quintuplicarsi entro il 2025. Ma l'ecosistema planetario non è in grado di sopportare questo salto, tanto più se si dovesse fare ricorso a combustibili fossili non rinnovabili. I dispositivi moderni devono essere riprogettati per fornire gli stessi quantitativi di energia, addirittura consumando i due terzi o la metà dell'energia primaria necessaria oggi al funzionamento delle attrezzature tradizionali. La produzione di energia nucleare è giustificabile solo a patto che si diano valide soluzioni ai problemi irrisolti ai quali essa ha dato origine. La struttura energetica globale del XXI secolo sarà basata su "soluzioni a basso consumo energetico", fondate sulle risorse rinnovabili. [...] L'umanità è sempre andata avanti grazie alla sua ingegnosità tecnica e alla sua capacità di azione coordinata. Anche per garantire lo sviluppo e il progresso ambientale si è fatto spesso ricorso, e con successo, a questa qualità: per esempio, per controllare l'inquinamento atmosferico e idrico e per aumentare l'efficienza nell'uso delle risorse materiali e dell'energia. [...] Rispetto al 1950 il mondo oggi produce una quantità di beni sette volte maggiore. Molti bisogni umani essenziali possono essere soddisfatti solo mediante beni e servizi forniti dall'industria, e la transizione verso uno sviluppo sostenibile deve essere alimentata da un continuo flusso di ricchezza prodotto dall'industria. [...] Lungi dal richiedere l'arresto della crescita economica, lo sviluppo sostenibile muove dal riconoscimento che i problemi della povertà e del sottosviluppo non possono trovare soluzione se non si avrà una nuova era di crescita in cui i paesi in via di sviluppo abbiano larga parte e da cui ricavino cospicui benefici [...]».* (3)

L'ultima parte del documento, qui sotto riportata, sancisce la relazione tra il sistema economico di ogni paese e il necessario impegno per la tutela ambientale. I due punti devono entrambi essere valutati nelle seguenti categorie:

*“Le proposte di cambiamenti nelle istituzioni e nelle leggi a livello nazionale, regionale e internazionale dovranno riguardare sei settori primari:*

- *occuparsi delle fonti;*
- *affrontare gli effetti;*
- *valutare i rischi globali;*
- *compiere scelte in base a precise informazioni;*
- *fornire i mezzi legali;*
- *investire nel futuro di noi tutti*

*. [...]”* (3)

Nel medesimo anno della pubblicazione “Our Common Future”, inizia il suo operato l'IGBP, International Geosphere-Biosphere Programme, con l'attenzione rivolta ai cambiamenti climatici e alla tutela del pianeta.

Gli studi del IGBP nel 2002 hanno definito le quantità rimanenti di risorse esistenti e sfruttabili sul pianeta, sancendo le quote consumate e gli anni residui prima dell'estinzione delle risorse.

Nel 1992 si tenne a Rio de Janeiro la conferenza sull'ambiente e sullo sviluppo delle Nazioni Unite dove venne proclamata la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change da cui l'acronimo UNFCCC).

Il trattato si riferiva principalmente al riscaldamento globale che si verificò in quegli anni e associava all'incremento di temperatura, l'inquinamento prodotto sotto forma di emissioni di gas ad effetto serra.

Il trattato entrò in vigore nel marzo del 1994 e da allora i paesi sottoscrittori si incontrano annualmente alla conferenza delle parti COP.

Con l'Agenda 21 " *cose da fare nel ventunesimo secolo* " veniva messo in atto, al summit di Rio, quello che sarebbe stato poi considerato dai posteri il 'manuale dello sviluppo sostenibile'.

Essa contiene infatti un'articolata pianificazione dei passi necessari, a livello globale, ma anche nazionale e locale, che devono essere compiuti dalle Nazioni Unite, politicamente ed economicamente per ridurre l'impatto dell'attività umana sull'ambiente. (4)

I principi contenuti nel programma del Summit (Rio de Janeiro) possono essere così riassunti:

Tabella 1: I principi base del processo Agenda 21

SOSTENIBILITÀ	
Principi decisionali democratici	Principi di gestione ambientale
Democrazia	Prevenzione
Sussidiarietà	Precauzione
Responsabilità	Chi inquina paga
Trasparenza	Cooperazione
Partecipazione pubblica	Agire all'interno dell'ecosistema

Le conferenze delle parti che si susseguirono negli anni successivi mostrarono come la disparità di progresso tra i vari paesi e il loro grado demografico aumentavano il divario tra la tutela dell'ambiente e il suo sfruttamento.

Tramite la fusione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e il programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP), venne organizzata nel 1988 L'International Panel on Climate Change (*gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico IPCC*).

L'IPCC rappresenta l'organo di riferimento a livello mondiale per quanto riguarda ambiente, clima e sostenibilità. Le valutazioni del IPCC vengono fornite ai diversi paesi con periodicità e fanno riferimento ai trattati del UNFCCC e al protocollo di Kyoto.

Nel 2004 James Lovelock, sostenne che '*L'ipotesi Gaia*', secondo cui la biosfera è autoregolata e in grado di sostenere la vita sul pianeta, era stata compromessa, erano venuti a mancare gli equilibri di auto sostenimento della biosfera per causa umana. Secondo Lovelock '*Gaia*', sarebbe dunque stata costretta a mettere in atto una serie di meccanismi che avrebbero portato all'estinzione della vita sul pianeta terra nel giro di alcuni decenni. Con la conferenza di Kyoto del 1997, conferenza delle parti COP3, oltre centosessanta rappresentati per le varie istituzioni di tutti i diversi paesi parteciparono alla redazione del protocollo che stabiliva gli obiettivi da raggiungere per il contenimento delle emissioni di gas serra. Il protocollo di Kyoto è l'unico documento che prevede il vincolo della riduzione delle emissioni per i paesi sottoscrittori dell'accordo.

Venivano assegnati obiettivi differenti ai diversi paesi, basati sul loro grado di consumo di risorse, produzione industriale e crescita demografica.

Il ritardo all'entrata in vigore del trattato, che avvenne il 16 febbraio 2005, fu dovuto alla necessaria sottoscrizione di almeno 55 paesi, che complessivamente emettono il 55% delle emissioni globali.

La condizione venne raggiunta nel 2004 grazie alla rettifica della Russia, mentre Stati Uniti e Cina non sottoscrissero il protocollo.

*Per raggiungere questi obiettivi, il Protocollo propone una serie di mezzi di azione:*

- *rafforzare o istituire politiche nazionali di riduzione delle emissioni (miglioramento dell'efficienza energetica, promozione di forme di agricoltura sostenibili, sviluppo di fonti di energia rinnovabili, ecc.);*
- *cooperare con le altre parti contraenti (scambi di esperienze o di informazioni, coordinamento delle politiche nazionali attraverso i diritti di emissione, l'attuazione congiunta e il meccanismo di sviluppo pulito). (5)*

Nella così detta 'fase I', l'obiettivo imposto era la riduzione del 5% rispetto ai livelli del 1990 di gas serra tra il 2008-2012. L'Italia attestò la sua riduzione al 4.6% rispetto all'obiettivo dell'8% assegnatole. (6)

## **1.2 Dal protocollo di Kyoto ad oggi**

Alla conferenza della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite tenutasi a Doha nel 2012 venne emanato un nuovo emendamento che pose in essere il trattato di Kyoto fino al 2020. La riduzione delle emissioni di gas serra venne fissata al 18% rispetto ai livelli del 1990 ma nonostante i 37 paesi promotori, non entrò mai in vigore; la sottoscrizione ad oggi è stata effettuata solamente da 95 paesi, sui 144 necessari per la messa in atto del documento.

Nel 2010 l'Europa promosse la propria soluzione in materia di ambiente e sostenibilità, come naturale conseguenza alla scadenza del trattato di Kyoto del 2012. Il piano 20-20-20 prevede diversi obiettivi che vengono sintetizzati in 5 categorie:

- Ambito d'occupazione
- Ricerca e sviluppo
- Cambiamenti climatici
- Sostenibilità energetica
- Istruzione e lotta contro la povertà e l'emarginazione

Vengono sanciti tre obiettivi in ambito ambientale:

1. riduzione delle emissioni di gas serra del 20% (o persino del 30%, se le condizioni lo permettono) rispetto al 1990;
2. calo del 20% del fabbisogno di energia ricavato da fonti rinnovabili;
3. aumento del 20% dell'efficienza energetica. Gli obiettivi racchiudono non solo la materia ambientale, ma coniugano sostenibilità con ambiti sociali ed economici strettamente collegati. (7)

Nello specifico viene qui riportato il quadro schematico di misure contenute nel pacchetto clima energia, in quanto fortemente collegate con questo lavoro di tesi:

*1) Revisione del Sistema EU-ETS (European Union Emission Trading Scheme) cioè il sistema che prevede lo scambio delle quote delle emissioni di gas serra, con un'estensione dello scambio di quote di emissione in modo tale da ridurre le emissioni stesse.*

*2) Promozione del sistema "Effort sharing extra EU-ETS", cioè la ripartizione degli sforzi per ridurre le emissioni: è un sistema pensato per i settori che non rientrano*

*nel sistema di scambio delle quote (come edilizia, agricoltura, trasporti eccetto quello aereo) per cui ai singoli stati membri viene assegnato un obiettivo di riduzione di emissioni (per l'Italia il 13%).*

*3) Promozione del meccanismo del Carbon Capture and Storage - CCS (Cattura e stoccaggio geologico del carbonio): una delle possibili modalità della riduzione della CO<sub>2</sub> in atmosfera è il suo stoccaggio in serbatoi geologici. Tale modalità rientra nel mix di strategie disponibili tramite l'istituzione di uno specifico quadro giuridico.*

*4) Energia da fonti rinnovabili: l'obiettivo è di produrre tramite queste fonti il 20 % di energia nella copertura dei consumi finali (usi elettrici, termici e per il trasporto). Per raggiungere questa quota, sono definiti obiettivi nazionali vincolanti (17% per l'Italia): nel settore trasporti in particolare almeno il 10% dell'energia utilizzata dovrà provenire da fonti rinnovabili.*

*5) Nuovi limiti di emissione di CO<sub>2</sub> per le auto: già dall'anno 2011 il limite di emissioni per le auto nuove venne stabilito in 130 g CO<sub>2</sub>/km, mentre entro il 2020 il livello medio delle emissioni per il nuovo parco macchine dovrà essere di 95 gr. CO<sub>2</sub>/km.*

*6) Miglioramento dei combustibili: verranno introdotte nuove restrizioni (legate a salute e ambiente) sui gas serra prodotti dai combustibili. Durante l'intero ciclo di vita della loro produzione i gas serra dovranno essere ridotti del 6%. (7) (ReteClima,2016)*

Al punto 4 e al punto 6 sono presentati alcuni obiettivi che vengono considerati all'interno di questo lavoro, l'incremento delle fonti rinnovabili delle isole prese in considerazione nei diversi scenari analizzati è uno tra i punti chiave investigati; verrà proposta l'integrazione di quote, anche consistenti di FRNP con l'obiettivo di incrementare la percentuale di soddisfazione del fabbisogno energetico delle località analizzate. L'integrazione delle fonti rinnovabili con i sistemi di accumulo elettrochimico ha come obiettivo la riduzione dell'utilizzo delle attuali centrali termoelettriche alimentate da fonti fossili e in secondo luogo la stabilizzazione delle reti e il miglioramento della qualità energetica che consentono i sistemi SdA. L'obiettivo finale dell'elaborato è la valutazione degli impatti associati all'introduzione congiunta di questi sistemi.

Si continua ora con la descrizione dei progressi avvenuti nel corso degli anni in materia energetica. Nel corso della COP di Parigi del 2015, 195 paesi hanno sottoscritto il primo accordo universale vincolante sul clima. Nel trattato si ritiene indispensabile la riduzione della media della temperatura mondiale al disotto di due gradi rispetto ai livelli preindustriali. Viene fissata la soglia di 1.5 gradi come obiettivo da mantenere a lungo termine. Al momento l'accordo è in vigore, sottoscritto da 170 paesi.

Durante la COP24 svoltasi a Katowice nel 2018, in Polonia, sono state ridefinite le regole di attuazione dell'accordo di Parigi. L'obiettivo fu quello di definire un 'Rule Book' con gli elementi tecnici necessari a mettere in piena esecuzione le normative introdotte a Parigi. Vennero considerati principalmente quattro punti: la mitigazione delle regole ed informazioni per quantificare gli impegni dei singoli paesi, l'adattamento alla preparazione, la trasparenza sul monitoraggio, rendicontazione e verifica, il 'Globalstocktake', ovvero il 'possibile innalzamento dell'ambizione', implementazione e compliance.

Il dialogo facilitativo 'TALANOA' ha evidenziato i risultati raggiunti dai vari paesi fino ad ora, i passi futuri e le azioni disponibili per incrementare l'ambizione in campo climatico, il tutto volto alla presentazione dei contributi volontari nazionali (NDC) entro la fine del 2020.

Ed infine la COP25 di Madrid del 2019, amaramente conclusasi con 'un nulla di fatto', i numerosi tentativi di dialogo e trattative sul mercato del carbonio sono state posticipate al prossimo anno.

Proprio questo punto, riguardante l'articolo 6 del trattato di Parigi, cioè quello che regola il finanziamento delle riduzioni di emissioni sul mercato del carbonio, è stato messo più volte in discussione da paesi come Brasile, Australia, Arabia Saudita oltre che dagli Stati Uniti che si sono ritirati dalla rettifica dell'accordo. L'insieme delle discussioni e dei punti sollevati ha fatto sì che non si giungesse ad un definitivo accordo.



*“All’interno delle sale della Cop25 i paesi sembrano aver dimenticato l’urgenza della crisi climatica poiché non sono riusciti a prendere le misure necessarie per sollevare l’ambizione di una maggiore azione per il clima. La crisi climatica è una crisi dei diritti umani. La mancata azione urgente e la mancata collocazione dei diritti umani al centro dell’azione per il clima, verranno misurata in termini di mezzi di sussistenza, violazioni dei diritti umani e vite umane”, (8) (Erika Lennon, Ciel).*

Le conclusioni potranno essere effettuate il prossimo anno alla COP26 prevista a Glasgow, in Scozia, in cui l’articolo 6 risulterà nuovamente il centro del fronte di dibattito tra i diversi paesi.

## 2 L'analisi LCA

Con l'affermarsi del concetto di sostenibilità inteso come l'insieme di sviluppo economico, ambientale e sociale, si afferma la nuova metodologia Life Cycle Assessment. L'innovazione e la portata di questa nuova tipologia di studio dei processi, che rispetto ai precedenti non considera più solamente il prodotto, ma tutte le operazioni e processi ad esso associati, diventa il principale strumento operativo utilizzato a livello ingegneristico di progettazione per valutare gli impatti ambientali e l'incidenza di un processo sull'ambiente e il territorio. L'LCA consente uno studio completo di tutte le fasi associate ad un processo o attività.

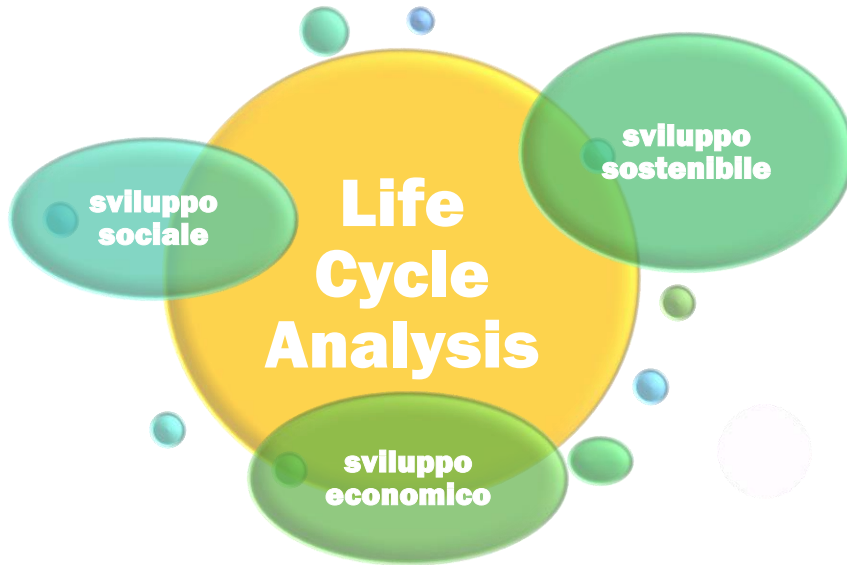


Figura 1: La metodologia LCA

### 2.1 La metodologia LCA

L'analisi LCA è una metodologia standardizzata, definita da normative, che consente la valutazione e la quantificazione degli impatti e dei danni ambientali correlati allo sviluppo di un prodotto, di una procedura, di un bene o servizio, categorizzato in uno specifico contesto definito in precedenza. L'analisi viene definita 'integrale' e sono presi in esame tutti i processi e le procedure necessarie alla realizzazione, allo sviluppo, all'utilizzo e alla fase di fine vita dell'attività.

La valutazione delle problematiche ambientali connesse allo sviluppo di un prodotto tramite l'analisi del suo ciclo di vita inizia a partire dagli anni 60 con la definizione dell' *'Environmental life Cycle thinking'*; questa nuova corrente portò ricercatori e scienziati allo studio degli impatti di un processo produttivo con lo scopo di definire il consumo di risorse primarie e valutare la produzione degli scarti e dei rifiuti di processo cercando di definire normative quanto più possibile oggettive, in modo tale da consentirne l'applicabilità a tutte le attività. L'obiettivo è la valutazione dell'intero processo tramite flussi associati ai diversi input e output facenti riferimento al sistema prodotto che comprende, i materiali, le energie e le varie operazioni connesse.

Il termine LCA (*Life Cycle Assessment*) fu definito per la prima volta durante il congresso SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) del 1990 svoltosi a Smuggler Notch (Vermont, U.S.A.).



Figura 2: Fasi principali dell'analisi LCA proposta da SETAC (SETAC, 1990)

La messa a punto della metodologia si ebbe nel 1997 grazie alla normativa DIN/ISO 14040 che definisce l'analisi in questo modo:

*“è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'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, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”.*

La fondamentale innovazione che portava la definizione di questo tipo di analisi stava nel fatto che veniva proposto un metodo innovativo di approccio ai sistemi industriali, non più quello tradizionale che studiava separatamente le singole fasi degli elementi, ma una visione globale dell'intero processo produttivo. Lo studio consente la quantificazione degli impatti sull'ambiente ma anche sulla salute umana ed altri indici dell'intero sistema prodotto.

La normativa che sancisce la definizione dell'Lca pone l'attenzione su diversi punti principali:

- **Oggettività:** un'analisi di tipo oggettivo consente di svincolare il processo o l'attività dal produttore e di porla in un sistema in cui è possibile la valutazione, il confronto e l'osservazione delle diverse categorie di input e output partecipanti al processo o attività. I dati sono confrontabili, verificabili e scientificamente validi.
- **Input e output:** la valutazione è compiuta tramite l'individuazione dei carichi energetici e ambientali imputabili al prodotto o servizio finale.
- **Intero ciclo di vita:** viene valutato l'intero ciclo di vita o attività dall'acquisizione della materia prima, al ciclo produttivo, all'uso e allo smaltimento finale.

L'interesse rivolto a questa nuova disciplina ingegneristica ha consentito negli anni una struttura ben definita e un approccio consolidato, i modelli attuali dell'LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) sono tuttora in aggiornamento come i database e lo sviluppo di vari aggiornamenti.

## 2.2 Applicabilità del LCA

La metodologia consente l'indirizzamento alle più differenti categorie di stakeholders, che vanno dall'industria alle imprese commerciali, governi locali o nazionali, associazioni di diversi tipi e consumatori.

L'Lca sancisce i punti critici di un prodotto o processo nei diversi stati del suo ciclo di vita; valuta la possibilità di miglioramento del processo in esame tramite l'individuazione delle categorie maggiormente impattanti e la loro successiva modifica volta all'ottimizzazione; può fornire supporto e decisione in caso di utilizzo per la pianificazione strategica industriale e della pubblica amministrazione. Infatti, è possibile usare l'analisi per la definizione delle etichettature Eco o le dichiarazioni di tipo ambientale. (*dichiarazione ambientale EMAS, etc.*)

È un validissimo sistema di confronto e paragona prodotti con la stessa funzione, per aiutare nella visione complessiva e nello sviluppo di nuovi prodotti.

Negli anni lo sviluppo della metodologia Lca è stata associata a nuovi processi come: la progettazione eco sostenibile, l'ecodesign, lo studio di prodotti ecocompatibili e infine anche nel GPP (*green public procurement*) per l'acquisto di prodotti verdi a ridotto impatto ambientale e paesaggistico, con l'obiettivo di dare supporto ad un'economia locale sana e sostenibile; in Italia gli acquisti effettuati da pubblica amministrazione attraverso GPP rappresentano il 17% del prodotto interno lordo (PIL).

Il GPP diventa quindi un validissimo approccio che consente l'incremento del mercato con attenzione ai prodotti 'verdi':

- *«l'inserimento di criteri di preferibilità ambientale nelle procedure di acquisto della Pubblica Amministrazione nell'ambito dell'offerta economicamente più vantaggiosa;*
- *la possibilità di considerare i sistemi di etichettatura ambientale come mezzi di prova per la verifica di requisiti ambientali richiesti;*
- *la possibilità di considerare le certificazioni dei sistemi di gestione ambientale (EMAS - ISO 14001) come mezzi di prova per la verifica delle capacità tecniche dei fornitori per la corretta esecuzione dell'appalto pubblico.*

Tramite la metodologia è possibile la valutazione delle migliori tecnologie disponibili BAT best available technique, anche il nuovo sistema di etichettature eco -label è basato sull'analisi Lca e consente all'azienda di ottenere un marchio ecologico a prodotti ecocompatibili in modo da trarre vantaggio sul mercato mediante un marchio che consenta ai consumatori l'acquisto di prodotti garantiti verdi (*EU eco label, EPD*). Le etichettature ecologiche possono essere sia obbligatorie che volontarie, nel primo caso si riferiscono a salute e sicurezza che interagiscono con l'ambiente, quelle volontarie sono una scelta per l'incentivazione e il coinvolgimento sul mercato. Le etichettature volontarie si differenziano in tre categorie:

- **Etichette ambientali Tipo I ISO 14024:** definite con criteri di eccellenza sviluppati da una parte terza, fissano dei valori soglia da rispettare per ottenere il marchio.
- **Autodichiarazioni ambientali Tipo II ISO 14021:** definite sulla base di autodichiarazioni del produttore, presentano comunque una serie di vincoli e di requisiti sui contenuti.
- **Dichiarazioni Ambientali di Prodotto Tipo III ISO 14025:** dichiarazioni di tipo quantificato, indicano i potenziali impatti ambientali associati al ciclo di vita di un processo. (DAP-Dichiarazione Ambientale Di Prodotto/Environmental Product Declaration-EPD)



Figura 3: Etichette ambientali tipo I (ISPRA ambiente, 2015)

Le dichiarazioni ambientali di prodotto EPD vengono utilizzate per avvantaggiare la divulgazione ambientale tra produttori (business to business), venditori e acquirenti (business to consumers). Sono previste dalla normativa europea UNI EN ISO 14025 e si basano sull'analisi LCA; le EPD sono utilizzabili su tutti i prodotti e servizi e vengono ordinate in gruppi in modo da consentire la confrontabilità tra prodotti e servizi funzionalmente equivalenti. Sono poi approvate da un organismo indipendente che sancisce la loro attendibilità.

Le politiche integrate di prodotto IPP hanno come base l'analisi Lca, tramite l'introduzione di incentivi per prodotti ecologici e l'informazione dei consumatori finali, rientrano nelle strategie comunitarie volte allo sviluppo sostenibile introdotte negli anni duemila. La politica ambientale europea mira infatti ad una maggior sostenibilità tramite il miglioramento delle prestazioni dei prodotti.

L'IPP è stata sviluppata in collaborazione con le aziende, le leggi che lo regolano sono contenute nel testo della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo del 18.6.03 (*COM (2003) 302 definitivo*) (9), che si basa su 5 punti principali:

- *«considerazione del ciclo di vita (life cycle thinking) dei prodotti;*
- *collaborazione con il mercato (introduzione di incentivi per orientare il mercato verso soluzioni più sostenibili: in particolare, incoraggiando la domanda e l'offerta di prodotti più ecologici e premiando le imprese più innovative e impegnate a promuovere lo sviluppo sostenibile);*
- *coinvolgimento delle parti interessate (incoraggiare tutti coloro che entrano in contatto con il prodotto - le industrie, i consumatori e le autorità pubbliche - ad intervenire nell'ambito della propria sfera di influenza, promuovendo la cooperazione tra le varie parti interessate);*
- *miglioramento continuo (ciascun'impresa può stabilire i miglioramenti in relazione al loro rapporto costo - efficacia);*
- *molteplicità degli strumenti di azione (non si tratta di creare nuovi strumenti ma di attivare in modo efficace quelli già esistenti, dagli strumenti volontari a quelli normativi, dagli interventi su scala locale fino alle azioni a livello internazionale)»*

Il sistema comunitario di eco-gestione Eco-Management and Audit Scheme (EMAS) consente ad aziende pubbliche e private di pesare ed elevare la propria efficacia ambientale e garantire agli aventi interesse, rapporti oggettivi in merito alla propria gestione ambientale. L'EMAS punta ad un incremento dell'efficienza dei processi attraverso pratiche di rispetto e tutela ambientale, garantisce affidabilità per le autorità di controllo, ma è indirizzato anche ai cittadini e viene definito come uno *'strumento attraverso il quale è possibile avere informazioni sulle prestazioni ambientali delle organizzazioni'*. (10)

Anche la gestione del fine vita costituisce un valido strumento per la gestione dei flussi di rifiuti aziendali e pubblici.

### **2.3 L'LCA nel settore energetico**

Sebbene l'analisi LCA sia diventato un procedimento consolidato, sono ancora molte le imprese e le pubbliche amministrazioni che non ne fanno uso. Nell'ambito energetico, il confronto tra soluzioni differenti, con il nuovo approccio alle energie rinnovabili e la crescente attenzione volta agli accumulatori, diventa uno strumento fondamentale. L'analisi degli impianti per la produzione di energia elettrica ad oggi esistenti e le nuove proposte di soluzioni possono essere valutate tramite la metodologia per assicurare una valutazione accurata con l'individuazione dei diversi indici di impatto. L'idea del Life Cycle Design (LCD) propone una miglior ricerca nelle performance ambientali dei vari componenti nel loro insieme. Proprio l'LCD basato sull'analisi LCA fornisce dati necessari alla progettazione efficiente, consente di valutare gli impatti associati ai singoli materiali, alle tecniche costruttive e al loro impiego, fino alla valutazione dello smaltimento e del riutilizzo dei materiali coinvolti. L'obiettivo è quello di valutare il sistema impianto, nella sua complessità e comprendere l'utilizzo delle risorse nel processo. Si riesce quindi a comprendere il danno ambientale generato per la produzione di un'unità di energia ad esempio, oppure si possono confrontare due tecnologie simili tra loro.

## 2.4 Le fasi dell'analisi LCA

La normativa di riferimento per l'analisi LCA è la UNI EN ISO 14040, i punti salienti possono essere così riassunti:

- **Attenzione all'intero ciclo di vita;**
- **Priorità all'ambiente:** le ripercussioni del processo/attività sull'economia e in ambito sociale esula dallo studio applicativo dell'LCA;
- **Punto di vista relativo e riferimento all'unità funzionale;**
- **Impostazione di tipo iterativo** all'interno del ciclo e tra le varie fasi: ciò consente conformità e consistenza nei risultati finali;
- **trasparenza:** che consente l'efficacia dei risultati;
- **integrità;**
- **metodo scientifico.**

L'analisi Lca è composta di quattro fasi principali qui elencate, che verranno singolarmente spiegate nei paragrafi successivi:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (Goal and Scope Definition):** consiste nella fase primaria dello studio in cui vengono specificate le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, i requisiti di qualità dei dati, le assunzioni e i limiti, viene considerato il lettore finale;
- Analisi dell'inventario (Life Cycle Inventory Analysis, LCI):** fase in cui vengono raccolti i dati, quantificati gli elementi in input e output relativi al processo/attività in esame;
- Valutazione dell'impatto (Life Cycle Impact Assessment, LCIA):** fase in cui vengono esaminati gli impatti associati ai risultati ottenuti nell'LCI. vengono categorizzati gli impatti e i vari indicatori di categoria;
- Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Interpretation):** fase finale in cui i dati ottenuti vengono organizzati per fornire i risultati coerenti con l'obiettivo prefissato nella fase iniziale dell'analisi, la finalità è quella di giungere a delle conclusioni pesate in grado di spiegare limiti e vantaggi.

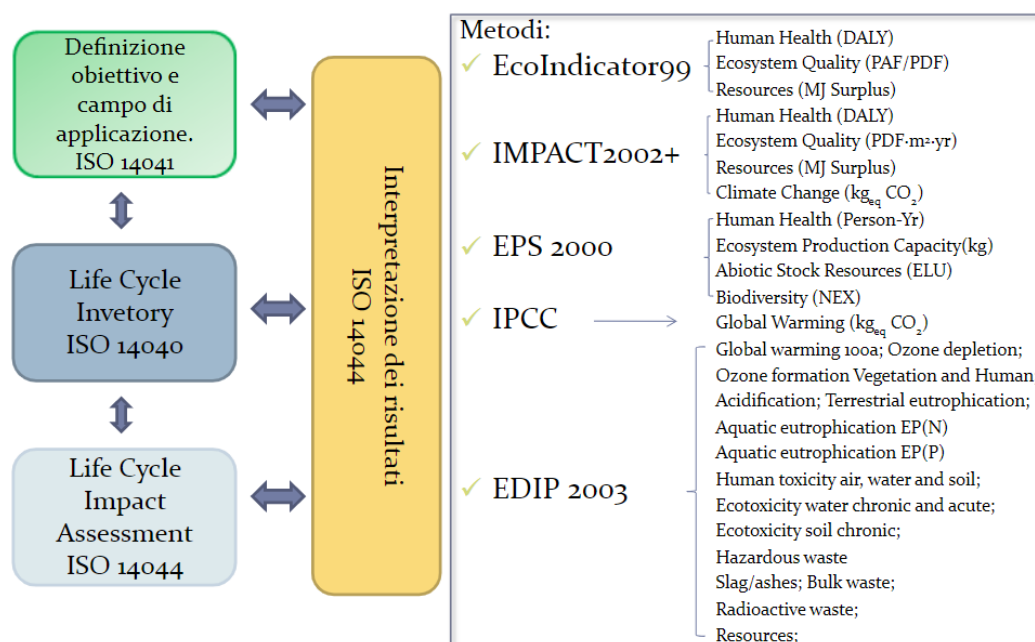


Figura 4: Schematizzazione delle fasi di una analisi LCA (Reteclima,2008)

Esiste anche una procedura semplificata dell'analisi Lca che consente di ridurre il procedimento attraverso degli alleggerimenti sulle ipotesi del sistema analizzato; tuttavia si evince dalla letteratura che tutte le analisi Lca posso essere viste come semplificate, nel momento in cui si fanno determinate ipotesi e vengono stabiliti i procedimenti, si sta già attuando una semplificazione che tralascia parte del sistema realmente indagato. La complessità dell'analisi e quella dei sistemi considerati porta sempre a degli alleggerimenti.

Proprio a causa di questa complessità e gran numerosità di dati investigati è impensabile poter svolgere un'analisi Lca senza l'utilizzo di sistemi informatizzati. Esistono diversi software per lo svolgimento dell'analisi Lca, che si affidano a database capaci di relazionare gli input e gli output con tutte le categorie di prodotti e sottoprodotti. SimaPro, il programma utilizzato per lo svolgimento di questo elaborato, è uno dei software sopracitati più utilizzati al mondo per l'analisi Lca.

## 2.4.1 Definizione degli scopi e degli obiettivi

La prima fase dell'analisi Lca è la più importante, l'obiettivo che viene presentato deve poi essere rispettato per tutta l'analisi. Viene associato allo scopo dello studio l'applicazione prevista, le motivazioni, l'utenza a cui viene rivolta e deve inoltre essere specificato se l'analisi è di tipo comparativo oppure fine e sé stessa. Nel caso di analisi di tipo comparativo deve innanzitutto essere valutata l'equivalenza tra sistemi messi a confronto.

Di conseguenza **la scelta dell'obiettivo** incide sulle ipotesi, le scelte di lavoro, il pubblico, le risorse a disposizione, che possono dar luogo a scenari completamente diversi. È quindi fondamentale la coerenza tra l'obiettivo iniziale e l'analisi successiva.

La definizione del **campo di applicazione** comprende diversi elementi:

- L'intero sistema che fa riferimento allo studio (indicato con i vari processi unitari e iterazioni-Albero)
- L'unità funzionale
- I confini del sistema: criteri di cut-off e regole di allocazione
- L'allocazione
- Le classi d'impatto
- Le tipologie di dati (primari, secondari)
- I limiti del sistema
- Le ipotesi
- Il metodo per l'interpretazione, caratterizzazione e pesatura
- Le limitazioni

È bene considerare che Lca è un metodo basato su una procedura di tipo iterativo, questione per cui i valori, i dati utilizzati e i punti del campo di applicazione possono essere variati in relazione all'obiettivo iniziale dello studio.

L'analisi è basata sulla considerazione delle **'operazioni unitarie'**, ovvero l'elemento più piccolo considerato facente parte del sistema. Ad ogni operazione unitaria vengono associati input e output quantificati tramite dati in ingresso e uscita dai confini del 'piccolo' sistema.

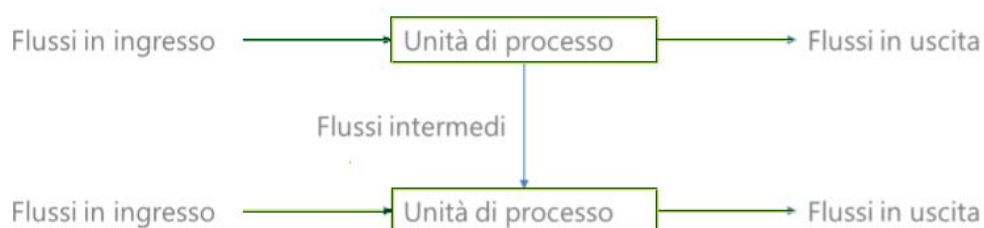


Figura 5: Flussi in ingresso e in uscita dall'unità di processo

Il sistema prodotto è costituito invece dalle singole operazioni unitarie con i propri flussi in ingresso e uscita, Figura 6.

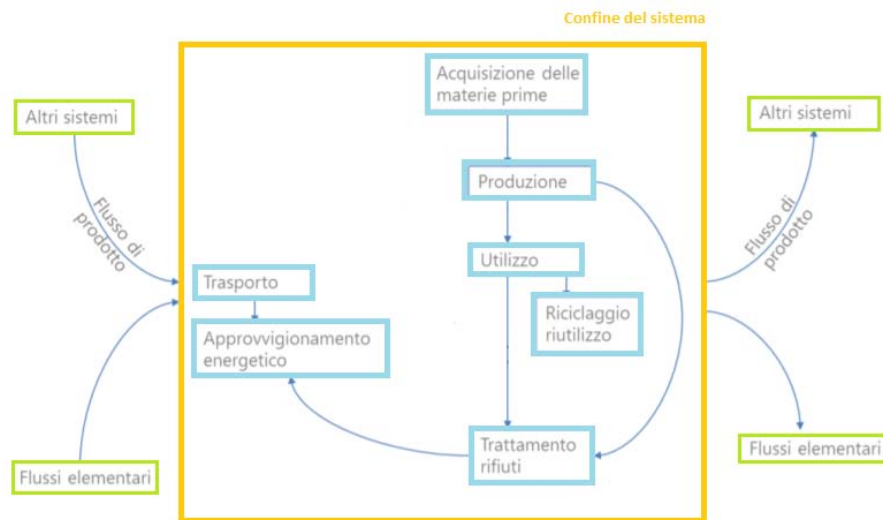


Figura 6: Flussi al sistema prodotto LCA

L'**unità funzionale** è la misura o la quantità di prodotto presa come riferimento per l'analisi, fornisce la quantificazione associata ad una determinata funzione. Tramite l'unità funzionale vengono quantificati gli input e gli output e i risultati della metodologia.

Ad ogni sottoprodotto vengono associati **flussi di riferimento**, ovvero quantità necessarie di prodotto che soddisfano il sistema.

I sistemi vengono poi confrontati sulla base della stessa funzione e calcolati con la stessa unità funzionale, sottoforma di flussi di riferimento (UNI EN ISO 14040).

Altrettanto fondamentale è la definizione dei **confini del sistema**, viene scelto cosa includere e cosa escludere dall'analisi. Il procedimento avviene tramite la definizione di un diagramma di flusso che indica i prodotti, coprodotti e sottoprodotti. I coprodotti sono 'due o più prodotti risultanti dalla stessa unità di processo o dallo stesso sistema produttivo'. (11)

I sottoprodotti o prodotti residui: 'sono i prodotti non direttamente utilizzabili risultanti dalla stessa unità di processo di un prodotto, in base al potenziale di riciclabilità vengono suddivisi in materia prima seconda o rifiuti.' (11)

L'analisi di ogni sottosistema costituisce un **eco bilancio**; l'analisi Lca può essere vista come un insieme di eco bilanci, ogni uno con le proprie trasformazioni e operazioni.

Nella scelta dei confini del sistema è opportuno valutare i seguenti aspetti riferiti ai flussi e alle operazioni unitarie: (12)

- Materie prime
- Input e output riferiti alla catena di processo principale
- Trasporto
- Combustibile, elettricità e calore utilizzato nel processo
- Uso e manutenzione
- Smaltimento di rifiuti e riutilizzo dei materiali
- Materiali per processi ausiliari

Nell'analisi Lca è importante utilizzare **criteri di esclusione**, infatti per la sua complessità spesso l'analisi può risultare troppo lunga e complessa, ed è quindi fondamentale escludere i flussi di prodotto non direttamente imputati al processo, oppure quelle quantità che non risultano rilevanti ai fini del sistema indagato.

A tal proposito la normativa definisce tre criteri di valutazione:



- Criterio di massa: l'utilizzo di questo criterio implica la valutazione di tutti gli elementi che influenzano il flusso di massa al sistema per una tal percentuale al di sopra di un valore fissato.
- Criterio dell'energia: l'utilizzo di questo criterio implica la valutazione di tutti gli elementi che influenzano il flusso di energia al sistema per una tal percentuale al di sopra di un valore fissato.
- Criterio di rilevanza ambientale: devono essere considerati tutti gli elementi che hanno un peso più elevato rispetto ad un definito valore percentuale associato ad ogni input ambientale identificato nel sistema prodotto.

Sempre in questa fase iniziale è indispensabile valutare i **requisiti di qualità dei dati**: consentono di identificare il grado di accuratezza con cui viene svolta l'analisi, devono essere scelti sulla base dell'obiettivo dell'analisi e del lettore finale, sono fondamentali per interpretare correttamente i risultati dello studio e devono quindi assicurare:

- la copertura temporale, tramite la scelta di un periodo di riferimento nel quale accettare dati (ad esempio gli ultimi cinque anni) e del tempo indispensabile per la loro rilevazione;
- la copertura geografica, regione locale o spazio, area definita, all'interno della quale si effettua il rilevamento dei dati;
- la copertura tecnologica, scelta della tecnologia utilizzata (ad esempio la migliore disponibile);
- la precisione consente di determinare l'affidabilità dei risultati;
- la completezza, ovvero la percentuale del flusso misurata o stimata;
- la rappresentatività, dei valori trovati rispetto a quelli raffiguranti la realtà del sistema;
- la coerenza;
- la riproducibilità cioè una valutazione qualitativa sul grado di riproduzione dei risultati;
- le fonti dei dati;
- l'incertezza dell'informazione, come ad esempio i dati, i modelli utilizzati e le ipotesi effettuate;

Le **limitazioni all'analisi** possono essere funzionali, territoriali oppure temporali.

Nella limitazione di tipo funzionale viene specificato lo sviluppo e la dimensione del processo, si indaga quindi su: l'estrazione delle risorse (rinnovabili e non rinnovabili), il trasporto delle materie prime, la produzione e il trasporto dei beni intermedi (semilavorati), la produzione e il trasporto del prodotto finito, la vendita, il trasporto al consumo, il consumo, il trasporto del rifiuto, lo smaltimento e/o il riciclaggio.

Per le limitazioni di tipo territoriale è necessario definire un'area spaziale di influenza del processo sul territorio. Le limitazioni di tipo temporale invece pongono l'analisi in relazione a scenari futuri.

Infine, viene stabilito il **livello finale** dell'analisi Lca: a seconda o meno che venga considerato il prodotto in uscita si possono avere analisi di tipo diverso.

- analisi del prodotto (GATE TO GATE), in questo caso si considera per l'analisi solamente l'oggetto e non i processi secondari.
- analisi tecnologica allargata (FROM CRADLE TO GATE), l'analisi è estesa ai processi secondari utilizzati nella trasformazione delle materie prime (eco profilo).
- analisi del ciclo di vita globale (FROM CRADLE TO GRAVE), include tutte le fasi relative al processo principale, ma anche ai processi correlati.

## 2.4.2 Analisi di inventario

Come si evince dalla letteratura l'LCI (life cycle inventory analysis) è la fase più importante della metodologia Lca, si costruisce qui il modello analogico del sistema indagato in grado di riassumere tutti i processi e le lavorazioni che lo costituiscono. I flussi entranti e uscenti dal sistema comprendono le materie prime, i flussi di energia e le sostanze rilasciate in aria, acqua e suolo.

La **preparazione per la raccolta dei dati** include la costruzione di un diagramma di flusso che ha l'obiettivo di descrivere il sistema in esame ed indicarne tutti gli input e output associati ai vari processi unitari. Devono essere adottate specifiche sulle unità di misura utilizzate e descritte le tecniche di raccolta dati impiegate.

La prima parte dell'analisi dell'inventario consiste nella **raccolta dei dati e nella loro quantificazione**. Come per le precedenti fasi anche in questo caso il processo è di tipo iterativo, durante il procedimento si può arrivare a una miglior conoscenza del sistema, all'individuazione di nuovi presupposti e limitazioni, piuttosto che alla modifica del metodo di raccolta dati per adeguarlo all'obiettivo prefissato dell'analisi.

Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata**. viene schematizzato il processo semplificato dell'analisi di inventario.

I dati possono essere categorizzati in categorie omogenee;

- elementi in input – energia, materie prime-ausiliari, entità fisiche
- prodotti, coprodotti, rifiuti
- emissioni in aria, acqua, suolo
- aspetti ambientali

la raccolta dati viene effettuata tenendo in considerazione la tipologia di dato che si va ad inserire nel sistema per l'analisi. Ci sono tre classificazioni che identificano i dati:

- *primari*: direttamente misurati, relativi al sistema
- *secondari*: dati di letteratura o disponibili tramite database
- *terziari*: ricavati mediante stime e coefficienti tecnici che devono essere specificati

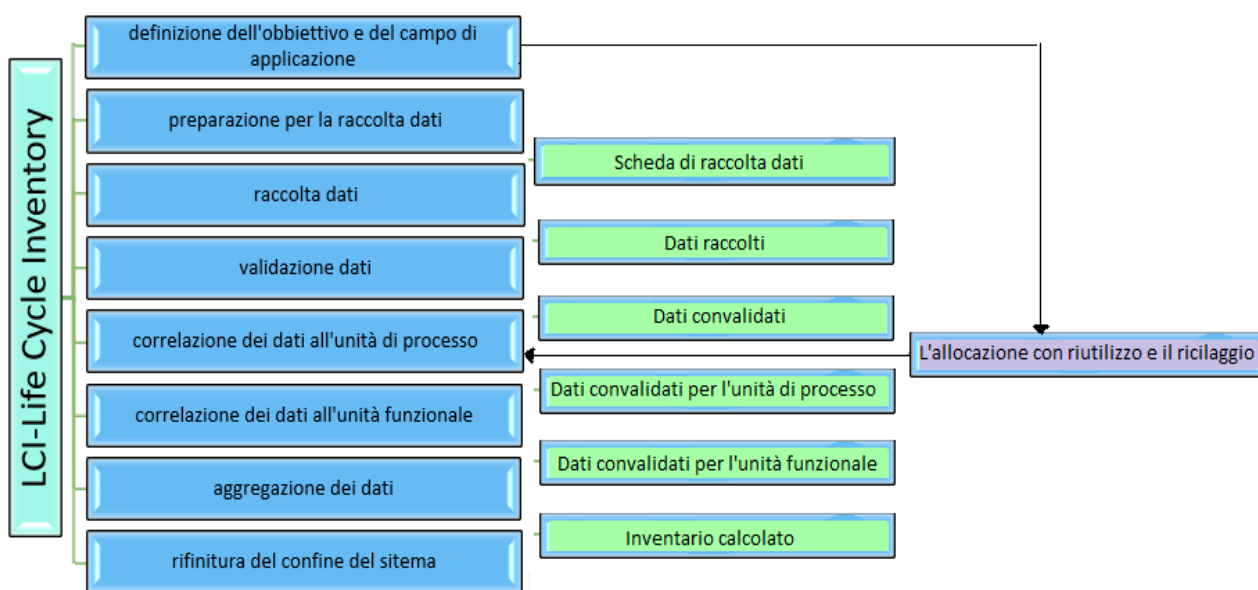


Figura 7: Fasi dell'LCI

La fase successiva a quella di raccolta è rappresentata dal **calcolo**, i dati vengono infatti verificati per avvalorarne qualità e affidabilità. Quest'operazione ha luogo grazie a bilanci di massa, di energia oppure

tramite comparazione dei fattori di rilascio. Nel momento in cui le verifiche effettuate diano risultati non conformi si rende necessario procedere alla ricerca di dati sostitutivi pertinenti all'analisi e corrispondenti ai criteri per la qualità dei dati. Una volta terminata questa fase si procede con l'associazione dei dati appena ricavati agli input e output del sistema considerato. I dati vengono aggregati sulla base dell'analisi di sensibilità, ovvero tramite decisione di inserimento solo se riferiti ad impatti similari e sostanze equivalenti.

I principi da considerare per l'allocazione sono i seguenti:

- individuazione dei processi che necessitano del procedimento di allocazione
- devono rimanere inalterati i bilanci di massa ed energia durante il processo di allocazione
- il criterio di allocazione utilizzato deve essere giustificato

l'allocazione viene inoltre eseguita secondo tre metodi:

- i. Si evita di allocare: dove possibile si deve preferire l'evitare l'allocazione, il metodo viene applicato tramite la modifica dei confini del sistema con conseguente esclusione di dati di unità di processo non rilevanti o non necessari. In questa fase si può avere una crescita o una diminuzione delle dimensioni del sistema.
- ii. Allocazione basata su principi fisici: se l'allocazione non è evitabile si deve procedere tramite relazioni di tipo fisico chiare e definite che considerano le trasformazioni e i processi interni al sistema
- iii. Allocazione basata su criteri economici: Se non è possibile procedere tramite principi di tipo fisico, perché magari non sono ben definiti è necessario ricorrere a valori di tipo economico di prodotti, sottoprodotti e coprodotti.

Per quanto riguarda l'allocazione per i processi di riciclaggio e riutilizzo delle materie coinvolte nel sistema analizzato è necessario effettuare una distinzione tra ciclo chiuso e ciclo aperto. Questi processi infatti come quelli in cui vi è recupero energetico oppure il compostaggio possono avere elementi condivisi tra processi come nel caso dell'estrazione delle materie prime o dello smaltimento

- iv. Ciclo chiuso: i materiali riciclati non vengono allocati, in quanto i materiali secondari sostituiscono le materie prime; si tratta di sistemi in cui non si verificano cambiamenti significativi nelle proprietà del materiale riciclato.
- v. Ciclo aperto: in questo caso si verificano mutazioni significative nel materiale riciclato, questione per cui l'allocazione segue criteri dedicati che possono essere: proprietà fisiche (massa del rifiuto), valore economico (valore di mercato del rifiuto) oppure numero di successivi cicli di riutilizzo del materiale riciclato.

L'ultima fase dell'LCI è la **revisione dei confini**, come già indicato, è possibile che con l'allocazione si includano o escludano processi e dati del sistema, è necessario dunque esaminare attentamente i confini del sistema e aggiungere o togliere tutti i riferimenti ai processi che sono stati modificati. (12) (13)

### 2.4.3 Valutazione degli impatti

Nella fase della valutazione degli impatti della metodologia LCA vengono valutate l'entità delle alterazioni ambientali ad opera del processo o attività tramite l'esaminazione dei risultati ottenuti nell'LCI. L'obiettivo di questa fase è la definizione, classificazione e infine categorizzazione delle modificazioni ambientali generate dal processo. La valutazione viene conseguita tramite l'assegnazione di specifiche categorie d'impatti definite tramite indicatori. Gli indicatori evidenziano il consumo di risorse, le modificazioni ambientali e i rilasci in ambiente. Anche questa fase della metodologia è di tipo iterativo, è necessario quindi porre particolare attenzione allo scopo e all'obiettivo dell'analisi oltre che al pubblico a cui si rivolge lo studio; se gli obiettivi non potranno essere conseguiti sarà indispensabile la correzione o l'adeguamento delle ipotesi iniziali. La valutazione degli impatti rappresenta una fase delicata dell'analisi, tramite la modellazione e la valutazione è possibile introdurre la propria soggettività nello studio, deve quindi essere posta particolare attenzione a questo particolare, in quanto l'analisi si pone come oggettiva e non deve includere valutazioni di tipo personale.

La normativa che regola la metodologia Lca prevede per l'analisi degli impatti diverse fasi, alcune obbligatorie:

- i. Definizione delle categorie di impatto
- ii. Scelta degli indicatori di categoria e dei modelli di caratterizzazione
- iii. Classificazione
- iv. Caratterizzazione
- v. Normalizzazione

Ed altre di tipo facoltativo:

- vi. Raggruppamento
- vii. Pesatura e analisi di qualità

La definizione delle categorie di impatto, la scelta degli indicatori e i modelli di caratterizzazione devono avvenire sulla base dello scopo prefissato dell'analisi. La decisione deve basarsi sul tipo di processo o attività analizzata, devono essere considerati gli impatti associati al tipo di processo con la valutazione degli indicatori coerenti. La normativa prevede in caso di mancanza di indicatori di crearne alcuni ad hoc per soddisfare gli obiettivi della propria analisi, nonostante ciò per rendere l'analisi più oggettiva possibile è consigliato l'utilizzo degli indicatori esistenti e convenzionalmente accettati a livello globale.



Figura 8: Schematizzazione degli indicatori di categoria

Nella scelta degli indicatori è necessario includere quelli a maggior rilevanza dal punto di vista ambientale per i quali il modello studiato deve risultare scientificamente valido.

Successivamente si procede con la classificazione, in questa fase vengono espresse le categorie d'impatto assegnate con gli indicatori nella fase precedente in relazione ai dati dell'analisi d'inventario, ad esempio consumo di energia/materia, emissioni, sempre in relazione agli effetti che possono provocare.

Le **categorie d'impatto** più impiegate risultano:

- Potenziale di esaurimento delle materie prime
- Potenziale di riduzione delle fonti energetiche
- GWP-Global Warming Potential, potenziale di riscaldamento globale espresso in kg di CO2 equivalenti
- ODP-Ozone Depletion Potential, potenziale di assottigliamento dello strato di ozono, espresso in kg di R12 equivalenti
- AP-Acidification Potential, potenziale di acidificazione, espresso in kg di SO2 equivalenti o H+ equivalenti
- NP-Nutrication Potential, eutrofizzazione, potenziale di contributo alla formazione di biomassa,
- Ecotossicità delle acque e del suolo
- POCP-Pothochemical Ozone Creation Potential, smog fotochimico, espresso in quantità di C2H4 equivalente

- Tossicità per l'uomo, complessa valutazione che dipende dall'esposizione e dalla predisposizione
- Uso del suolo
- Uso dell'acqua

La difficoltà di quest'operazione consiste nella categorizzazione del rapporto impatto/effetto relativo ad un processo, infatti uno stesso output può contribuire a diversi effetti, la sequenza generata può risultare molto lunga e di difficile comprensione.

Le categorie d'impatto sono raggruppabili in 3 macrocategorie d'impatto

- Human health
- Ecosystems
- Resources

La **caratterizzazione** prevede la quantificazione degli impatti ambientali nelle varie categorie di impatto.

La procedura si applica tramite un'identificazione dei fattori di peso (weight factors) che vengono stabiliti da un'autorità. Il peso dei vari fattori alle categorie d'impatto è basato sui criteri, l'obiettivo è quello di definire soglie limite ad ogni categoria. Ad ogni categoria viene associato un modello di quantificazione, ad esempio, per l'effetto serra, IPCC (International Panel on Climate Change) ha elaborato il modello per il calcolo del GWP.

La **normalizzazione**, passaggio successivo, migliora la visione complessiva dell'entità dei valori associati agli indicatori. Viene riferito ogni impatto/effetto ad una soluzione di riferimento, in questa fase si cerca quindi uno standard di misura. I risultati ottenuti possono fornire valido supporto nelle operazioni di confronto dei sistemi produttivi. La fase di normalizzazione risulta opzionale da normativa, in questa fase come precedentemente detto, risulta facilitata una visione soggettiva che deve essere il più possibile esclusa visti gli scopi dell'LCA. Nella normalizzazione vengono tuttavia verificate possibili calcolazioni erranee e incongruenze; fornisce quindi un decisivo sostegno alle fasi di ponderazione e interpretazione dei risultati in esame.

La fase successiva di **aggregazione** ripartisce le categorie d'impatto in settori omogenei, l'obiettivo è rendere i risultati di facile comprensione e associarli a specifiche aree di interesse in modo tale da fornire contributo alla fase di ponderazione e interpretazione dei risultati. La procedura più utilizzata è quella degli ecoindicatori, con le macrocategorie di danno sopra definite. Usualmente ad ogni categoria di danno è associata una sola categoria d'impatto, l'aggregazione è definita come una forma di classificazione delle categorie.

Con la procedura di **ponderazione** vengono confrontate le categorie di impatto in relazione alle altre categorie, è un'analisi qualitativa e quantitativa in cui viene valutato il peso di ogni singola categoria. (fattori di pesatura). L'obiettivo di quest'operazione è giungere ad un risultato finale che definisca l'impatto globale esercitato dall'attività considerata.

Analisi aggiuntive possono essere effettuate sulla **qualità dei dati**:

- *Analisi di gravità*, vengono individuati i risultati che forniscono un maggior contributo all'esito dell'indicatore.
- *Analisi di incertezza*, si determina la modalità in cui le incertezze si propagano all'interno dei calcoli e come questi incidono sull'affidabilità del totale.
- *Analisi di sensibilità*, determina in che modo la metodologia prescelta incide sui risultati dell'analisi.

Anche in questo passaggio è possibile la revisione totale dei dati, se dovessero risultare incongrui con l'obiettivo iniziale sarebbe indispensabile rivedere le assunzioni fatte e il rispetto dell'obiettivo.

Le metodologie per la valutazione degli impatti vengono classificate in base all'approccio che utilizzano, si differenziano in midpoint method, problem-oriented method, oppure endpoint method, o damage-oriented method.

Nel midpoint method i flussi in output dal Sistema valutato sono considerati come appartenenti alle categorie d'impatto a cui contribuiscono.

Nel secondo caso invece vengono considerati come nel midpoint method associati alle categorie cui contribuiscono, ma sono poi suddivisi nelle macrocategorie di danno a cui appartengono.

Alcuni dei metodi di valutazione più utilizzati a livello globale per l'analisi LCA sono qui riportati:

- i. Eco-indicator 99
- ii. EPS 2000 (Environmental Priority Strategies)
- iii. EDIP (Environmental Design of Industrial Product, in danese UMIP)
- iv. CML
- v. Impact 2002+
- vi. ReCiPE2016

#### **2.4.4 Interpretazione dell'LCA**

Nella fase conclusiva dell'analisi LCA vengono congiunti i risultati dell'LCI, relativi alla sola analisi d'inventario e dell'LCIA. L'intento è definire spiegare e chiarire i risultati ottenuti con corrispondenza all'obiettivo iniziale e al campo di applicazione prescelto. Si cerca di evidenziare i limiti del sistema analizzato, fornendone spiegazione tecnico scientifica e mettendo in luce i punti forti. L'interpretazione si pone come obiettivo la presentazione dei risultati ottenuti, che devono essere quanto più possibile chiari definiti e comprensibili. L'analisi deve risultare coerente e completa dalla fase iniziale alla fase conclusiva. L'interpretazione dei risultati può mettere in luce punti critici che necessitano di rielaborazione revisione.

Per la fase finale, la normativa UNI EN ISO 14040 definisce quelli che sono i punti salienti:

- Completezza
- Sensibilità
- Coerenza

L'analisi di completezza prevede che vengano verificate le ipotesi applicate durante lo studio l'analisi e che risultino in linea con il campo di applicazione. L'accuratezza dei dati ottenuti e il modo in cui essi influenzano i risultati finali definisce l'analisi di sensibilità. Il criterio di coerenza valuta l'attendibilità delle conclusioni sulla base delle ipotesi iniziali dell'analisi.

Una volta verificati i tre criteri si procede con le conclusioni, verranno indicate le raccomandazioni e miglioramenti da applicare per ridurre gli impatti associati al determinato processo in esame. Le conclusioni di un'analisi Lca devono contenere aspetti di tipo tecnico, economico e sociali.

Il procedimento di riesame dei risultati ottenuti consente di accertare il rispetto della normativa in tutte le fasi di elaborazione dell'analisi e di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti. Questa fase consente all'analisi effettuata di avere maggior attendibilità, credibilità e ne fornisce il riesame per una maggior chiarezza. Vi sono due metodologie per lo svolgimento della fase di revisione critica, che possono essere così schematizzate:

- La prima prevede la revisione da parte di un componente qualificato interno od esterno con determinate e accertate competenze tecnico scientifiche nella materia dell'attività o processo esaminato.
- la seconda prevede il riesame da parte di un'assemblea di parti interessate. L'assemblea decreta un presidente che deve essere indipendente e tecnico in materia d'analisi, a questo punto gli altri componenti vengono definiti come revisori qualificati e hanno lo scopo di riesaminare l'LCA andando in dettaglio delle scienze tecniche applicate, dell'obiettivo e del capo di applicazione fissati.

### **2.4.5 I limiti dell'analisi LCA**

L'analisi LCA non è consigliata per valutazioni di tipo ed economico infatti le categorie citate non hanno legami con le prestazioni dei prodotti in questi termini. Un altro punto critico di fondamentale importanza riguarda la tipologia di dati utilizzati all'interno dell'analisi, infatti il ricorrente uso di banche dati consente di categorizzare e valutare tantissimi aspetti relativi ad un'infinità di processi. L'utilizzo di dati secondari, quindi da database, rende però di fatto l'analisi meno accurata e stime ed ipotesi per quanto fatte su valori minimi o poco rilevanti, possono tramite il metodo iterativo arrivare a contribuire in maniera rilevante agli impatti caratterizzati nella fase finale dell'analisi. Deve quindi esserci un rigoroso controllo sui dati da database e sull'utilizzo che ne viene fatto all'interno dell'analisi. Un altro punto limitante per l'analisi è dato dalla complessità stessa della metodologia, l'analisi di processi contenenti centinaia di variabili spesso indipendenti tra loro può portare a risultati fuorvianti. Altre limitazioni possono essere:

- la mancanza di dati e indicazioni sugli impatti locali non consente di analizzare nella sua completezza i diversi indici dell'analisi, ci si sta sempre riferendo a banche dati;
- la necessità di decisioni di tipo soggettivo da compiere per la definizione dei confini del sistema;
- l'esigenza di metodi di ampia estensione;
- le limitazioni sulla validità dei risultati nel tempo, considerati gli scopi e gli obiettivi dell'analisi;
- i costi in termini di tempo necessario per la realizzazione di un'analisi completa.

### 3 Il metodo di calcolo

Per l'applicazione della metodologia LCA, nello svolgimento del calcolo di questo elaborato è stato utilizzato un software dedicato. I programmi disponibili per lo svolgimento dell'analisi sono conformi alla UNI EN ISO 14040, consentono l'analisi di tutte le fasi della metodologia e si basano su database in continuo aggiornamento. Il software impiegato per il lavoro di tesi è stato SimaPro nella sua ultima versione 9.0.0.47 Multi user disponibile all'Università degli studi di Padova.

#### 3.1 Introduzione a SimaPro

Il software SimaPro- System for Integrated Environmental Assessment of Products è tra i software più utilizzati a livello globale per la metodologia Lca, consente infatti la gestione e l'implementazione di tutti i procedimenti necessari allo svolgimento dell'analisi e garantisce un accurato esame delle performance ambientali dei processi indagati. SimaPro è un programma sviluppato dalla multinazionale olandese Prè Sustainability, nato negli anni '90 e tuttora in aggiornamento. I software come SimaPro si rendono necessari nello svolgimento di procedimenti che risulterebbero molto lunghi e complessi se effettuati senza l'ausilio di strumenti di calcolo; questi consentono una miglior gestione del ciclo di vita dei processi indagati e permettono un'ampia visione dedicata a tutti gli scopi che Lca si propone, sia che riguardino una comparazione con altri processi piuttosto che l'analisi della singola attività a scopi economico manageriali. I vantaggi principali dell'utilizzo di SimaPro vengono così schematizzati:

- La modellazione è veloce ed efficace, è possibile anche l'utilizzo della sezione 'Wizards' di ausilio al programma.
- È sviluppato in accordo con la normativa vigente e consente l'espletamento dell'analisi tramite la sua interfaccia intuitiva.
- Il processo analizzato può essere valutato tramite l'analisi di sensibilità, ponendolo a confronto con altri processi oppure in singola analisi.
- L'analisi è corredata da grafici oltre che dalla valutazione numerica, sono consentite le esclusioni di determinati valori e indagini dettagliate per tutti i diversi indici coinvolti tramite le operazioni di filtraggio e raggruppamento.
- L'analisi si svolge con l'utilizzo di librerie basate su database internazionalmente accettati e accreditati da organismi competenti.
- La struttura ad albero consente di analizzare il ciclo di vita di un processo ricostruendo la configurazione specifica del processo.
- Il software consente l'iterazione dei dati e dei parametri coinvolti tramite analisi dell'incertezza, relazioni di non linearità e la valutazione degli scenari alternativi.
- Consente, inoltre, l'esportazione dei dati in Excel.

#### 3.2 Modellare in ambiente SimaPro

Il primo passaggio fondamentale per la costruzione di un ciclo di vita in SimaPro è la scelta delle librerie. Le **library data**, costituiscono l'insieme dei dati disponibili nel programma, sono aperte, ovvero possono essere modificate dall'utente a piacimento in base alle esigenze dell'analisi in oggetto. Le librerie sono dedicate, ovvero appartengono a determinate classi di categorie studiabili, ogni una viene identificata tramite la sezione scopo e ambito applicativo. È fondamentale l'individuazione delle librerie adeguate alla propria analisi. Le banche dati disponibili nell'attuale versione di SimaPro vengono qui elencate:

- Agri-footprint (economic allocation, gross energy allocation, mass allocation),
- Ecoinvent 3 allocation at point of substitution (system, unit),
- Ecoinvent 3 allocation, cut-off by classification (system, unit)



- Ecoinvent 3 consequential (system, unit),
- ELCD,
- EU & DK Input Output Database,
- Industry data 2.0,
- Methods
- Swiss Input Output Database,
- USLCI

Viene qui proposto un piccolo riassunto che descrive le maggiori banche dati:

- **Ecoinvent 3**-Questa libreria è di origine svizzera ed include oltre 4000 processi appartenenti a settori diversificati. La maggior parte fanno riferimento al settore industriale europeo e comprendono i settori dell'energia, trasporti, materiali edili, componenti chimici, agricoltura, carta e cartone, processi per il trattamento degli inquinanti. Dei processi selezionabili nella banca dati è sempre possibile leggere una dettagliata descrizione, vengono indicate le unità di misura, la categoria e le sottocategorie del processo, e la derivazione del dato e le informazioni relative all'incertezza. È così sempre reperibile l'informazione relativa alla qualità dei dati che si stanno utilizzando, in termini geografici, temporali e tecnologici, ma anche di rappresentatività e acquisizione. L'utilizzo di questa banca dati consente di riferirsi ai vari processi con un approccio di tipo **unit**, processo unitario, da preferire per una maggior chiarezza nei risultati, oppure **system**, come sistema di processo, preferibili per ottenere risultati di tipo visivo nelle analisi più strutturate. Entrambi gli approcci consentono di rispettare i principi di chiarezza dell'analisi Lca. Vi è anche la possibilità di modellare l'analisi con approcci diversi, presenti per i vari processi. In quest'ultima versione della library ogni processo è disponibile nella versione **market** e in quella **trasformation**.
- **USLCI** -Fa riferimento a processi che coprono le maggiori attività svolte nel nord America, riguardanti energia, trasporti e produzione di materiali (agricoli, chimici, plastici, metalli e legno)
- **ELCD** (European reference Life Cycle Database) -Contiene circa 400 processi in diversi ambiti, dall'industriale all'energetico.
- **Industry data v. 2.0**-Contiene processi del ramo industriale, sviluppati con l'approccio "from cradle to grave".

La modellazione dell'attività indagata nell'ambiente Simapro è articolata sulla base dei processi, si possono utilizzare processi esistenti, modificandoli e adattandoli alle proprie esigenze, oppure si possono creare processi ex novo sulla base dei dati che si possiedono. La modellazione del singolo processo è effettuata sulla base di 4 schede computazionali differenti:

- Documentazione: in cui vengono specificate il nome, il tipo di processo, la data, il metodo di raccolta, le regole di allocazione e i riferimenti esterni.
- Input/output: la scheda principale della modellazione del processo, spiegata in seguito.
- Parametri: in cui sono inseribili i parametri in input e i parametri calcolati. E la descrizione del sistema, in cui vengono inserite regole di allocazione, modello di trasporto, di rifiuto, assunzioni e altre informazioni.
- Descrizione del sistema: in cui si può inserire la descrizione, i sottosistemi, l'esclusione di regole, l'allocazione, il modello energetico, il modello di trasporto e di rifiuto ed infine altre assunzioni e informazioni.

Ogni processo è modellato tramite una serie di stringhe computazionali definite, a queste ne possono essere aggiunte e tolte diverse reperibili dalle librerie selezionate. Nella definizione degli input/output visibile in Figura 9 possono essere aggiunti i processi correlati con i relativi dati.

Prodotti								
Output noti a tecnosfera. Prodotti e coprodotti		Quantità fisica	Unità di mi	Quantità fis	% Allocaz	Tipo rifiuto	Categoria	Commento
(Inserisci linea qui)		0	kg	Mass	100 %	non definito	Water	
Output noti a tecnosfera. Prodotti evitati		Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Input								
Input noti da natura (risorse)	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)		Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)		Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Output								
Emissioni nell'aria	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Emissioni in acqua	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Emissioni nel terreno	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Flussi dei rifiuti finali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Emissioni non materiali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Temî sociali	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Temî economici	Sottocompartimento	Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								
Output noti a tecnosfera. Rifiuto ed emissioni al trattamento		Quantità fisica	Unità di mi	Distribuzione	SD^2 o 2^SE	Min	Max	Commento
(Inserisci linea qui)								

Figura 9: Modellazione di Processo in ambiente SimaPro

Dopo aver creato i vari processi, ci si sposta, nel menu Fasi del prodotto, dove sono disponibili le categorie: assemblaggio, ciclo di vita, scenario di fine vita, disassemblaggio e riuso.

Figura 10: Fase di analisi d'inventario in ambiente SimaPro

L'assemblaggio è costituito dall'insieme dei processi, a loro volta contenenti le materie prime, i materiali utilizzati. Nell'assemblaggio vengono aggiunte le quantità consumate nella fase di assemblamento del processo stesso, energia, trasporto (processi). Per analisi complicate è possibile scomporre un assemblaggio in più sotto assemblaggi, utilizzando un metodo modulare.

Nel menu relativo al ciclo di vita si vanno ad analizzare gli assemblaggi precedentemente completati ai processi relativi al prodotto assemblato, in questa fase si possono aggiungere gli scenari di smaltimento per quell'assemblaggio ed eventuali supplementari cicli di vita.

Lo scenario di smaltimento viene modellato allo stesso modo di un assemblaggio, vengono definiti i singoli processi di smaltimento e poi uniti nell'assemblaggio 'scenario di smaltimento'. I processi possono essere relativi al disassemblaggio, il riutilizzo, lo smaltimento, o il conferimento in discarica.

Il disassemblaggio consente la suddivisione del processo esaminato con gli scenari di smaltimento e i processi per lo smaltimento dei rifiuti.

Nella modellazione del riuso, si fa ricorso ad una serie di processi preesistenti per il riutilizzo dei materiali componenti l'attività indagata, oppure si possono anche creare processi nuovi sulla base delle esigenze e degli scopi indagati nell'Lca.

### **3.3 Metodi per la valutazione degli impatti in ambiente SimaPro**

I metodi disponibili per la valutazione dell'analisi degli impatti disponibili in SimaPro sono diversi:

Eco-indicator 99 (E, H, I), Ecological Scarcity 2006, Boulay et al 2014, Hoekstra et al 2012, Motoshita et al 2010, Pfister et al 2009 e 2010, Ecopoints 95, EDP (2013), IPCC 2013 GWP, Cumulative Energy Demand, TRACI, USEtox Recommended, BEES+, CML, Eco-indicator 95, Ecological footprint, Ecosystem Damage Potential, Greenhouse Gas Protocol, Selected LCI results.

In questo lavoro di tesi è stato utilizzato il metodo ReCiPe 2016, l'acronimo della metodologia corrisponde agli istituti che hanno collaborato alla stesura del progetto RIVM e Radboud University, CML, e Pré Consultants. L'analisi ReCiPe è stata sviluppata considerando come punto di partenza i due metodi più diffusi per la valutazione dell'impatto:

- CML 2002, proposto da Guinée et al. (2002, Handbook on LCA), quale metodo midpoint oriented.
- Eco-indicator'99, proposto da Goedkoop & Spriensma (1999), quale endpoint method.

Gli indicatori del metodo ReCiPe2016 sono suddivisi in 18 indicatori di midpoint:

1. cambiamento climatico (CC)
2. assottigliamento dello strato di ozono (OD)
3. acidificazione terrestre (TA)
4. eutrofizzazione delle acque doLCI (FE)
5. eutrofizzazione marina (ME) La metodologia LCA 25
6. tossicità umana (HT)
7. ossidazione fotochimica (POF)
8. formazione di particolato (PMF)
9. ecotossicità terrestre (TET)
10. ecotossicità delle acque doLCI (FET)
11. ecotossicità marina (MET)
12. radiazione ionizzante (IR)
13. occupazione di terreno agricolo (ALO)
14. occupazione di terreno urbano (ULO)
15. trasformazione del suolo naturale (NLT)
16. esaurimento delle risorse idriche (WD)
17. esaurimento delle risorse minerali (MRD)
18. esaurimento del combustibile fossile

E tre indicatori di endpoint, che sono:

1. danno alla salute umana,
2. danno agli ecosistemi
3. danno alla disponibilità delle risorse,

I tre indicatori di endpoint sono un'aggregazione delle 18 categorie di midpoint. Tutti gli indicatori schematizzano la grande quantità di valori ottenuti dall'inventario del LCI che altrimenti bisognerebbe interpretare. Si può quindi scegliere tra la visualizzazione con i 18 indicatori oppure la visualizzazione sulla base degli endpoint che verranno qui brevemente discussi.

### ***HUMAN HEALTH (HH)***

Valuta il danno subito dalla salute umana come DALY – Disability Adjusted Life Years – proposto da Hofstetter (1998). Il DALY di una malattia si basa sulle statistiche di salute umana per gli anni di vita persi o vissuti in condizioni precarie. Vengono poste determinate assunzioni nella calcolo, ovvero che non vi sia distinzione di età, né variazioni per le generazioni future.

Il DALY si intende così valutato:

$$\text{DALY} = \text{YLL} + \text{YLD}$$

Dove *YLL* coincide con la sommatoria degli anni di vita persi e *YLD* corrisponde alla sommatoria degli anni di vita vissuti con disabilità.

### ***ECOSYSTEM DIVERSITY (ED)***

L'ecosistema viene qui considerato come 'onnicomprensivo', sono inclusi infatti flussi di materia, di energia, di informazioni, valori estetici, servizi, funzioni ecologiche, informazione genetica. Tali flussi a definizione di un ecosistema comportano la sussistenza di un'alta qualità dell'indice soltanto se l'alterazione causata dall'attività antropica non risulta significativa. Possiamo semplificare dicendo che la diversità tra le specie è indice di qualità di un ecosistema.

Vengono quindi considerate tutte le specie indistintamente, ovvero il danno viene valutato sulla base del totale delle specie terrestri e marine presenti.

Il fattore di caratterizzazione (CFED) per la valutazione dell'endpoint (ED) è dato dalla somma di ciascun PDF (Potential Disappear Fraction of species) moltiplicato per ciascuna densità di specie (SD):

$$\text{CFED} = \text{PDF}_{\text{terr}} \cdot \text{SD}_{\text{terr}} + \text{PDF}_{\text{fw}} \cdot \text{SD}_{\text{fw}} + \text{PDF}_{\text{mw}} \cdot \text{SD}_{\text{mw}}$$

*terr*: terrestre, *fw*: acque dolci, *mw*: acque marine.

Il numero di specie totali assunto è quello delle specie registrate (UNEP), che costituisce una parte delle forme di vita stimate sulla Terra.

### ***RESOURCES AVAILABILITY (RA)***

Il rischio che l'umanità esaurisca le risorse disponibili sul pianeta viene considerato un fattore ad elevatissima rilevanza. Anche nell'ambito economico la scarsità di materia in uno scenario ipotetico dell'incremento della domanda genererebbe un forte impatto sui mercati. Le risorse vengono individuate in 3 settori:

- Biotic
- Abiotic (flow, fund, stock)
- Land (UNEP-SETAC).

Il metodo ReCiPE considera come base per il calcolo del danno associato dal processo alla categoria delle risorse utilizzando come base la distribuzione geologica di minerali e risorse fossili, e valuta come l'uso di tali risorse possa causare cambiamenti marginali nelle estrazioni future. La funzione è correlata con l'incremento del prezzo dell'estrazione risultante dall'operazione di estrazione stessa. Il

costo marginale di incremento (MCI) è il fattore che rappresenta l'aumento del costo di una commodity  $r$  (\$/kg), dovuto all'estrazione o resa (kg) di una risorsa  $r$ .

La Figura 11 esprime e riassume la metodologia ReCiPe2016, è visibile il collegamento tra le categorie di midpoint e quelle di endpoint.

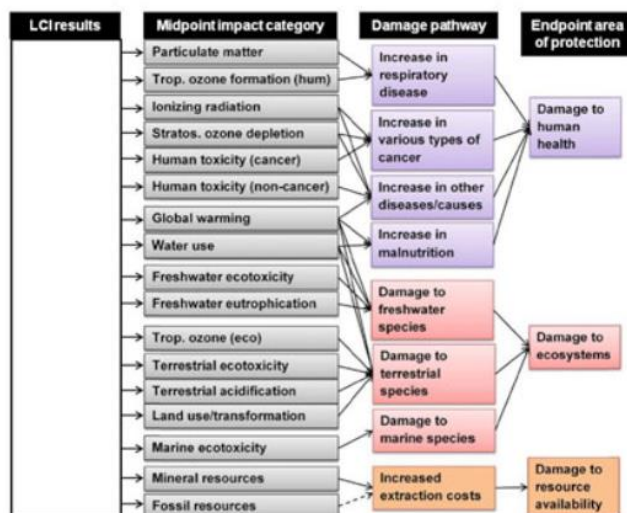


Figura 11: Categorie d'impatto e relazioni nel modello ReCiPe2016 (SimaPro.com, 2017)

Per abbassare il grado di soggettività dell'analisi e ridurre l'incertezza il metodo prevede la suddivisione tramite categorie sociali basate sulle assunzioni della "Cultural Theory", proposto da Thompson (Pré Consultant, 2001). (14)

I = Individualist, considera un arco temporale di 20 anni e che il progresso tecnologico possa contribuire ad una riduzione degli impatti attuali;

H = Hierarchist, utilizza come base le politiche per il conseguimento degli obiettivi e gli accordi internazionali, l'arco temporale di riferimento è di 100 anni;

E = Egalitarian, considera un principio precauzionale e utilizza un termine di riferimento di 500 anni

Nella scelta della metodologia per questo elaborato si è considerato il metodo Hierarchist, si prevede infatti che in un arco temporale di 100 anni le tecnologie per gli accumulatori possano maturare considerando sia le batterie più stabili, come quelle agli ioni di litio, che le più nuove come quelle agli ioni di sodio in modo tale da essere confrontate.

## 4 La generazione distribuita e le FRNP

### 4.1 I Principali Cambiamenti nella Rete Elettrica

Negli ultimi anni si è assistito ad una profonda variazione del mix energetico che come conseguenza ha portato anche ad una variazione dei flussi energetici. La penetrazione delle FER nella rete elettrica ha superato le aspettative ed è quindi cruciale analizzare gli aspetti che questa crescita ha determinato sul sistema elettrico e le difficoltà che si sono generate per l'esercizio in sicurezza del sistema di trasmissione, Negli ultimi dieci anni di esercizio del Mercato Elettrico si sono rilevati tre cambiamenti principali:

- una sostanziale crescita della potenza termoelettrica installata sul territorio, che da un lato ha incrementato la sicurezza e la concorrenza, e dall'altro ha contribuito a una situazione di overcapacity;
- la realizzazione di numerose nuove linee di trasmissione, che ha contribuito alla riduzione degli oneri di congestione;
- incremento di impianti da fonte rinnovabile che ha causato importanti problemi di funzionamento al mercato elettrico.

In seguito alla riduzione degli incentivi statali, le installazioni di FRNP hanno subito un arresto rispetto agli anni precedenti; nonostante ciò la struttura del sistema elettrico risulta fortemente influenzata dalle risorse rinnovabili. In particolare, continua ad aumentare il rapporto tra la potenza di picco (capacità) del complesso degli impianti FENP e il consumo; il rapporto in condizioni di basso carico tende a diventare unitario, con notevoli effetti sulla stabilità dinamica e la controllabilità della rete elettrica. Diminuisce anche la media delle ore di utilizzo dei singoli impianti, portando a una sovraccapacità strutturale. La produzione delle rinnovabili è concentrata nel sud Italia e nelle isole, ciò dipende dalla maggior potenzialità delle risorse e tipologie del territorio, di fatto la generazione ha quindi luogo in località che presentano una rete poco sviluppata e con limiti alla potenza trasportabile, bisogna poi considerare il carico elettrico locale spesso ridotto che non consente lo sfruttamento in loco del flusso di potenza prodotto.

Analizzando la produzione lorda di energia elettrica si nota una riduzione nei consumi finali di energia, dovuta alla crisi in ambito industriale. Si sta inoltre assistendo ad un ulteriore calo della potenza installata, dovuto alla dismissione o messa in conservazione degli impianti termoelettrici di grande taglia, non pienamente compensata da nuove installazioni di impianti non fossili.

La prima importante evoluzione nel mix energetico del nostro paese risale agli anni tra il 1996 e il 2004, in cui è avvenuta la sostituzione dei prodotti petroliferi con il gas naturale, grazie all'affermarsi dei più efficienti cicli combinati rispetto alle preesistenti centrali termoelettriche, essendo fonti comunque programmabili non ci furono significative esigenze di innovazioni nelle logiche di gestione del sistema. Tra il 2004 e il 2015, ci fu una seconda evoluzione nel mix energetico nazionale, per l'introduzione delle FRNP e per la generazione distribuita. Da ciò dipese una netta riduzione della generazione da centrali termoelettriche classiche. Questo importante cambiamento, tuttora in corso, rende necessarie delle innovazioni nelle logiche di gestione del sistema elettrico come: interventi per il rafforzamento della rete nelle zone che presentano maggiori criticità, rinnovamenti nella rete di distribuzione in media e bassa tensione, una gestione dei flussi bidirezionale, una fase di programmazione tramite l'utilizzo di piani di esercizio con dati sulle previsioni di domanda e offerta, un'ottimizzazione del servizio ottenuta con analisi costante dello stato dei sistemi in tempo reale, spazio alla gestione distribuita e il necessario sviluppo di concetti e teorie smart-grid che prevedono l'utilizzo di accumulatori elettrochimici.

L'innovazione nelle tipologie impiantistiche richiede non solo la realizzazione di nuove reti elettriche, ma anche l'adeguamento delle infrastrutture esistenti, garantendo il passaggio da un servizio sostanzialmente "passivo" della rete, indirizzato al consumo, a uno "attivo", indirizzato alla produzione e alla gestione dei carichi. L'adeguamento delle infrastrutture esistenti riguarda principalmente le reti di distribuzione, in relazione al controllo dei profili di tensione che vengono modificati dalla potenza immessa dagli impianti di generazione distribuita.

Gli impianti termoelettrici vengono sempre più utilizzati per coprire le punte di carico, ma comunque si sta assistendo ad una riduzione delle ore di utilizzo grazie alle fonti rinnovabili non programmabili. Agli impianti

termoelettrici viene quindi richiesta sempre più flessibilità. Da ciò ne consegue la ricerca di nuove soluzioni tecnologiche che permettano di rendere più flessibili i moderni gli impianti convenzionali fonti fossili; Inoltre a parità di impianti chiamati a funzionare a carico parziale e con continue accensioni e spegnimenti, diminuiscono i rendimenti, in relazione ai cicli combinati e alla media dell'intero parco termoelettrico destinato alla sola produzione di energia elettrica.

Altri problemi derivanti dall'inserimento delle rinnovabili nella rete sono:

- La riduzione della sicurezza del sistema.
- L'incertezza degli esiti forniti dal MGP (mercato del giorno prima), che incide sul livello di sicurezza del sistema.

Per esempio quando il livello di produzione degli impianti fotovoltaici e eolici raggiunge le dimensioni della domanda nella stessa zona (come accade solitamente in estate con basso livello di domanda, in ore diurne e in giornate ventose) l'esito del MGP diventa pari a zero in termini di prezzo, pertanto deve intervenire l'ente Terna per garantire la sicurezza del sistema, non solo nel "chiamare" impianti termoelettrici nei mercati successivi, ma anche nel fermare una quota di impianti rinnovabili.

L'MGP valuta in modo diverso l'energia offerta da impianti termoelettrici e quella offerta da impianti rinnovabili non programmabili, essendo la seconda più incerta e senza disponibilità di riserva. Si ritiene necessario di conseguenza un "capacity payment" a favore degli impianti termoelettrici per il fatto che è la stessa esistenza di tali impianti a permettere il funzionamento del sistema elettrico.

## 4.2 I Sistemi Di Accumulo

Nello sviluppo delle reti elettriche i sistemi di accumulo si propongono come strumento sempre più interessante, consentono infatti una miglior efficienza energetica, flessibilità alla rete elettrica e garantiscono una gestione del sistema in modo intelligente. Tramite i sistemi di accumulo è possibile separare nel tempo, nello spazio e nella forma la generazione dell'energia elettrica. Dal punto di vista economico l'applicabilità dei sistemi di accumulo consentirebbe l'immagazzinamento dell'energia prodotta nelle ore a basso costo, in un arco temporale di bassa richiesta per rilasciarla in seguito durante un picco di domanda ed evitando così le forme costose di acquisto e produzione. La scelta dell'integrazione di un accumulatore ad un sistema per la produzione di energia elettrica avviene sulla base di progetti di fattibilità che possono valutare sia aspetti di tipo economico, di miglioramento delle prestazioni piuttosto che, come, ragioni di sostenibilità ambientale.

Un sistema di accumulo è definito come un insieme di elementi, apparecchiature e logiche di gestione e controllo, con la funzione di assorbire e rilasciare energia elettrica; il suo funzionamento è previsto in maniera continuativa in parallelo alla rete. Ha infatti la capacità di aumentare la flessibilità della rete quando altre soluzioni (controllo della domanda, gestione flessibile del sistema di back-up fossile) raggiungono il loro limite operativo o risultano troppo costose. Analizzando il comportamento di un sistema di accumulo tradizionale in una rete a qualsiasi livello (produzione, trasmissione o distribuzione/utenza), si evince che esso comporta una non trascurabile perdita dovuta alle inefficienze nella conversione, soprattutto in fase di carica e scarica (round-trip, efficienza dal 50 all'85%); Il territorio nazionale dispone di un'elevata capacità di accumulo elettrico sulla rete di trasmissione, in particolare impianti di pompaggio e turbinaggio, che vennero realizzati a partire dal 1930 prettamente sull'arco alpino con lo scopo di bilanciare la produzione termoelettrica e in prospettiva del nucleare. La capacità di questi impianti è di 7659 MW, distribuita in 15 impianti al Nord e 7 al sud e nelle isole, con capacità oraria da 5 a 52 ore. Attualmente sono in disuso e la produzione da pompaggio è passata dal valore di 10.65 TWh nel 2010 a 1-2 TWh annui.

Le problematiche sopra citate riguardo la concentrazione degli impianti da FER nel centro sud e lo sviluppo generalizzato della generazione distribuita stanno portando all'attenzione dei ricercatori nuovi e più efficienti sistemi di accumulo, in particolare l'elettrochimico, tale da consentire un incremento dell'apporto da rinnovabili pur mantenendo la stabilità nella rete ed evitando le eccedenze energetiche.

Nel campo dell'accumulo possiamo distinguere due categorie di sistemi sulla base della funzione per cui vengono installati:

- "Power Intensive" o servizi di potenza classificati sulla base della velocità di risposta, potenza del sistema di accumulo, e sui benefici che questo comporterebbe relativamente agli scambi energetici con la rete a cui è interconnesso.

- “Energy Intensive” o servizi di energia, riguardano gli aspetti energetici, riguardano il livello di potenza erogabile, considerato su di un arco temporale lungo.

I sistemi di accumulo possono essere identificati anche in base al metodo di dimensionamento utilizzato in base alle funzioni cui il sistema è chiamato a svolgere. (13)

Nel prossimo capitolo verranno analizzati i vantaggi dell’accumulo elettrochimico rispetto alle categorie sottostanti:

- *Power Quality*
- *Security*
- *Mercato*
- *Accesso (differimento di investimento)*

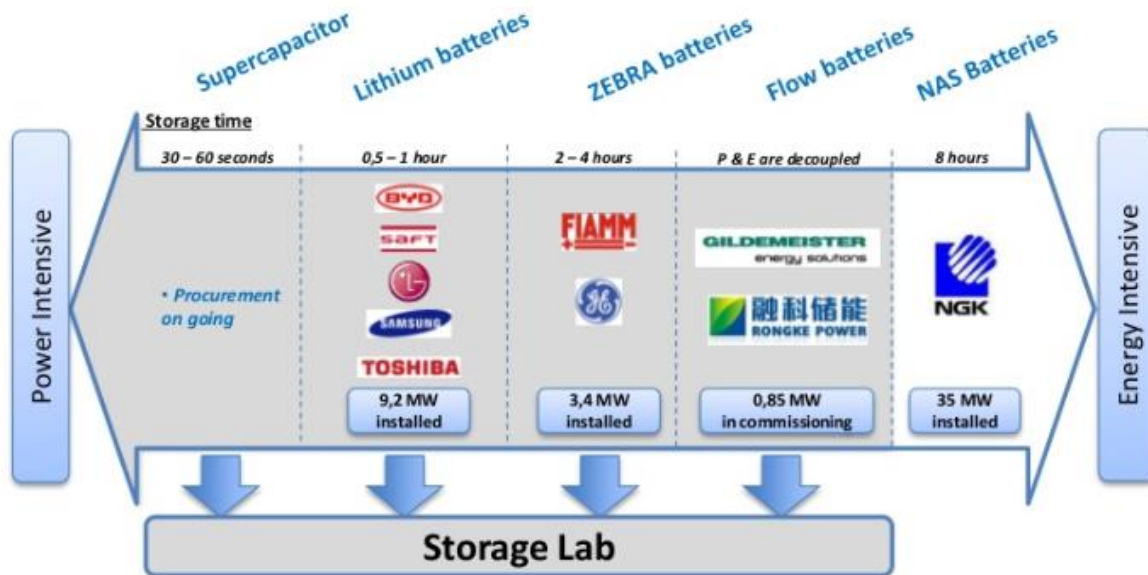


Figura 12: Accumulatori elettrochimici power intensive e energy intensive (TERNA, 2017)

#### 4.2.1 L’accumulo nei Servizi di potenza e di energia

##### *Vantaggi in security*

L’accumulo elettrochimico applicato al sistema elettrico è in grado di fornire diversi vantaggi dal punto di vista della Security.

Nel caso del **peak shaving**, ovvero il livellamento del picco di domanda di energia elettrica che si verifica nelle ore diurne, l’accumulo, consente un’erogazione di potenza per un periodo di tempo limitato in grado di ovviare ai picchi di domanda e consentire quindi alla convenzionale generazione di potenza di non dover intervenire. L’accumulo riesce quindi a mitigare il picco di domanda consentendo al sistema un regolare funzionamento. Viceversa, il valley filling, ovvero il fenomeno opposto che riguarda il load levelling che verrà trattato nei servizi energetici, Figura 13. Se si verificasse un’interruzione di rete di durata limitata il sistema di accumulo interverrebbe come UPS-**Uninterruptible Power System**, ciò garantisce una sicurezza intrinseca del sistema che diventa un importante valore aggiunto di security per i carichi non interrompibili. Nei casi degli **impianti in isola**, come quelli successivamente considerati negli scenari di questo elaborato, capitolo 7, ovvero non collegati al sistema rete nazionale, è fondamentale il mantenimento dell’equilibrio tra generazione e carico, la capacità della rete in isola deve essere quella di raggiungere brevemente l’equilibrio tra domanda e offerta evitando perdite ingenti di carico. Il rischio maggiore per questa tipologia di impianti è quello di incorrere in parti di rete con inadeguata capacità di generazione oppure con capacità di distacco del carico non adeguate sia in entità che in modulabilità. (15)



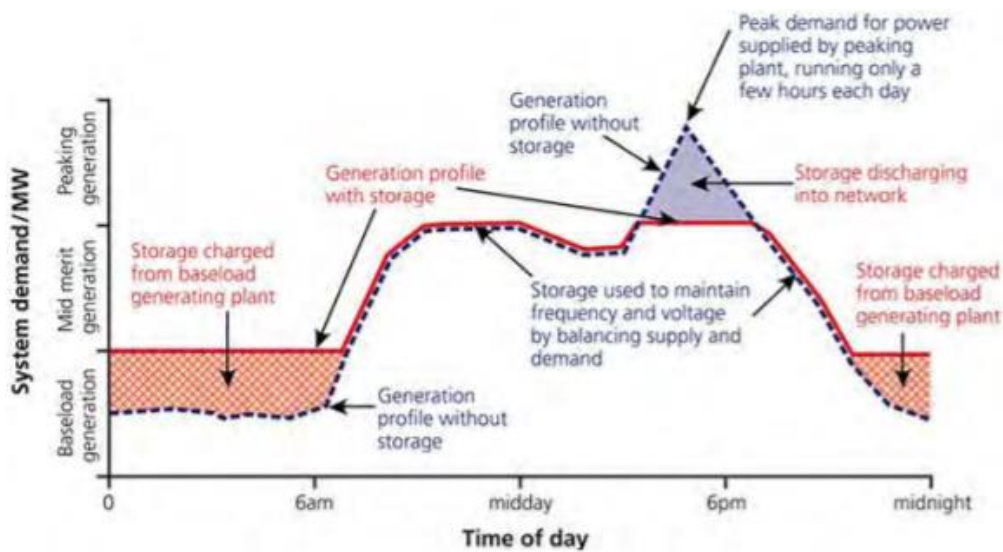


Figura 13: Curva d'esempio di Load levelling (Prudentenergy, 2012)

Queste condizioni potrebbero comportare un rapidissimo tracollo della frequenza di rete con il susseguente cedimento della rete. L'accumulo in parallelo agli impianti di generazione consente in questi casi la funzione di regolazione primaria e il load shedding, consente quindi di mantenere l'equilibrio in fase di difesa tra produzione e carico.

Altrettanto funzionale risulta il supporto che l'accumulatore consentirebbe ai servizi di **rampa**, ovvero nel sopperire a rapidi incrementi e decrementi del carico che non possono essere soddisfatti dai generatori termoelettrici in rapidità.

Così pure predisponendo l'accumulo all'allacciamento degli ausiliari nelle centrali per la produzione è possibile ottenere il **black start** dei gruppi elettrogeni o degli ausiliari del generatore per consentirne la messa in funzione in fase di avviamento.

Con riguardo ai servizi di energia l'accumulo può risultare funzionale per il caso di **Load Levelling**, ovvero il livellamento dei profili di carico in relazione a periodi lunghi (giorno, settimana, mese), come ad esempio per l'accumulatore considerato negli scenari successivi in cui si ipotizza la fase di carica nelle ore diurne e la fase di scarica nelle ore serali. (Load levelling giornaliero). (16)

### ***L'aumento della Power quality***

Nella valutazione dei vantaggi consentiti tramite l'utilizzo di accumulatori allacciati in supporto alla rete, numerosi sono quelli in ambito di power quality:

Nei sistemi isolati l'inserimento di accumulatori in parallelo con la rete si traduce in un vantaggioso strumento in grado di coadiuvare i bassi valori di energia regolante e i conseguenti sbalzi di frequenza dovuti alla differenziazione del carico nell'arco della giornata. La medesima condizione che si verifica nella rete progettata in isola non è di emergenza, come potrebbe essere sulla rete nazionale, ma di tipo strutturale, questione per cui la compensazione allo sbalzo di frequenza data dall'accumulatore si traduce in qualità del vettore. Consente il mantenimento della frequenza in una banda variazione più limitata.

Un altro aspetto è quello relativo alla regolazione della tensione, la power quality viene incrementata tramite l'accumulatore che consente la conservazione del valore del modulo della tensione V grazie ad un rapido conferimento di energia e potenza. I fenomeni che possono introdurre variazioni nel modulo della tensione possono essere: correnti di inserzione di trasformatori e condensatori, variazione dei carichi, correnti di spunto

dei motori, guasti alle linee d'utenza e interne, carichi non lineari. L'accumulo in questi casi subentra come supporto per il miglioramento dell'onda di tensione.

Per le interruzioni di breve durata e i guasti l'accumulatore viene chiamato ad intervenire sui buchi di tensione, grazie all'utilizzo come UPS o all'inserimento in parallelo come feeder per carichi sensibili. In questo caso si sta agendo in power quality, oltre che sulla security, introdotta nel precedente paragrafo.

L'introduzione di convertitori elettronici lato utenza è notevolmente incrementata nel corso degli ultimi anni, provocando un'alterazione del THD-tasso di distorsione armonica della rete. Il gestore ha applicato diverse metodologie per il contenimento, principalmente applicate tramite sistemi di filtraggio attivo, che necessitano accumulatori, per quanto di piccola taglia, per intervenire. Questa pratica applicativa sembra mostrare un elevatissimo potenziale soprattutto nella visione delle Smart grids.

Un ulteriore contributo degli accumulatori sulla power quality potrebbe essere quello che si otterrebbe nel caso della compensazione per il fenomeno del flicker, ovvero quando si verifica un calo nella tensione della rete che si ripropone ad intervalli regolari. Il fenomeno è visibile nel mutamento della luminosità delle sorgenti luminose che si può verificare a frequenze visibili dall'occhio umano 9-10 Hz.

Nei servizi di energia gli accumulatori consentono il non verificarsi di lunghe interruzioni e aumentano quindi la qualità della rete. Non viene richiesta né prontezza in risposta né prestazioni di potenza ma vengono posti vincoli energetici progettuali. (17)

### ***I vantaggi sul Mercato e sull'accesso***

I vantaggi descritti precedentemente in ambito di security della rete che in power quality vengono valutati in modo cruciale nei mercati per i servizi ancillari. L'interessamento all'istallazione di accumulatori non coinvolge solamente operatori della trasmissione energetica (ISO-Independent System Operator) e il distributore, ma si rivolge anche ai fornitori di servizi per la rete.

Il sistema di accumulo consente infatti l'immagazzinamento di energia, quindi funge da riserva per i casi di necessità, l'energia emessa in questo modo viene associata a mercati specifici tramite un'apposita remunerazione. Possono essere considerati nei servizi di potenza come 'riserve rotanti' ovvero sono in grado di fornire una risposta positiva ad un abbassamento della frequenza di rete in un arco temporale inferiore ai dieci minuti.

Nei servizi di energia dal punto di vista economico viene valutata la flessibilità che l'accumulo consente alla rete o al sistema a cui viene collegato e il vantaggio che si determina tra domanda e offerta durante i picchi di richiesta, ai quali il gestore può sopperire senza il costoso intervento degli impianti di generazione di grossa taglia, ma semplicemente attraverso la scarica dell'energia precedentemente accumulata.

Per quanto riguarda l'accesso, si è precedentemente evidenziato come l'accumulatore possa intervenire per lo smorzamento dei picchi di domanda e proprio grazie a quest'intervento è possibile non saturare la capacità della linea, in questo modo si consente l'accesso ad altre utenze senza avere il raddoppio della capacità. Lo stesso principio è applicabile all'utente attivo, attraverso tecniche di 'Home Energy Management', che può trarre vantaggio dall'accumulo grazie alla remunerazione del conto energia, qualora previsto e dal fatto di essere meno variabile nelle ore di punta.

L'accesso nei servizi di energia viene avvantaggiato grazie all'accumulo poiché quest'ultimo consentirebbe l'accettazione dei nuovi carichi sulla rete senza bisogno di costosissime opere di modifica della rete esistente come gli interventi di rafforzamento. (17)

## 4.2.2 Gli accumulatori elettrochimici considerati

In questo elaborato sono state considerate quattro diverse tipologie di accumulatori con le loro peculiari caratteristiche.

È fondamentale considerare che gli accumulatori sono oggi al centro dell'attenzione per diversi motivi e questo dipende non solo dai vantaggi sopracitati per quanto riguarda il notevole supporto che possono fornire a rete e impianti, ma anche dal crescente consumo nella 'nuova' industria automobilistica relativo ai veicoli elettrici. L'industria chimica sta puntando molto sulla progettazione di nuove tipologie di accumulatori che riescano a fornire prestazioni quanto migliori possibili sia per l'ambito abitativo che per quello industriale. L'attenzione dell'opinione pubblica, in questo senso, è più orientata invece sull'impatto degli accumulatori sull'ambiente, l'utilizzo di sostanze definite 'pericolose' e le limitate tecnologie per lo smaltimento ad oggi esistenti, sono considerati come punti fondamentali su cui insistere per migliorare l'accettazione pubblica dei sistemi di accumulo.

Notevoli passi sono stati fatti negli ultimi anni in questo settore, sia proponendo nuove tecnologie sia migliorando le tecniche per lo smaltimento e il riuso dei materiali coinvolti. Questo studio si propone anche di valutare e confrontare singolarmente le 4 tipologie di accumulatori considerati e di evidenziare i diversi impatti a danno dell'ambiente, sia per quanto riguarda tre tecnologie che possono essere definite 'mature', in continuo miglioramento, sia per quanto riguarda un accumulatore allo stato di definizione primordiale, le batterie agli ioni di sodio, che viene proposto come soluzione alternativa per quanto riguarda l'impiego di sostanze primarie non pericolose.

## 4.2.3 Caratteristiche degli accumulatori

La definizione di accumulatore viene definita nella normativa CEI0-21 come:

*“un insieme di dispositivi, apparecchiature e logiche di gestione e di controllo, funzionale ad assorbire e rilasciare energia elettrica, previsto per funzionare in maniera continuativa in parallelo con la rete con obbligo di connessione di terzi o in grado di comportare un'alterazione dei profili di scambio con la rete elettrica (immissione e/o prelievo). Il sistema di accumulo può essere integrato o meno con un impianto di produzione (se presente). Non rientrano i sistemi utilizzati in condizioni di emergenza che, pertanto, entrano in funzione solo in corrispondenza dell'interruzione dell'alimentazione dalla rete elettrica per cause indipendenti dalla volontà del soggetto che ne ha la disponibilità”. (CEI0-21)*

L'elemento costruttivo dell'accumulatore è la cella elettrochimica, un dispositivo in grado di convertire energia chimica derivante da una reazione interna non spontanea in energia elettrica. L'accumulatore è infatti costituito da un insieme di celle collegate tra loro in serie o in parallelo, disposte in modo da ottenere una specifica capacità e voltaggio.

Le quattro diverse tecnologie di accumulatori considerati in questo elaborato sono:

1. Gli ioni di sodio
2. Litio-ferro-fosfato
3. Litio-nichel-manganese-cobalto
4. Flusso di vanadio

Per la batteria agli ioni di sodio, oggetto di modellazione in questo elaborato si rimanda ai capitoli successivi 4.2.4, 5,; vengono invece qui presentate brevemente le altre tecnologie utilizzate nella parte finale dell'elaborato per l'analisi LCIA e la valutazione degli scenari.

### **Litio-ferro-fosfato-LPF**

Questo tipo di celle furono scoperte nel 1996 nell'università del Texas, il suo funzionamento è basato sugli ioni di litio e sulla modellazione del materiale per il catodo a base di  $\text{LiFePO}_4$ . L'incentivazione che ebbe questa tecnologia fu dovuta inizialmente al basso costo, alla non tossicità e all'abbondanza dei materiali ferrosi; successivamente le buone proprietà elettrochimiche e l'elevata capacità termica, che ne forniva stabilità intrinseca, hanno consentito a questa tecnologia di affermarsi sul mercato.

Il limite tecnico più rilevante di questa cella fu l'alta resistenza elettrica, che venne successivamente risolto grazie all'utilizzo di particelle ridotte e rivestimenti del  $\text{LiFePO}_4$  con materiali carbonici ottenuti tramite drogaggio di semiconduttori.

Le proprietà odierne di questa cella le consentono di sopportare più di 2000 cicli anche sotto elevati carichi dovuta alla loro stabilità di tensione. Il punto debole di questi accumulatori risiede nel potenziale medio modesto, anche la conducibilità elettrica e ionica non presenta valori rilevanti. Il tasso di auto scarica risulta elevato e la densità specifica è dell'ordine di 90-120Wh/kg.

Questi sistemi si sono dimostrati adatti all'accumulo di tipo stazionario grazie alla loro sicurezza e non reattività alle elevate temperature. (16)

### **Litio-Nichel-Manganese-Cobalto ( $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_x\text{O}_2$ ) -NCM**

Questa tipologia di accumulatori è molto utilizzata per le auto elettriche, è infatti applicata su diversi modelli ad oggi in circolazione. L'elevate correnti in accelerazione la rendono molto adatta allo scopo automobilistico. La batteria è costituita da ossido di manganese per il catodo con micro-cristalli che formano un'architettura tridimensionale. Questa caratteristica riduce le resistenze elettriche e consente un elevato controllo delle correnti. L'unione del nichel con il manganese consente un'elevata energia specifica che rende la batteria stabile e duratura. La cella è dotata di elevata stabilità termica e la bassa resistenza interna consente rapidi cicli di carica e scarica.

La densità energetica di questi accumulatori è di 140-200 Wh/kg e la vita utile della batteria ha durate superiori a 2000 cicli. La temperatura di lavoro di queste celle può variare tra  $-20^\circ\text{C}$  e  $+40^\circ\text{C}$ , necessitano di un sistema di raffreddamento non eccessivamente grande.

La ricerca su questo tipo di accumulatore sta cercando di ridurre il cobalto all'interno della cella a favore di un incremento delle quantità del nichel; l'obiettivo è la riduzione dei costi associati al prodotto finito. Questa tecnologia per le sue proprietà è adatta sia nello storage che per la trazione. (18)

### **Batterie a flusso di vanadio-VRFB**

Le batterie al flusso di vanadio (VRFB: Vanadium Redox Flow Battery) si basano sulla reazione redox che sfrutta la capacità del vanadio di esistere in soluzione in quattro diversi stati di ossidazione. Vengono utilizzate coppie redox di vanadio in entrambe le miscele, con un solo elemento elettronegativo invece che due. Il vantaggio principale di questo tipo di cella è che si può ottenere una capacità illimitata utilizzando serbatoi di diverse dimensioni, oltretutto il mancato utilizzo non provoca effetti di disgregazione dei componenti, è necessario semplicemente ricaricare l'elettrolita per riottenere le prestazioni iniziali. Uno degli svantaggi principali di questa batteria sta nel basso rapporto energia volume e nella costituzione relativamente complessa del sistema. Altre peculiarità riguardano: la lunga durabilità, oltre 20 anni, un'efficienza all'80% e bassi costi di manutenzione. La batteria ha la capacità di subire enormi sovraccarichi anche del 400% per oltre 10 secondi ma grazie alla sua neutralità non vi è pericolo di incendio e la soluzione dell'elettrolita funziona autonomamente come refrigerante, limitando i problemi di surriscaldamento.

Non vi sono particolari svantaggi per questi sistemi che sono tutt'ora tra i più studiati al mondo soprattutto considerata la grande capacità e applicabilità. La densità energetica delle VRFB è piuttosto limitata tra 10 -75 Wh/kg. Inoltre, i costi di elettroliti e membrane incidono notevolmente sul prezzo finale della batteria che risulta quindi piuttosto elevato. (18)

## 4.2.4 Batterie agli ioni di sodio

È stato precedentemente evidenziato come lo stoccaggio di energia sia diventato un tema riguardante il nostro benessere nella vita quotidiana, e come le sfide per gli studiosi degli accumulatori siano diventate dupplici. In primo luogo, si riscontra la crescente domanda di sistemi di alimentazione di dispositivi elettronici portatili e veicoli a zero emissioni, e la costante crescita nella ricerca di sistemi per l'alta energia e di tensione. In secondo luogo, sono necessarie batterie a basso costo per avanzare verso le Smart Grids che integrano il flusso di energia discontinua da fonti rinnovabili, ottimizzando le prestazioni delle fonti di energia pulite. Le batterie agli ioni di sodio si propongono come la chiave risolutiva alla seconda soluzione. L'enorme disponibilità di sodio, il suo prezzo basso e la somiglianza con la tecnologia al litio permetteranno a questa nuova tipologia di accumulatore di affermarsi nel campo dello storage.

Nonostante la bassa densità di energia delle tecnologie basate su ioni di Na, possono essere utilizzate per applicazioni come lo stoccaggio della rete elettrica. Molto lavoro deve ancora essere fatto nel campo del Na-ion per raggiungere la tecnologia Li-ion, sia nel campo dei materiali anodici che devono essere ottimizzati che nei nuovi elettroliti, tuttavia si è voluto mettere in relazione questo tipo di nuovo accumulatore con le tecnologie esistenti per valutarne gli impatti sull'ambiente e l'utilizzo di risorse.

L'attenzione principale per questo nuovo tipo di batteria è rivolta principalmente alla soluzione che porterebbe nel campo del costo degli accumulatori e riguardo alla scarsità delle risorse di litio alle quali si sta andando incontro. Fino ad ora, le batterie agli ioni di litio hanno attratto attenzione nello stoccaggio di energia, ma recentemente sono emerse preoccupazioni sulla disponibilità delle risorse di litio e quindi sui costi futuri che si potranno generare sulla materia prima. La scarsità del litio viene evidenziata non tanto guardando alle riserve mondiali ad oggi disponibili ma alla rapidissima crescita della richiesta, quindi alla luce dei previsti ordini di aumento nell'uso del litio nelle batterie a basse emissioni e nei veicoli ibridi ed elettrici (EV). Mentre tuttora l'estrazione del litio risulta essere ancora modesta, si prevede un rapidissimo aumento nei prossimi 30 anni e la domanda che molti studiosi si propongono è quella riguardo al prezzo che la risorsa otterrà con questo ingente aumento. Inoltre, è di fondamentale importanza evidenziare come le riserve di litio si trovino in zone del pianeta remote oppure politicamente sensibili. Ciò determinerà il futuro costo della risorsa, le tempistiche di estrazione e l'elaborazione di risorse di qualità inferiore, con il conseguente ingente investimento di capitali nel settore minerario.



Figura 14: Mappa mondiale delle riserve di litio (Wordpress.com, 2015)

Come si può evincere dalla mappa mondiale delle riserve del litio, la Bolivia è lo stato con le quantità maggiori disponibili, quantificate in 9 milioni di tonnellate di litio. La corsa all'oro bianco, così definito da numerosi studiosi, è già iniziata e numerosi paesi come Cina e Stati Uniti che stanno già provvedendo a mettere in atto piani strategici che gli assicureranno possedimenti minerari di litio, risorsa che sembra sempre più affermarsi

con numeri che tendono a quelli del petrolio. Le previsioni degli studiosi prevedono le riserve di litio sufficienti per la produzione di un miliardo di batterie per veicoli da 40 kWh, ma che questo valore possa essere vicino al limite massimo. Se tale crescita porterà alla conferma dei risultati sarà indispensabile il riciclo del litio.

Quindi mentre si definisce il dibattito sulla fattibilità e l'impatto ambientale del litio, in parallelo si sta sviluppando la tecnologia a base di composti di sodio capace di porsi come sostituto a basso prezzo e largamente disponibile. Il sodio risulta illimitatamente disponibile e facilmente reperibile ovunque, questo lo svincola da ragioni di tipo socioeconomiche che si generano per il litio ed in altre risorse localizzate in determinate aree geografiche.

Inoltre, la chimica che riguarda le celle a ioni di sodio risulta essere molto simile a quella delle batterie a litio, e ciò consente l'utilizzo di componenti simili in entrambe le celle. (19)

Inoltre, se si sviluppasse una batteria ricaricabile agli ioni di sodio con buone caratteristiche prestazionali si avrebbe vantaggio di utilizzare sistemi di elettroliti con un inferiore potenziale di decomposizione dovuto al maggiore potenziale di semi-reazione del sodio rispetto al litio. Con queste ipotesi potrebbero quindi essere utilizzati elettroliti a base acquosa che risulterebbero più economici di quelli organici attualmente utilizzati.

Considerando gli studi attuali, le celle agli ioni di sodio non sempre riescono a soddisfare le densità di energia delle batterie agli ioni di litio. Innanzitutto, perché il peso equivalente del sodio è maggiore di quello del litio, e in secondo luogo il potenziale di ionizzazione che risulta influenzato dal raggio ionico è maggiore nel sodio rispetto al litio. Tuttavia, le densità di energia riportate sono già superiori a quelle dei LIB (ioni di litio) esistenti al litio ferro fosfato-litio titanato (LFP – LTO) e ci si aspetta che superino anche quelli dei LIB litio ferro fosfato-grafite (LFP – C). (19)

Tabella 2: Caratteristiche chimiche principali di Sodio e Litio (Brian I. et.al, 2012)

Characteristics	Na	Li
Price (for carbonates) <sup>d</sup>	0.07–0.37 <sup>a</sup> € kg <sup>-1</sup>	4.11–4.49 <sup>b</sup> € kg <sup>-1</sup>
Capacity density	1.16 A h g <sup>-1</sup>	3.86 A h g <sup>-1</sup>
Voltage vs. S.H.E. <sup>c</sup>	-2.7 V	-3.0 V
Ionic radius	0.98 Å	0.69 Å
Melting point	97.7 °C	180.5 °C

<sup>a</sup> Purity: 98.8–99.2% min. <sup>b</sup> Battery grade: 99.9%. <sup>c</sup> S.H.E.: Standard Hydrogen Electrode.

Pertanto, gli accumulatori a base di Na avranno difficoltà a competere con le cellule a base di Li in termini di densità di energia. Tuttavia, possono essere considerati per l'uso in applicazioni in cui il requisito di peso e ingombro non è rilevante, come lo stoccaggio di off-peak e per le applicazioni in sostegno alle energie rinnovabili, come parchi eolici e solari. Inoltre, nelle batterie agli ioni di sodio SIB viene utilizzato l'alluminio al posto del rame e questo si aggiunge ai precedenti vantaggi dotando la batteria di un minor impatto ambientale.

Recenti studi computazionali di che riguardano: barriera di tensione, stabilità e diffusione sia della Na-ion che della Li-ion, indicano che i sistemi Na-ion possono essere competitivi al 100% con quelli al litio. (20)

I dettagli e le caratteristiche della cella oggetto d'analisi verranno presentate nei capitoli successivi con la modellazione dei singoli componenti in ambiente SimaPro, capitolo 5.1. In Figura 15 è visibile uno schema compositivo della batteria agli ioni di sodio.



Image: Wikimedia Commons, CC BY-3.0

Figura 15: Schema compositivo per batteria agli ioni di sodio (Wikimedia Commons, 2016)

## 5 Modellazione della batteria in SimaPro

In questo elaborato è stata modellata la batteria agli ioni di sodio (SIB), le altre tre tecnologie considerate erano state precedentemente modellate in un altro studio e verranno utilizzate nella fase di confronto e per i successivi scenari. Le tecnologie prese in esame sono state selezionate sulla base delle loro caratteristiche, sono infatti utilizzate sia per autotrazione che per accumulo stazionario, e sono tecnologie che possono essere definite mature. I vantaggi che la batteria agli ioni di sodio potrebbe portare sono stati descritti nei capitoli precedenti, verranno qui presentate la modellazione e le assunzioni prese in esame in SimaPro per lo studio del ciclo di vita della batteria.

È stata modellata la batteria sulla base di quella analizzata nello studio (21), si tiene conto dell'intero ciclo di vita, dall'estrazione delle risorse alla produzione, dalla fase d'uso fino alla fine del ciclo di vita e al riciclaggio / smaltimento dei rifiuti. L'obiettivo è quello di quantificare gli impatti ambientali associati alla produzione di una SIB costituita da un catodo di ossido stratificato e un anodo di hard carbon per confrontarlo con le batterie più mature esistenti, essendo questa la forma più stabile tra le varie tipologie di batterie agli ioni di sodio. L'unità funzionale, ovvero il servizio fornito che viene utilizzato come base per la quantificazione / il confronto, è di 1 MWh di capacità di stoccaggio. Al fine di poter valutare anche l'influenza della durata del ciclo della batteria e l'efficienza interna l'unità funzionale del ciclo di vita sarà 1 MWh stoccato.

Per quantificare gli impatti ambientali, viene utilizzato il midpoint ReCiPe 2016, applicando la prospettiva gerarchica.

Le quantità relative ai singoli processi riguardanti il processo produttivo della batteria sono state modellate per semplicità e coerenza utilizzando la quantità di 1kg.

### 5.1 Caratterizzazione della batteria

La batteria agli ioni di Na soggetta a valutazione si basa su un catodo di ossido stratificato in combinazione con un anodo di hard carbon. Il catodo è costituito da un ossido stratificato con un legante organico (poli vinilidene fluoruro). L'anodo composito si basa su un materiale attivo carbonioso prodotto da un precursore di carboidrati (zucchero) e un legante a base d'acqua, gomma stirene-butadiene (SBR) in combinazione con carbossimetilcellulosa di sodio (CMC). Per entrambi gli elettrodi, l'alluminio viene utilizzato come foglio collettore di corrente poiché non si lega con sodio a basso potenziale. Il sale esafluorofosfato di sodio (NaPF<sub>6</sub>) in un solvente organico viene utilizzato come elettrolita, mentre il separatore è un foglio poroso convenzionale in polietilene / polipropilene identico a quelli utilizzati nelle batterie agli ioni di litio. Il layout e il bilancio di massa di una cella della batteria sono basati su brevetti esistenti e schede tecniche trovati nello studio (21). Come spiegato nello studio preso in esame esistono numerose combinazioni di materiali promettenti per la produzione di catodi a ossido stratificato, motivo per cui per la valutazione vengono utilizzati i valori di prestazione dichiarati per una batteria a ossido stratificato generica.

La caratteristica fondamentale per la cella presa in esame è che mostra una densità di energia specifica per cella di 136 Wh kg<sup>-1</sup>, comparabile o addirittura leggermente superiore a quella delle celle LFP esistenti.

Le informazioni sulla durata di vita utile raggiungibile delle SIB sono scarse a causa della bassa maturità tecnica della tecnologia. Le schede tecniche per le batterie a ossido stratificato per-commerciali riportano almeno 300 cicli di carica-scarica con una capacità di conservazione iniziale dell'80%, mentre 2000 cicli sono stati dimostrati fattibili dagli istituti di ricerca.

Tuttavia, a causa di una simile configurazione cellulare e principio di funzionamento, si prevede che le SIB mostrino una durata comparabile come quelle dei LIB una volta prodotte con attrezzature industriali all'avanguardia, per questo nella fase successiva di valutazione e applicabilità della batteria nei diversi scenari verrà ipotizzato un numero di cicli pari a quelle della tecnologia LFP.



Le celle della batteria sono assemblate in 18 involucri di celle, che sono quindi imballate insieme al sistema di gestione della batteria (BMS) in un involucro di acciaio per formare un pacco batteria paragonabile ai pacchi LIB. Sebbene i materiali utilizzati per la SIB possano mostrare proprietà diverse rispetto a quelle dei LIB, la cella della batteria e il processo di produzione del pacco sono considerati identici, con l'assemblaggio finale della cella e il riempimento dell'elettrolita che si svolgono in ambienti asciutti. La custodia e il BMS rappresentano il 20% della massa totale del pacco SIB, dando una densità di energia specifica di  $128 \text{ Wh kg}^{-1}$  per il pacco batteria finale. (21)

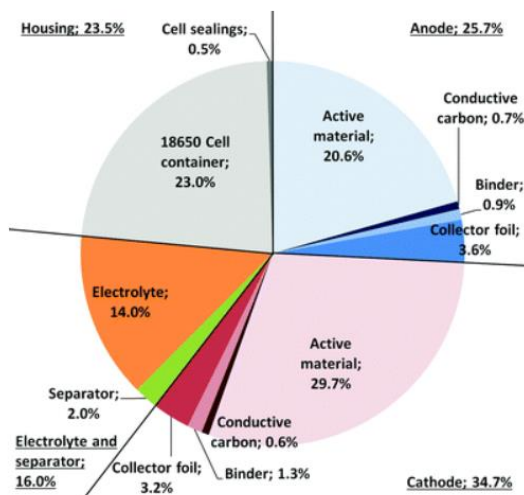


Figura 16: Composizione percentuale in peso di una singola cella Na-ion (Peters, Jens, et al. 2016)

La produzione dell'anodo di hard carbon, da un precursore di carbonio e la produzione del catodo di ossido stratificato sono modellate in dettaglio sulla base dei dati divulgati nelle schede tecniche dello studio esaminato. Si presume che il contenitore della cella, il separatore, l'alloggiamento della batteria e il BMS non siano diversi da quelli usati per le celle agli ioni di litio. Ciò porta l'ulteriore vantaggio di una migliore comparabilità nell'ambito del confronto con le altre batterie, le differenze derivanti da approcci di modellazione diversi di questi componenti comuni sono minimizzate.

## 5.2 Assunzioni e ipotesi nel modello

Poiché non è ancora stata stabilita un'industria per la produzione su larga scala di queste celle, si ipotizza che una volta dimostrata l'efficacia delle Na-ion, la fabbricazione possa essere implementata con siti produttivi in Europa, si considerano quindi per la modellazione in esame i valori corrispondenti per l'elettricità e il trasporto. Tramite l'utilizzo di SimaPro è possibile inserire nella modellazione stringhe di processo riguardanti valori specifici per elettricità, calore e trasporto che si riferiscono a processi nell'unione europea.

Questo procedimento consente una modellazione più accurata, la localizzazione dei processi associa agli impatti finali le caratteristiche impiantistiche, le emissioni e i consumi relativi al luogo in esame; la scelta è ricaduta nel voler rappresentare il ciclo produttivo in modo quanto più corrispondente alla realtà.

Le stringhe di processo utilizzate nella modellazione dei valori sopra citati sono:

- Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland} | market group for | APOS, S
- Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} | heat production, natural gas, at boiler atm. | APOS, S
- Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} | market for | APOS, S
- Transport, freight train {Europe without Switzerland} | market for | APOS, S

Si è considerato l'utilizzo di elettricità in media tensione in quanto è ben noto che i processi produttivi delle batterie risultano essere molto energivori. Per la produzione di calore si è scelto il gas naturale considerando

il minor impatto associato alla sua produzione, rispetto all'utilizzo di altre tipologie di combustibili, e la sua diffusione nei processi industriali. Per quanto riguarda il trasporto: si è considerato quello su strada effettuato da mezzi EURO5 con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate, quello su rotaia sempre associato a viaggi all'interno dell'unione europea. Le distanze nei vari processi sono basate su distanze tipiche di trasporto secondo gli standard ecoinvent, e i valori inseriti fanno riferimento a quelli calcolati nello studio di riferimento (21).

Nei paragrafi successivi viene riportato il processo di modellazione dell'analisi di inventario per batterie agli ioni di sodio. Si procede evidenziando la composizione dell'elemento pacchetto batteria e poi gli altri a seguire, nelle tabelle dell'analisi di inventario le stringhe di processi che riportano (Na-ion) riguardano processi precedentemente modellati. Per alcuni componenti infatti è stata necessaria prima la modellazione di sotto processi e poi il richiamo del sotto processo all'interno della modellazione di altri processi.

I processi sotto riportati sono direttamente importati dalle schede di SimaPro in Excel tramite la funzione copia, che consente l'interazione tra i due diversi programmi, nell'appendice verranno riportati gli stessi procedimenti, ma importati da SimaPro con la funzione esporta, che tuttavia, non consente il 'miglioramento' della forma di visualizzazione, è quindi stato scelto di passare da Excel per una forma puramente stilistica dell'elaborato.

## 5.3 I componenti della batteria agli ioni di sodio

### 5.3.1 Battery pack

Come già detto, tutti i prodotti sono stati modellati per la quantità di 1 kg di prodotto in esame. Il layout del pacco batteria è costituito dalle celle, che rappresentano l'80% del peso dell'insieme, dall'involucro d'acciaio che corrisponde al 14.5% del peso e dal BMS, ovvero il sistema di gestione della batteria, che contribuisce al 5.5% del peso totale del pacco di batteria secondo dati dello studio di Notter et al. (22) . Per trasporto ed elettricità sono stati ipotizzati processi all'interno dell'unione europea, le distanze tipiche di trasporto sono calcolate secondo gli standard ecoinvent come da studio di riferimento. I mezzi di trasporto utilizzati nel processo sono: su strada mezzi EURO5 con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate, quello su rotaia sempre associato a viaggi all'interno dell'unione europea; i valori inseriti fanno riferimento a quelli definiti nello studio di riferimento. (21)

Tabella 3: LCI del pacco batteria per celle agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	Qtà. fisica	Unità
Battery Pack (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
BATTERY CELL 1 (Na-ion)	7,99E-01	kg
Reinforcing steel {GLO}  market for   APOS, S	1,45E-01	kg
Sheet rolling, steel {GLO}  market for   APOS, S	1,45E-01	kg
BMS (Na-ion)	5,60E-02	kg
Metal working factory {RER}  construction   APOS, S	4,58E-10	p
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,00E-01	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	5,45E-01	tkm
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S		3,53 kWh
<b>Output</b>		
Heat, waste- emission to air		12,72 MJ

### 5.3.2 Sistema di gestione della batteria -BMS

Nella modellazione dell'LCI degli accumulatori è necessario porre particolare attenzione al sistema di gestione BMS (Battery management system), questo perché le componenti elettroniche hanno elevato impatto in diverse categorie e quindi la valutazione finale degli impatti può risultrarne fortemente influenzata. Il BMS è un componente cruciale che viene utilizzato per impedire i fenomeni di sovraccarico e di scarica profonda, i componenti del BMS sono principalmente cavi dati, cavi trifase e schede elettroniche. I mezzi di trasporto utilizzati nel processo sono: su strada mezzi EURO5 con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate, quello su rotaia sempre associato a viaggi all'interno dell'unione europea; i valori inseriti fanno riferimento a quelli definiti nello studio di riferimento. (21)

Tabella 4: LCI BMS per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
BMS (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing {GLO}  market for   APOS, S	1,81E-02	kg
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO}  market for   APOS, S	4,23E-02	kg
Cable, data cable in infrastructure {GLO}  market for   APOS, S	6,66E+00	m
Cable, three-conductor cable {GLO}  market for   APOS, S	4,46E-01	m
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	0,093957	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	0,56374	tkm

### 5.3.3 La cella agli ioni di sodio

Nella produzione delle celle per gli accumulatori l'aspetto più critico risulta proprio la produzione della cella stessa e questo si motiva con il consumo di molta energia associata al processo di produzione. Con riferimento allo studio (21) sono stati ipotizzati valori legati alla produzione delle batterie agli ioni di sodio identici a quelli delle batterie agli ioni di litio per quanto riguarda elettricità e calore coinvolti.

Queste ipotesi sono state applicate in primo luogo per mancanza di dati primari e in secondo con l'obiettivo di rendere la Na-ion confrontabile con la batteria al litio. Il valore ottenuto per calore ed elettricità è calcolato sulla base della media del valore ottenuto in diversi studi LCA per il processo di fabbricazione delle batterie agli ioni di litio. Si considera che il calore venga utilizzato nella fase di fabbricazione delle celle, mentre l'elettricità viene associata sia al processo di produzione della singola cella che al processo produttivo del pacco di batteria. Per la stima delle distanze di trasporto si è continuato con l'ipotesi del processo produttivo europeo, con l'utilizzo di mezzi EURO5 con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate per il trasporto su strada e su rotaia all'interno dell'unione europea; i valori inseriti fanno riferimento a quelli definiti nello studio di riferimento. Si considera che anodo, catodo ed elettrolita vengano prodotti in loco e quindi non richiedano trasporto. Infine, viene posta una quantità di scarto del processo produttivo pari al 5%, che significa che il 5% delle celle agli ioni di sodio vengono scartate in fase produttiva perché non conformi, o difettose. (21) La modellazione risultante dall'LCI è visibile in Tabella 5.

Tabella 5: LCI della cella agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
Battery cell (1) (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Cathode (Na-ion)	2,70E-01	kg
Anode (Na-ion)	3,65E-01	kg
Battery separator {GLO}  market for   APOS, S	2,12E-02	kg
NaPF Electrolyte (Na-ion)	1,47E-01	kg
cell container (Na-ion)	2,47E-01	kg
Nitrogen fertiliser, as N {GLO}  market for   APOS, S	1,05E-02	kg
Chemical factory {GLO}  market for   APOS, S	4,00E-10	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	4,20E-02	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	2,50E-01	tkm
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S	3,64	kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas,   APOS, S	2,63E+01	MJ
<b>Output</b>		
Heat, waste- Emissions to air	4,69E-01	MJ
Used Li-ion battery {GLO}  market for   APOS, S-Waste to treatment	5,00E-02	kg

### 5.3.4 Involucro della cella

Per l'involucro della cella è stato ipotizzato di utilizzare una bassa lega di acciaio e i processi relativi allo stampaggio e le guarnizioni in nylon. Si definisce che l'involucro delle celle sia prodotto in un'azienda esterna e quindi vengono indicati i valori di trasporto associati ad una fabbrica dell'unione europea. I mezzi di trasporto utilizzati nel processo sono: su strada mezzi EURO5 con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate, quello su rotaia sempre associato a viaggi all'interno dell'unione europea; i valori inseriti fanno riferimento a quelli definiti nello studio di riferimento. (21) La modellazione dell'LCI ottenuta è visibile in Tabella 6.

Tabella 6: LCI dell'involucro della cella per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
Cell container (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   APOS, S	9,79E-01	kg
Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode {GLO}  market for   APOS, S	9,79E-01	kg
Nylon 6-6 {GLO}  market for   APOS, S	2,11E-02	kg
Metal working factory {GLO}  market for   APOS, S	4,48E-10	p
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	9,79E-02	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	1,96E-01	tkm

### 5.3.5 L'elettrolita

Per l'elettrolita della cella agli ioni di sodio lo studio (21) prevede la composizione ottimale costituita da una soluzione 1 M (concentrazione molare) di esafluorofosfato di sodio (NaPF<sub>6</sub>) in sali disciolti in una miscela di solventi organici: etilene carbonato (EC) e dimetilcarbonato (DMC) con concentrazione 80% e 20% in peso. I componenti presenti nell'LCI sottostante forniscono il processo produttivo necessario alla composizione elettrolitica del mix di sostanze sopradescritto. Per arrivare alla modellazione del processo come visibile in tabella è stato necessario modellare i sotto processi di produzione del sale NaPF<sub>6</sub> (Tabella 9) e del DMC (Tabella 8), la produzione dell'EC è disponibile come processo pre-modellato in SimaPro. Si ipotizza anche in questo caso che la produzione avvenga all'interno dell'unione europea, con l'utilizzo di mezzi di trasporto EURO5 con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate e tramite treno, con valori che fanno riferimento a quelli definiti nello studio (21) e calcolati su distanze tipiche di trasporto secondo gli standardecoinvent. L'analisi di inventario è riportata in Tabella 7.

Tabella 7: LCI dell'elettrolita per batterie agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
NaPF <sub>6</sub> Electrolyte (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Ethylene carbonate {GLO}  market for   APOS, S	7,07E-01	kg
DMC Dimethyl carbonate (Na-ion)	1,77E-01	kg
NaPF <sub>6</sub> (salt) (Na ion)	1,17E-01	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,00E-01	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	6,00E-01	tkm

#### 5.3.5.1 Modellazione del DMC

Si procede ora con la modellazione del sotto processo relativo al solvente organico a base di dimetil-carbonato. Il processo produttivo per il DMC si basa sulla reazione del metanolo con l'etilene carbonato, la reazione fornisce dimetil-carbonato e glicole etilenico che risultano quindi prodotti in output. L'allocazione tra i due sottoprodotti DMC e glicole etilenico è basata sulle proprietà fisiche (massa). L'analisi di inventario ottenuta è riportata in Tabella 8.

Tabella 8: LCI del componente DMC per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
DMC Dimethyl carbonate (Na-ion)		1 kg
<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti evitati</b>		
Ethylene glycol {RER}  production   APOS, S	6,89E-01	kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Ethylene carbonate {GLO}  market for   APOS, S	9,78E-01	kg
Methanol {GLO}  market for   APOS, S	7,11E-01	kg
Chemical factory, organics {GLO}  market for   APOS, S	6,76E-10	p
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S	2,63E-03	kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas,   APOS, S	1,01E-01	MJ

### 5.3.5.2 Modellazione del sale NaPF<sub>6</sub>

La produzione dell'sale NaPF<sub>6</sub> per l'elettrolita per le celle agli ioni di sodio è fortemente basata sulla produzione elettrolitica delle batterie al litio in cui viene utilizzato LiPF<sub>6</sub>. (23)

Come precedentemente descritto si riporta ora il sotto processo riportante l'LCI del sale NaPF<sub>6</sub> (salt), per il trasporto valgono le assunzioni fatte precedentemente. Il processo produttivo dell'NaPF<sub>6</sub> risulta chimicamente molto complesso e la descrizione esula dagli obiettivi di quest'elaborato, vengono pertanto soltanto elencati i componenti principali necessari alla sua produzione: fluoruro di sodio, penta cloruro di sodio, fluoruro di idrogeno o acido fluoridrico, fertilizzante azotato e neutralizzatore (calce). Per quanto riguarda le emissioni dovute al processo produttivo risultano presenti scarti acquosi di processo con sali inorganici e acidi, tricloruro di fosforo come emissione gassosa ed infine calcare e fanghi di processo. I residui e le emissioni sono stimati sulla base dei processi produttivi già industrializzati per la produzione dell'elettrolita a sali di litio LiPF<sub>6</sub> come da dati disponibili in (21). La modellazione dell'analisi di inventario ottenuta è riportata in Tabella 9.

Tabella 9: LCI del sale NaPF<sub>6</sub> per batterie agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera. Prodotti e Coprodotti</b>	Qtà. fisica	Unità
NaPF <sub>6</sub> salt (Na ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Sodium fluoride {GLO}  production   APOS, S	3,19E-01	kg
Phosphorus pentachloride {GLO}  market for   APOS, S	1,98E+00	kg
Hydrogen fluoride {GLO}  market for   APOS, S	4,04E+00	kg
Nitrogen fertiliser, as N {GLO}  market for   APOS, S	1,25E-03	kg
Lime, hydrated, packed {GLO}  market for   APOS, S	7,44	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,38	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	8,27	tkm
Chemical factory, organics {GLO}  market for   APOS, S	4E-10	p
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S	0,541	kWh
<b>Output</b>		
Heat, waste-emission to air	1,95	MJ
Phosphorus trichloride-emission to air	0,263	kg
Inorganic salts and acids (unspecified)-emission to water	8,69	kg
<b>Rifiuto ed emissioni al trattamento</b>		
Limestone residue {RoW}  treatment of, inert material landfill   APOS, S	8,69	kg
Sewage sludge, industrial (wfd)/RER	0,002844	kg

### 5.3.6 Il catodo

Il processo produttivo del catodo della batteria agli ioni di sodio prevede l'utilizzo di un materiale attivo NMMT miscelato con carbon black (nerofumo), un carbonio elementare ad elevata purezza (>90%), un legante copolimero PVdF (polivinildenfluoruro) e un solvente industriale NMP (N-metil-2-pirrolidone). La miscela ottenuta ha l'obiettivo di massimizzare la conduttività del catodo. I componenti vengono miscelati in un mulino ottenendo una sospensione di elettrodi con un contenuto solido del 65%, che costituisce il cast sul substrato in seguito all'evaporazione del solvente, generando lo strato del collettore di corrente. La richiesta energetica per il processo di miscelazione e fusione delle sostanze è derivata da Peters et al. (21). Per il trasporto vengono utilizzate le distanze standard della libreria ecoinvent per le sostanze inorganiche, si ipotizza anche in questo caso che la produzione avvenga all'interno dell'unione europea, con l'utilizzo di mezzi di trasporto su strada EURO5, con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate e tramite treno. L'LCI del catodo così descritto è visibile in Tabella 10.

Tabella 10: LCI del catodo per batterie agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
Catodo (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
NMMT active Cathode material (Na-ion)	8,54E-01	kg
Carbon black {GLO}  market for   APOS, S	1,82E-02	kg
Tetrafluoroethylene {GLO}  market for   APOS, S	1,82E-02	kg
Polyethylene, low density, granulate {GLO}  market for   APOS, S	1,82E-02	kg
N-methyl-2-pyrrolidone {GLO}  market for   APOS, S	3,18E-03	kg
Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   APOS, S	9,11E-02	kg
Sheet rolling, aluminium {GLO}  market for   APOS, S	9,11E-02	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,49E-02	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	5,28E-02	tkm
Metal working factory {RER}  construction   APOS, S	4,58E-10	p
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore)</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APO	2,00E-03	kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat   APOS, S	2,67E-01	MJ
<b>Output</b>		
1-Methyl-2-pyrrolidinone-emission to air	3,18E-03	kg
Heat, waste-emission to air	2,67E-01	MJ

#### 5.3.6.1 Modellazione del materiale attivo $\text{Na}_{1.1}\text{Ni}_{0.3}\text{Mn}_{0.5}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_2$ - NMMT layered oxide

Il materiale attivo per la produzione catodica delle batterie agli ioni di sodio è costituito da un ossido a strati  $\text{Na}_{1.1}\text{Ni}_{0.3}\text{Mn}_{0.5}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_2$  -NMMT i cui materiali precursori sono: carbonato di sodio, ossido di manganese, carbonato di nichel, idrossido di magnesio e biossido di titanio. I precursori vengono macinati insieme e pressati in pellets. Il pellet prodotto viene riscaldato in un forno a 900° per 8/10ore, a raffreddamento ultimato si procede con una macinatura ottenendo lo slurry catodico. La richiesta energetica del processo tiene conto delle numerose ore di funzionamento del forno e della sua efficienza (21). Per la modellazione in SimaPro del componente attivo del catodo i precursori,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ , sono stati trovati nei set di sostanze presenti nella libreria ecoinvent, mentre si è resa necessaria la modellazione dei componenti  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  e  $\text{NiCO}_3$  visibili in Tabella 12 e Tabella 13. Per il trasporto vengono utilizzate le distanze standard della libreria ecoinvent per le sostanze inorganiche, si ipotizza anche in questo caso che la produzione avvenga all'interno dell'unione europea, con l'utilizzo di mezzi di trasporto su strada EURO5, con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate e tramite treno. L'LCI del materiale attivo per il catodo, così descritto è visibile in Tabella 11.

Tabella 11: LCI NMMT active material per celle agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
NMMT active material (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Soda ash, dense {GLO}  market for   APOS, S	5,50E-01	kg
Manganese dioxide {GLO}  market for   APOS, S	4,10E-01	kg
NiCO3 (Na-ion)	3,36E-01	kg
Mg(OH)2 (Na-ion)	2,75E-02	kg
Titanium dioxide {RoW}  market for   APOS, S	3,77E-02	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,36E-01	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	8,17E-01	tkm
Chemical factory {GLO}  market for   APOS, S	4,00E-10	kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APO	3,08E-02	kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat produc	10,6	MJ
<b>Output</b>		
Carbon dioxide, fossil -emissions to air	3,53E-01	kg
Heat, waste-emissions to air	10,71	MJ

### 5.3.6.2 Modellazione dell'idrossido di magnesio Mg (OH)<sub>2</sub>

L'idrossido di magnesio è comunemente ottenuto tramite latte di magnesia utilizzando un semplice processo che prevede l'utilizzo dell'acqua di mare o di salamoie con sufficiente concentrazione di magnesio. La salamoia concentrata viene quindi miscelata con calce idrata che porta alla formazione di Mg (OH)<sub>2</sub> che precipita in sospensione formando il latte di magnesia, la soluzione ottenuta viene separata dalla salamoia per centrifugazione. Vengono considerati i processi relativi all'estrazione mineraria e all'occupazione per il sito di estrazione come input da risorse. L'energia consumata nel processo riguarda i consumi dovuti al pompaggio della salamoia e ai processi di centrifugazione (21). Le assunzioni relative al trasporto sono le medesime descritte per il catodo. L'LCI per la produzione dell'idrossido di magnesio, così descritto è visibile in Tabella 12.

Tabella 12: LCI del MgOH2 per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
Mg(OH)2 ( Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (risorse)</b>		
Occupation, mineral extraction site	1,63	m2a
Transformation, to mineral extraction site	3,26E-02	m2
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Sodium chloride, brine solution {GLO}  market for   APOS, S	105,79	kg
Lime, hydrated, loose weight {RoW}  market for lime, hydrated, loose weight   AP	1,2	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,20E-01	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	7,17E-01	tkm
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APO	1,78	kWh
<b>Output</b>		
Heat, waste	6,42	MJ



### 5.3.6.3 Modellazione del carbonato di nichel

Il carbonato di nichel commerciale viene prodotto per precipitazione di una soluzione di solfato di nichel con carbonato di sodio, essendo il meccanismo esatto di reazione:



I dettagli sul processo richiesto per la modellazione sono derivati dagli studi (21) e (24). La domanda di elettricità è derivata da processi utilizzati nella reazione che sono: pompaggio, centrifugazione e filtrazione. La richiesta di calore si riferisce al riscaldamento del reattore e all'essiccazione del precipitato NiCO<sub>3</sub>. Risultano diversi prodotti di scarto in uscita dal processo ma non viene previsto nessun tipo di trattamento per i reflui liquidi, quindi vengono classificati come emissioni in acqua. I dati relativi al trasporto fanno riferimento ad un processo produttivo nell'unione europea, con valori di trasporto su strada e su treno ricavati da database ecoinvent per le distanze standard di trasporto delle sostanze inorganiche. Il risultato dell'LCI è visibile in Tabella 13.

Tabella 13: LCI NiCO<sub>3</sub> per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera. Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica Unità</b>
NiCO <sub>3</sub> (Na-ion)	1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>	
Soda ash, dense {GLO}  market for   APOS, S	1,42 kg
Nickel sulfate {GLO}  production   APOS, S	1,01 kg
Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland}  water pro	7,98 kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>	
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APO	1,12E-02 kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat produc	2,62 MJ
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	2,72E-01 tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	1,63 tkm
<b>Output</b>	
Carbon dioxide, fossil-emission to air	3,71E-01 kg
Heat, waste-emission to air	2,29 MJ
Sodium sulfate-Emissions to water	8,09E-01 kg
Sodium-Emissions to water	1,94E-01 kg
Nickel-Emissions to water	1,27E-02 kg
Nickel compounds-Emissions to water	1,30E-02 kg

### 5.3.7 L'anodo

L'elettrodo negativo o anodo viene prodotto tramite un processo simile a quello utilizzato per il catodo. La procedura è basata su un processo solvent-casting che prevede la dissoluzione del polimero in un solvente opportuno. Nell'anodo in esame vengono utilizzate: una matrice di materiale attivo -hard carbon (nerofumo), del carbonio conduttivo, un legante e un solvente. Il legante utilizzato è a base acquosa, ottenuto con una miscela di carbossimetilcellulosa (CMC) e una gomma, stirene-butadiene (SBR). Per la modellazione in SimaPro si è utilizzato come blinder (CMC) il set di valori presenti nella libreria ecoinvent, mentre per il blinder stirene-butadiene (SBR) è stato modellato il sotto processo riportato in Tabella 15. La richiesta energetica del processo è associata alla macinazione, fusione ed evaporazione del solvente utilizzato ed è derivata da Peters et al. (21) . Per il trasporto vengono utilizzate le distanze standard della libreria ecoinvent per le sostanze inorganiche, si ipotizza che la produzione avvenga all'interno dell'unione europea, con

l'utilizzo di mezzi di trasporto su strada EURO5, con portata compresa tra le 16 e le 32 tonnellate e tramite treno. L'LCI dell'anodo così descritto è visibile in Tabella 14.

Tabella 14: LCI anodo per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
Anodo (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (risorse)</b>		
Carbon	0,801	kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Carbon black {GLO}  market for   APOS, S	2,59E-02	kg
Carboxymethyl cellulose, powder {GLO}  market for   APOS, S	2,42E-02	kg
SBR styrene butadiene rubber (Na-ion)	1,04E-02	kg
Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland}  market for water	3,45E-01	kg
Sheet rolling, aluminium {GLO}  market for   APOS, S	1,38E-01	kg
Aluminium, wrought alloy {GLO}  aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	1,38E-01	kg
Metal working factory {GLO}  market for   APOS, S	4,58E-10	p
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	0,0188	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	0,0577	tkm
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S	2,06E-06	kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, r	1,11	MJ
<b>Output</b>		
Water-emission to air	0,345	kg
Heat, waste-emission to air	1,12	MJ

### 5.3.7.1 Modellazione del blinder SBR

L'SBR- stirene-butadiene è prodotto da stirene e butadiene in un processo di polimerizzazione continuo in cui il butadiene e lo stirene viene miscelato in un mezzo acquoso con l'aiuto di un tensioattivo/emulsionante (sapone). Per attivare la reazione viene aggiunto un iniziatore (tipo Persolfato) che avvia il processo di polimerizzazione. Come tensioattivo viene scelto un sapone generico. Il calore e l'elettricità utilizzati sono assunti da processi produttivi standardizzati per SBR (21) . Per il trasporto valgono le stesse assunzioni fatte per l'anodo. Il processo modellato è visibile in Tabella 15.

Tabella 15: LCI SBR per batteria agli ioni di sodio

<b>Output noti da tecnosfera.Prodotti e Coprodotti</b>	<b>Qtà. fisica</b>	<b>Unità</b>
SBR styrene butadiene rubber (Na-ion)		1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (risorse)</b>		
Water, cooling, unspecified natural origin, GLO	2,50E-01	m3
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>		
Butadiene {GLO}  market for   APOS, S	7,52E-01	kg
Styrene {GLO}  market for   APOS, S	2,51E-01	kg
Soap {GLO}  market for   APOS, S	2,73E-02	kg
Water, deionised, from tap water, at user {RoW}  production   APOS, S		1,8 kg
Cyclohexane {RER}  production   APOS, S	1,00E-02	kg
Sodium persulfate {GLO}  market for   APOS, S	5,04E-03	kg
Chemical factory {GLO}  market for   APOS, S	4,00E-10	kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>		
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APO	5,50E-01	kWh
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}  heat produc		13,75 MJ
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,05E-01	tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	6,27E-01	tkm

## 5.4 Adeguamento alla potenza di riferimento e rendimento delle batterie

Nella modellazione della batteria agli ioni di sodio, si sono considerati i singoli processi facendo riferimento all'unità di massa e sono stati definiti considerando 1 kg di ogni componente modellato. Il metodo applicato è stato utilizzato per mancanza di dati in letteratura per le batterie agli ioni di sodio di grande taglia e, in secondo luogo, per ragioni semplificative ai fini dell'analisi. Al fine di valutare l'intero ciclo di vita dell'accumulatore e di confrontarlo con le altre tecnologie disponibili, nei diversi scenari successivamente ipotizzati, è necessario un adeguamento dell'insieme modellato all'unità funzionale di riferimento dell'intera analisi: il MWh stoccato nel sistema di accumulo. Come già evidenziato i sistemi di accumulo vengono valutati sulla loro capacità di stoccare energia, vi sono poi ovviamente altre qualità descritte nel capitolo 4.2, come qualità della potenza stoccata, velocità di risposta del sistema etc., che però non influiscono in modo rilevante ai fini della valutazione proposta in quest'elaborato. In relazione all'obiettivo iniziale dell'analisi LCA, lo studio si propone di valutare gli impatti associati allo stoccaggio di energia nei sistemi SdA, proveniente da FRNP, nell'intero ciclo di vita dell'accumulatore, per confrontarne i vantaggi rispetto a sistemi per la produzione energetica da fonte convenzionale. È quindi di fondamentale importanza l'utilizzo di un'unità funzionale adeguata al confronto in termini energetici dei sistemi per l'accumulo stazionario considerato. Per dimensionare correttamente la batteria è fondamentale porre in relazione le quantità utilizzate nella modellazione, kg di sostanze, e la capacità di accumulo in termini energetici. Ciò è possibile grazie all'utilizzo della densità energetica, il parametro [Wh kg<sup>-1</sup>] disponibile per le varie tecnologie compresa quella agli ioni di sodio, che consente di adeguare la capacità energetica al peso dell'accumulatore.

Gli accumulatori che verranno analizzati nel confronto sono di 4 tipologie differenti, la batteria agli ioni di sodio è stata modellata da zero in ambiente SimaPro, mentre le altre tre tecnologie utilizzate risultavano modellate in uno studio precedente (25). Vengono qui elencati gli accumulatori con le rispettive densità energetiche corrispondenti:

- accumulatore agli ioni di sodio Na-ion → 128 Wh kg<sup>-1</sup>
- accumulatore a fosfato di litio e ferro LFP → 120 Wh kg<sup>-1</sup>
- accumulatore Nickel- manganese -cobalto NCM → 200 Wh kg<sup>-1</sup>
- accumulatore a Fluossio di vanadio VRFB → 24,3 Wh kg<sup>-1</sup>

Mediante una proporzione si ottiene il peso complessivo e dei singoli componenti della batteria agli ioni di sodio per l'accumulo della quantità energetica di 1 MWh visibile in Tabella 16.

Tabella 16: Peso complessivo dell'accumulatore agli ioni di sodio per accumulo stazionario

Componenti	Processi per componente	Materiali principali nei processi	%	Percentuale per componente	Kg
<b>anode</b>	active material	hard carbon	20,6	<b>25,8</b>	<b>2015,63</b>
	conductive carbon	carbon black	0,7		
	binder	sbr	0,9		
	collector foil	aluminum	3,6		
<b>cathode</b>	active material	NMTT	29,6	<b>34,7</b>	<b>2710,94</b>
	conductive carbon	carbon black	0,6		
	binder	polyvinil fluoride	1,3		
	collector foil	aluminum	3,2		
<b>separator</b>	separator	polyethylene foil	2	<b>2</b>	<b>156,25</b>
<b>electrolyte</b>	sodium hexafluorophosphate	NaPF6	14	<b>14</b>	<b>1093,75</b>
<b>housing</b>	cell container	steel	21	<b>21,5</b>	<b>1679,69</b>
	sealing	nylon	0,5		
<b>bms</b>	bms	cable	2	<b>2</b>	<b>156,25</b>
<b>totale</b>			<b>100</b>	<b>100</b>	<b>7812,50</b>

Le percentuali a cui si è fatto riferimento per il calcolo sono state ricavate da Figura 16 disponibile nello studio (21). I pesi visibili nella Tabella 16 così come calcolati sono stati inseriti nella fase di creazione dell'assemblaggio in SimaPro, per definire la batteria agli ioni di sodio per l'accumulo stazionario di 1 MWh.

Una volta modellato l'assemblaggio principale si procede in SimaPro con le fasi successive dello scenario di fine vita capitolo 5.5, che insieme andranno a costituire il ciclo di vita della batteria agli ioni di sodio.

## 5.5 Scenario di fine vita

La modellazione dello scenario di smaltimento risulta di fondamentale importanza, soprattutto nel campo dell'accumulo elettrochimico, dove, come già spiegato precedentemente, parte dell'attenzione pubblica è rivolta proprio all'impatto che questi sistemi generano sull'ambiente una volta arrivati al termine della loro vita utile. L'impatto ambientale dei sistemi di accumulo varia a seconda della tecnologia considerata e dei materiali coinvolti. La fase di smaltimento è obbligatoria ed è responsabilità del produttore dell'accumulatore (o del system integrator), i costi associati allo smaltimento incidono sul prezzo finale di vendita del sistema batteria.

Ad oggi le batterie al sodio attualmente commercializzate sono gli accumulatori sodio-zolfo e sodio-cloruro di nichel, strutturalmente e concettualmente molto distanti dalle celle agli ioni di sodio, con funzionamento ad alta temperatura adatte allo stoccaggio di elevate quantità di energia. Per queste tipologie di celle lo smaltimento avviene ad opera del costruttore che si occupa del ritiro delle celle, al suo smaltimento e riciclaggio che risulta essere economicamente conveniente in quanto i materiali sono recuperati al 75%. (26)

Per le tecnologie agli ioni di litio, invece, nonostante siano state sviluppate diverse e numerose tecnologie per i processi di riciclaggio dei materiali coinvolti: terre rare, metalli pesanti e il litio stesso, non vengono spesso applicate e le batterie vengono smaltite in appositi depositi o in discarica. Questo avviene perché i prezzi dei materiali recuperati dal riciclaggio degli accumulatori al litio non sono abbastanza elevati da consentire l'applicazione di un processo di riciclaggio conveniente, a differenza di altre tecnologie. In questi ultimi anni più che a nuove tecnologie atte al riciclaggio dei componenti delle batterie al litio si è parlato di riutilizzo e batterie modulari, che possano avere una seconda vita per le piccole applicazioni, una volta terminata quella per l'accumulo di grandi quantità energetiche.

È difficile stimare le quantità riciclabili e riutilizzabili per le celle agli ioni di sodio per diversi motivi. In primo luogo, non esiste un sito produttivo e la produzione ad oggi non risulta vincolata a brevetti perciò ci sono diversi studi che utilizzano quantità e specie chimiche differenti per la produzione delle celle. In secondo luogo, l'obiettivo che si pongono studiosi e ricercatori è quello di ottenere delle celle con densità di energia elevata e bassissimo impatto ambientale. Come precedentemente descritto l'utilizzo del sodio al posto del litio incide notevolmente sulla sostenibilità di queste celle, svincolandole dall'utilizzo di risorse esauribili, ma l'obiettivo finale è quello di ottenere il totale recupero dei materiali e degli elementi coinvolti al fine di creare un'economia circolare che minimizzi gli impatti sociali e ambientali della tecnologia.

Lo studio (27) propone una configurazione per la tecnologia agli ioni di sodio riciclabile al 100%, la configurazione presenta materiali coinvolti leggermente diversi da quelli presentati nel modello in esame ma viene qui riportato brevemente per comprendere come l'evoluzione e lo studio di questa nuova tecnologia stia procedendo velocemente e con continui miglioramenti sia in termini di stabilità di carica ed efficienza sia in termini di impatto e sostenibilità.

Nello studio viene utilizzato per gli elettrodi  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  e un foglio di alluminio come collettore condiviso di corrente, rispettivamente riciclabili al 100% e 99.1%. La configurazione appena descritta assicura elevata potenza, stabilità e lunga durata della batteria senza rilascio di rifiuti tossici all'ambiente ed un'efficienza di riciclaggio dei componenti solidi maggiore del 98%. Nello studio vengono descritti tutti i procedimenti utilizzati per completare il riciclaggio dei vari componenti, l' $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  presente negli elettrodi viene rigenerato in modo diretto per l'utilizzo in altre celle, tramite un processo di recovery economico e completo che consente il riutilizzo degli elettrodi, che corrispondono alla parte più costosa di una cella. Anche

l'elettrolita può essere riutilizzato attraverso procedimenti di recovery senza ricorso ai processi oggi noti di pirolisi sottovuoto o estrazione supercritica di CO<sub>2</sub>. Per Al e Na metallici negli anodi vengono riciclati per nuovo utilizzo tramite procedimento di elettrolisi a 600° e 950°. (27)

Al fine della modellazione dello scenario di smaltimento della batteria agli ioni di sodio considerata, si è ritenuto opportuno, viste le considerazioni appena citate, di modellare uno scenario di smaltimento intermedio tra i processi ad oggi esistenti per il riciclaggio delle batterie agli ioni di litio, che ricordiamo presentano composizione e struttura simile alle celle agli ioni di sodio e l'ipotesi di riciclabilità al 100% che queste celle dovrebbero raggiungere nel giro di pochi anni.

Si sono quindi utilizzate le tabelle che indicano le percentuali di riciclo dei vari materiali componenti gli accumulatori ad oggi esistenti e si sono calcolate le quantità dei vari componenti nella batteria modellata agli ioni di sodio. La percentuale di riciclo per l'alluminio è stata innalzata al 90% rispetto a quella canonica di 85%, considerando i promettenti studi effettuati sulla riciclabilità delle componenti di alluminio nelle celle agli ioni di sodio.

*Tabella 17: Percentuali di riciclo dei materiali componenti per accumulatori stazionari*

Material	Percent Recoverd
cobalt	80
nickel	80
iron	75
copper	90
carbon	85
lithium	85
manganese	75
separator	87
aluminum	85
steel	95
electrolyte	80
wire board	90
plastics	77

### 5.5.1 Gli scenari di smaltimento

Si è quindi proseguito con la modellazione degli scenari di smaltimento per ogni macro-componente della batteria, ognuno con i relativi input e output, i diversi scenari sono poi associati all'assemblaggio di riferimento. Le percentuali rimanenti, che non figurano nella Tabella 17, vengono considerate come smaltite secondo metodi non di riciclo, come: discarica, incenerimento, termovalorizzazione o dispersione in ambiente. La batteria assemblata risulta nella modellazione così schematizzata:

- anodo
- catodo
- elettrolita
- separatore
- BMS
- Contenitore della cella

Per lo scenario di smaltimento sono stati considerati 4 processi differenti: i rifiuti di materiale plastico, il riciclaggio dell'alluminio, il riciclaggio delle parti metalliche della batteria e i rifiuti di tipo elettronico.

Non sono stati specificati procedimenti per il recupero dei materiali utilizzati per anodo catodo ed elettrolita, dovuti alle difficoltà sopracitate nel trovare dati e nell'ipotizzare uno scenario di smaltimento reale per queste batterie; tuttavia è stato modellato il riciclo delle parti di alluminio, che può essere applicato tramite elettrolisi ad elevata temperatura. Nello scenario di smaltimento delle componenti metalliche si è ipotizzato di recuperare componenti quali: l'involucro della cella, BMS e cavi. Anche i rifiuti di tipo elettronico potrebbero essere

recuperati, tuttavia vista la mancanza di fonti riguardo le componenti elettroniche di tali batterie si è ipotizzato il conferimento in discarica.

Per modellare lo scenario di smaltimento in alcuni casi si è resa necessaria la modellazione anche del processo di smaltimento a cui associare lo scenario, altri sono stati implementati sulla base dei valori disponibili nella libreriaecoinvent. Per i processi di smaltimento modellati sono state inserite le quantità energetiche necessarie allo svolgimento del procedimento tramite valori disponibili da letteratura per i processi in esame. Come per la modellazione della batteria, i processi di smaltimento che riportano la dicitura (Na-ion) sono stati modellati. Vengono ora riportati i processi di smaltimento creati in SimaPro per la batteria agli ioni di sodio, utilizzando come in precedenza l'esportazione dei risultati in Excel.

Lo scenario finale complessivo dei processi di smaltimento e riutilizzo dei materiali coinvolti è visibile in Tabella 18. Nei paragrafi seguenti sono visibili le modellazioni dei singoli scenari di smaltimento e riuso.

Tabella 18: Scenario di fine vita per batteria agli ioni di sodio

Prodotti	Quantità	Unità
Smaltimento+riuso Na-ion MWh ok NAPF	1	p
<b>riferimento ad assemblaggio</b>		
Na-ion assemblaggio 1 MWh funz 1 Napf ok	<b>percentuale</b>	
<b>Scenari di smaltimento</b>		
Waste plastics (Na-ion)	9,8	%
aluminium recycling (Na-ion)	10	%
Metals scrap recycling( Na-ion)	12,3	%
Waste electronic Na-ion	7,2	%
<b>Scenari di riuso</b>		
Riuso aluminium ( Na-ion)	29,9	%
Riuso plastic mix ( Na-ion)	21	%
Riuso metal components ( Na-ion)	9,8	%

## Rifiuti plastici

Per la modellazione dello smaltimento delle materie plastiche componenti la batteria agli ioni di sodio è stato modellato lo scenario considerando la quantità di 1kg di materiale plastico componente la batteria. L'energia necessaria al processo per kg di sostanza è stata ricavata dalla letteratura. Si considera che il 100% del flusso rimasto alla fine del processo sia composto dal 90% di rifiuto plastico e dal 10% di materiale incenerito da conferire in discarica. Lo scenario modellato è visibile in Tabella 19.

Tabella 19: Scenario di smaltimento delle materie plastiche

Specifica del rifiuto	tipo di rifiuto	Qtà. fisica	Unità
waste plastics (Na-ion)		1	kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>			
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S		0,01	kWh
<b>Separated waste/ tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream di rifiuto</b>			
Rifiuto plastico (Na-ion)	Plastics	20	%
<b>Remaining waste/Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione</b>			
Waste plastic, consumer electronics {GLO}  market for waste plastic, consumer electronics   APOS, S		90	%
Dummy_Disposal, unspecified ashes, to unspecified land application/kg/RNA		10	%

## Smaltimento dell'alluminio

Si è modellato lo scenario di smaltimento delle componenti di alluminio utilizzando processi di riferimento preesistenti nella libreria ecoinvent. La spesa energetica del procedimento è stata ricavata da dati in letteratura relativi allo smaltimento di 1 kg di sostanza. Il flusso di rifiuto rimasto dopo la separazione è composto per il 30% dal procedimento per il trattamento dell'alluminio riciclato e dal 70% da residui di alluminio. Il processo modellato è visibile in Tabella 20.

Tabella 20: Scenario di smaltimento dell'alluminio

Specifica del rifiuto	tipo di rifiuto	Qtà. fisica	Unità
Aluminium recycling (Na-ion)			1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>			
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S		0,01	kWh
<b>Separated waste/ tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream di rifiuto</b>			
Aluminium scrap, new {RER}  market for   APOS, S	Aluminium	10	%
<b>Remaining waste/Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione</b>			
Aluminium (waste treatment) {GLO}  recycling of aluminium   APOS, S		30	%
Aluminium scrap, new {RER}  market for   APOS, S		70	%

## Componenti metalliche

La modellazione del processo di smaltimento dei materiali metallici che compongono la batteria è riferita allo smaltimento del contenitore d'acciaio della cella, al sistema di gestione della batteria BMS e ai cavi presenti nella cella. Per la modellazione dello scenario è stato necessario modellare precedentemente il processo di smaltimento metal scrap recycling che è stato poi richiamato nello scenario come materiale separato dallo stream di rifiuto. La scelta nel non utilizzare un procedimento pre-esistente nella libreria ecoinvent è derivata da fatto che nelle librerie sono presenti processi di smaltimento categorizzati per tipologia di rifiuto, quindi si sarebbero dovuti creare processi differenti (es: l'acciaio del cell container e il rame dei cavi), con questo scenario, invece, si vogliono comprendere tutte le parti metalliche coinvolte, in modo da svincolarsi dalla mancanza di dati per tali procedimenti relativi alla batteria al sodio. Lo scenario così modellato è visibile in Tabella 21.

Tabella 21: Scenario di smaltimento delle componenti metalliche

Specifica del rifiuto	tipo di rifiuto	Qtà. fisica	Unità
Metal scrap (Na-ion)			1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>			
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S		0,01	kWh
Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   APOS, S		0,1	MJ
<b>Separated waste/ tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream di rifiuto</b>			
Metal scrap recycling (Na-ion)	ferro metals	90	%
<b>Remaining waste/Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione</b>			
Scrap steel {Europe without Switzerland}  market for scrap steel   APOS, S		100	%

## Componenti elettroniche

Per lo scenario di smaltimento delle componenti elettroniche si è supposto che il 100% del flusso finale di rifiuto rimasto dopo la separazione sia smaltito per triturazione. A differenza degli scenari precedenti per cui successivamente verranno presentati gli scenari di riutilizzo dei materiali coinvolti, per le componenti



elettroniche si è supposto solamente il trattamento per il conseguente deposito in discarica. Lo scenario così modellato è visibile in Tabella 22.

Tabella 22: Scenario di smaltimento per componenti elettroniche

Specifica del rifiuto	tipo di rifiuto	Qtà. fisica	Unità
Waste electronics (Na-ion)			1 kg
<b>Input noti da tecnosfera (materiali/combustibili)</b>			
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}   market for   APOS, S		0,01	tkm
<b>Input noti da tecnosfera (elettricità/calore )</b>			
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}   market group for   APOS, S		0,01	kWh
<b>Separated waste/ tipi di materiale e/o rifiuto sono separati dallo stream di rifiuto</b>			
waste electric and electronic (Na-ion)	Others	90	%
<b>Remaining waste/Flussi di rifiuto rimasti dopo la separazione</b>			
Waste electric and electronic equipment {GLO}   treatment of, shredding   APOS, S		100	%

## 5.5.2 Gli scenari di riuso

Fondamentale per la fase del fine vita dell'analisi LCA risulta la modellazione del riutilizzo delle materie componenti il processo indagato. Gli scenari di riutilizzo hanno un'incidenza positiva sull'impatto finale del processo, il riutilizzo consente di evitare l'impiego di nuovi materiali per la produzione futura contribuendo a un miglioramento del processo dal punto di vista delle risorse utilizzate e degli impatti relativi alle materie prime coinvolte. La modellazione finale dello scenario di fine vita mostrato alla fine di questo paragrafo divide la percentuale del 100% tra scenari di smaltimento e di riuso. Le percentuali di interesse sono state ricavate indagando le quantità di materiali coinvolti per singole sostanze e suddividendole sulla base delle % di riciclo evidenziate in Tabella 17. Le quantità fisiche di 'assemblaggio considerato' sono pari a quelle del materiale in esame nella composizione totale delle batterie. Si riportano ora gli scenari di riuso modellati visibili in Tabella 23, Tabella 24, Tabella 25.

### Riuso dell'alluminio

Tabella 23: Scenario di riutilizzo dell'alluminio

<b>Processo</b>			
Riuso aluminium (Na-ion)			
<b>Riferimento ad assemblaggio</b>		<b>Quantità fisica</b>	<b>Unità</b>
Na-ion assemblaggio 1 MWh		0,2252	p
<b>Processi</b>			
Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland}   market for heat, central or small-scale, natural gas   APOS, S		781,2	MJ
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}   market group for   APOS, S		78,12	kWh
Aluminium scrap, post-consumer {GLO}   market for   Cut-off, S		16,66	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}   market for   APOS, S		78,12	tkm

## Riuso delle plastiche

Tabella 24: Scenario di riutilizzo delle plastiche

<b>Processo</b>	
Riuso plastic mix (Na-ion)	
<b>Riferimento ad assemblaggio</b>	<b>Quantità fisica Unità</b>
Na-ion assemblaggio 1 MWh	0,0331 p
<b>Processi</b>	
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S	440 kWh
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	880 tkm

## Riuso dei metalli

Tabella 25: Scenario di riutilizzo dei metalli

<b>Processo</b>	
Riuso metallic mix (Na-ion)	
<b>Riferimento ad assemblaggio</b>	<b>Quantità fisica Unità</b>
Na-ion assemblaggio 1 MWh	0,21 p
<b>Processi</b>	
Electricity, medium voltage {Europe without Switzerland}  market group for   APOS, S	78,12 kWh
Forging, steel {GLO}  market for   APOS, S	4167 kg
Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  market for heat, district or industrial, natural gas   APOS, S	36 MJ
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO}  market for   APOS, S	1,00E-01 tkm
Transport, freight train {Europe without Switzerland}  market for   APOS, S	6,00E-01 tkm

## 6 LCIA della batteria agli ioni di sodio

In questo paragrafo si procede con l'analisi degli impatti associati alla batteria agli ioni di sodio modellata al capitolo precedente, verranno quindi valutati gli impatti associati all'accumulatore precedentemente modellato e adeguato alla potenza utile di riferimento, 1 MWh. Il metodo che verrà utilizzato per la valutazione è il ReCiPe 2016. Si proporrà per prima cosa l'analisi della batteria senza considerarne le fasi di smaltimento e riutilizzo. È importante valutare il singolo assieme, per capire gli impatti associati; gli scenari di smaltimento e riutilizzo come precedentemente spiegato, capitolo 5.5, che sono frutto di diverse ipotesi e assunzioni e verranno anch'essi valutati ma in seconda analisi.

Come già specificato il metodo ReCiPe viene valutato con l'approccio endpoint (H).

### 6.1 Na-ion

Si riportano i risultati ottenuti nel programma SimaPro. Si evidenzia la leggenda relativa al successivo grafico in modo da rendere chiara l'interpretazione successiva. Nella leggenda, Figura 17, i processi modellati nell'assieme analizzato, riportano le diciture di processo scelte in fase di modellazione; il programma associa ad ogni processo un colore specifico.



Figura 17: Leggenda valutazione dei danni - assemblaggio Na-ion

L'analisi completa di tutti gli indicatori è visibile in Figura 18.

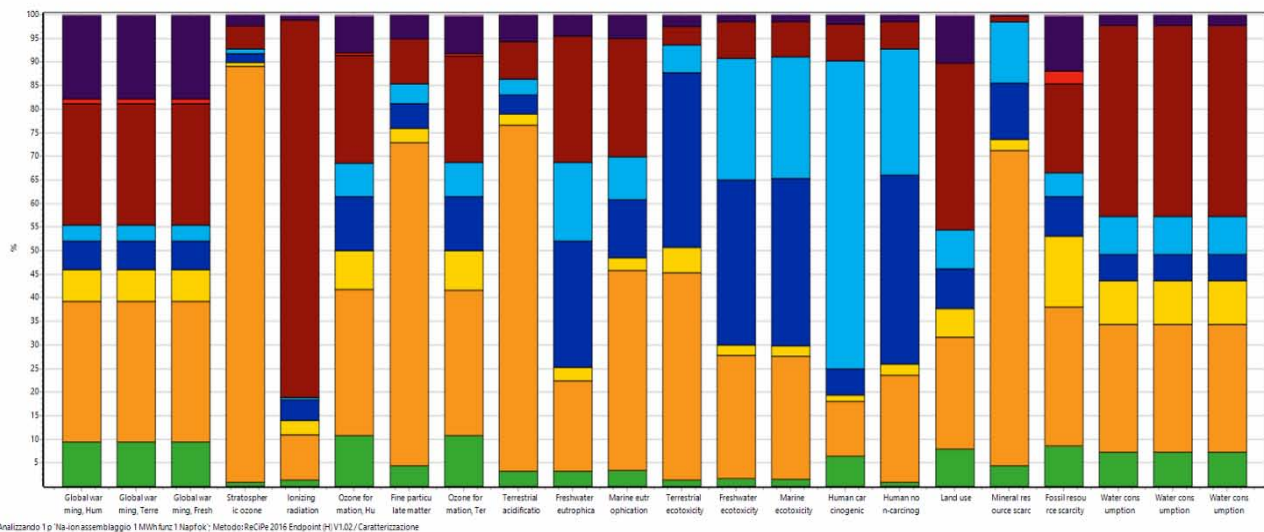


Figura 18: Caratterizzazione Na-ion

La valutazione dei danni che riassume le categorie d'impatto precedente nei tre indicatori di endpoint è visibile in Figura 19.

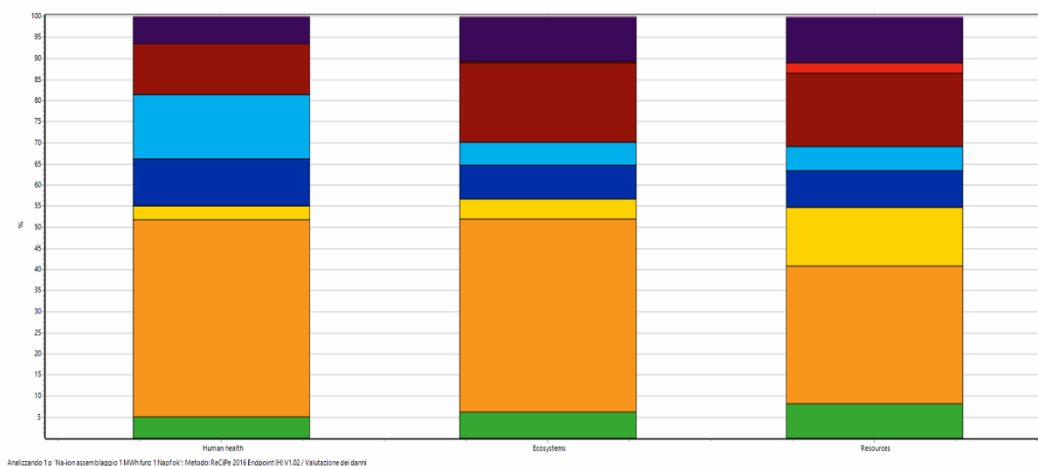


Figura 19: Valutazione dei danni - Na-ion

In arancione, il contributo del catodo, risulta essere predominante nei tre endpoint, in particolare la produzione del materiale attivo NMMT a base di carbone e nero fumo incide notevolmente dando al catodo un contributo di 45-46% per la salute umana e l’ecosistema, uno leggermente inferiore sul consumo di risorse al 32%.

Nel contributo del catodo è compreso anche il foglio di alluminio collettore che nel dettaglio dei processi contribuisce al 6.7% del peso totale del catodo sull’indicatore finale, mentre il legante polivinilfluoride ha un peso del 1.2% e il nichel si attesta al 5.1%.

Per l’anodo il contributo è tra il 5-8% nei tre endpoint tra i suoi processi gli impatti più rilevanti sono associati al foglio collettore in alluminio, al SBR e all’hard carbon utilizzato come materiale attivo. In azzurro il contributo della produzione del contenitore per la cella, dove l’acciaio coinvolto e i processi per la sua lavorazione pesano al 95.5%, 0.0493 DALY, del totale 15% dell’indicatore salute umana.

L’elettricità consumata nei processi per la produzione dell’accumulatore, ritenuta identica, a quella necessaria ai processi produttivi delle batterie agli ioni di litio (27), è responsabile al 11% per l’indicatore salute umana, 18% per l’ecosistema e 17% dell’indicatore risorse.

Valori meno incidenti sono invece quelli associati al calore consumato dai processi, in viola, e al processo produttivo dell’elettrolita della batteria, in giallo.

Si riporta ora la valutazione fatta per l’assemblaggio compreso il processo di smaltimento e riutilizzo dei materiali, Figura 20.

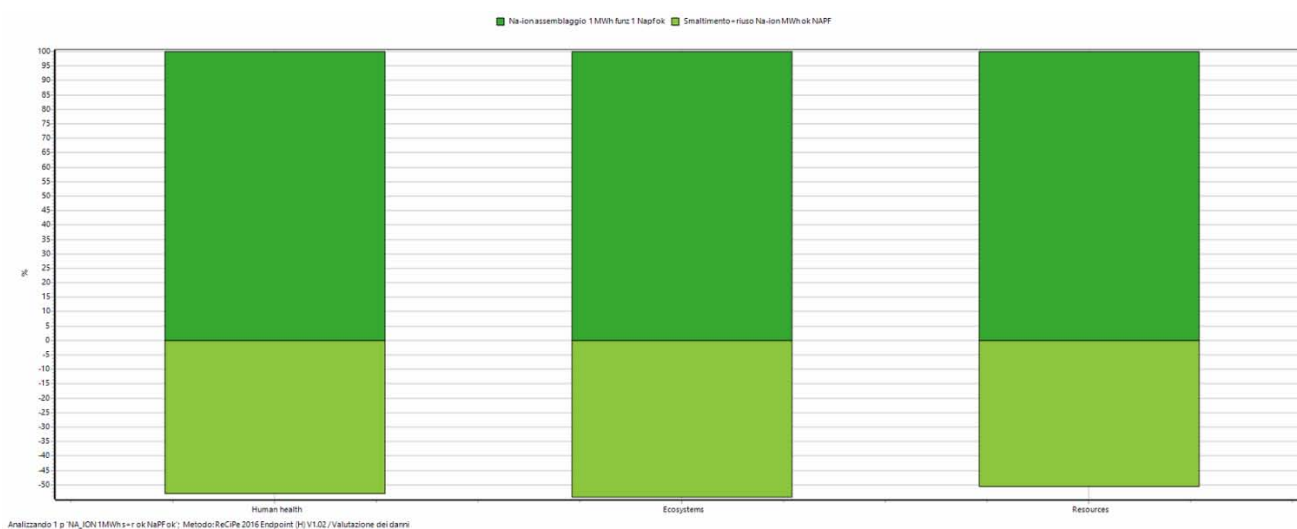


Figura 20: Valutazione dei danni - Assemblaggio Na-ion, smaltimento + riuso

La caratterizzazione che ne consegue è la seguente, Figura 21.

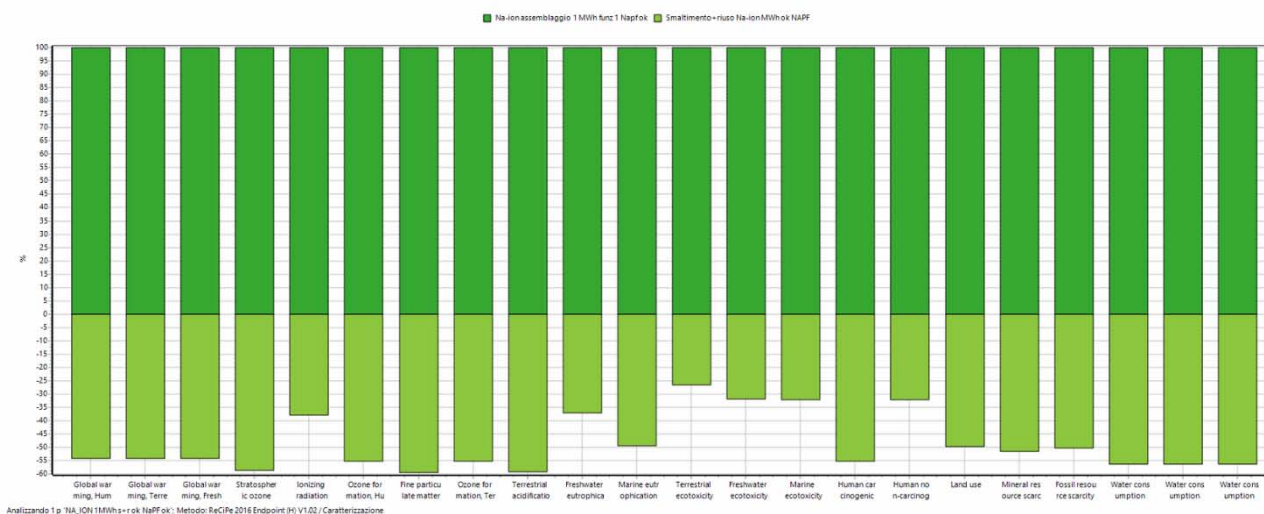


Figura 21: Caratterizzazione - Assemblaggio Na-ion, smaltimento + riuso

In Figura 20, Figura 21, è valutato l'intero assieme della batteria agli ioni di sodio che comprende le fasi di smaltimento e riutilizzo dei materiali coinvolti. In verde scuro, la fase relativa al processo produttivo dell'accumulatore, mentre in verde chiaro, lo scenario di smaltimento e riutilizzo. Come si evince il riutilizzo delle materie coinvolte nei processi crea un impatto di tipo negativo sugli indicatori riducendo gli effetti della fase produttiva. Si nota come in diversi indicatori la fase di smaltimento e riuso comporti una riduzione di oltre il -40% di peso.

Si riporta il dettaglio della valutazione effettuata solamente sullo scenario di fine vita, con l'obiettivo di valutare gli impatti positivi relativi al riciclaggio e riutilizzo dei materiali coinvolti nella totale produzione della batteria, Figura 22.

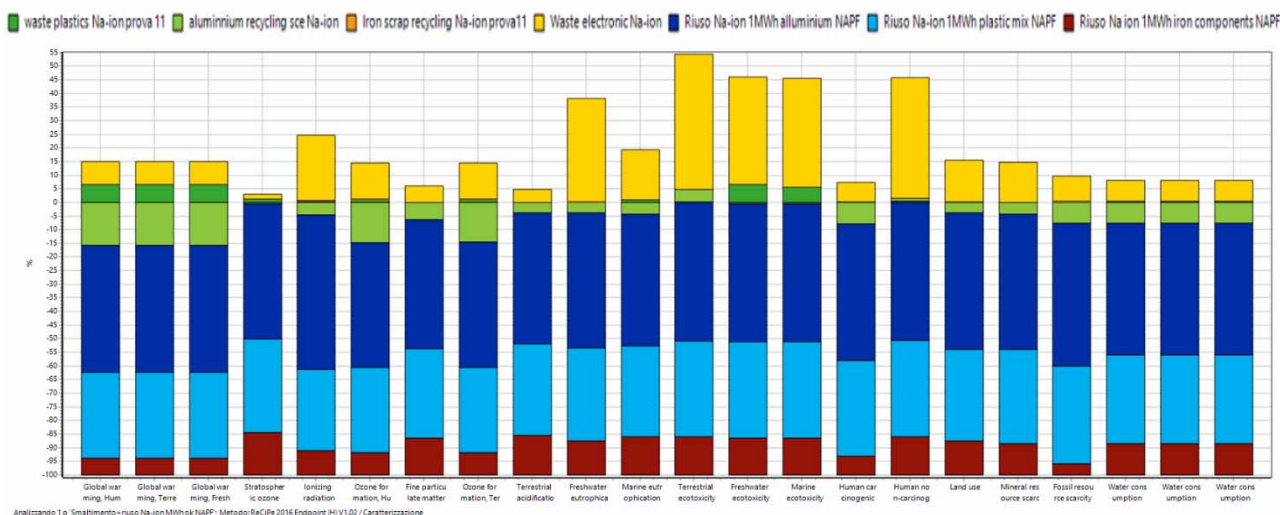


Figura 22: Caratterizzazione - Na-ion, scenario di fine vita

Si può notare come gli impatti positivi siano associati principalmente ai rifiuti di tipo elettronico, in giallo, contenuti principalmente nel sistema di gestione della batteria (BMS), per i quali è stato stabilito in fase di modellazione di processo il conferimento in discarica, in quanto non riciclabili con i sistemi attuali, +40%. Allo stesso modo per i rifiuti plastici, verde scuro, nello scenario di smaltimento era stato previsto il conferimento in discarica, mentre nella modellazione delle fasi di riutilizzo si era prevista una percentuale di riuso delle materie plastiche, azzurro chiaro. Quindi una parte delle materie plastiche non riutilizzate che

vengono smaltite in discarica incidono sugli indicatori con un impatto specifico, mentre la maggior parte risulta riciclabile ed utilizzabile e va quindi ad abbassare i valori di peso dei vari indicatori -30%.

In blu scuro il riutilizzo dell'alluminio negli elettrodi della batteria, l'alluminio è un materiale con un processo produttivo molto energivoro, gli impatti associati al riutilizzo presentano valori che incidono abbassando il totale dei danni associati al suo utilizzo nella fase produttiva, valori dell'ordine di - 48%.

## 6.2 Confronto con le altre tecnologie

Procedendo con la fase di analisi degli impatti, viene ora valutata la batteria agli ioni di sodio posta a confronto con le altre tecnologie di accumulo elettrochimico. Si ricorda che il confronto viene effettuato a parità di unità funzionale, ovvero considerando le tecnologie per MWh di capacità di stoccaggio.

Il confronto che viene proposto esclude le fasi di smaltimento e riutilizzo per tutti gli accumulatori considerati, che vengono così confrontati esclusivamente sulla base degli assemblaggi di processo produttivo. Il confronto con il ciclo di vita completo verrà considerato in un capitolo successivo in cui per tutti gli scenari, gli assemblaggi riporteranno anche lo smaltimento e il riutilizzo. Si è scelto di valutare le tecnologie in questo modo, in questa sezione, poiché i processi di smaltimento e riutilizzo incidono fortemente sui valori finali degli impatti. Nell'esclusione applicata si ritiene vengano valutati al meglio gli impatti di riferimento in particolare su materie prime e risorse utilizzate. Per migliorare il confronto e omogenizzare i risultati sono stati tolti i contributi energetici utilizzati in fase di assemblaggio, mentre sono stati mantenuti i contributi energetici associati ai singoli processi partecipanti alla composizione finale dell'assemblaggio. Le energie sono quindi accoppiate ai singoli processi produttivi e non all'assieme di batteria. Il procedimento è stato applicato a tutte le tecnologie coinvolte, ciò pone i diversi studi su di una base comune che ne aumenta la comparabilità. L'obiettivo è quello di evidenziare come una batteria che utilizza un materiale ampiamente disponibile ed economico come il sodio, possa risultare ambientalmente conveniente rispetto a tecnologie che prevedono l'utilizzo di metalli pesanti e materiali non illimitatamente disponibili, oltre che a processi produttivi complessi e altamente impattanti.

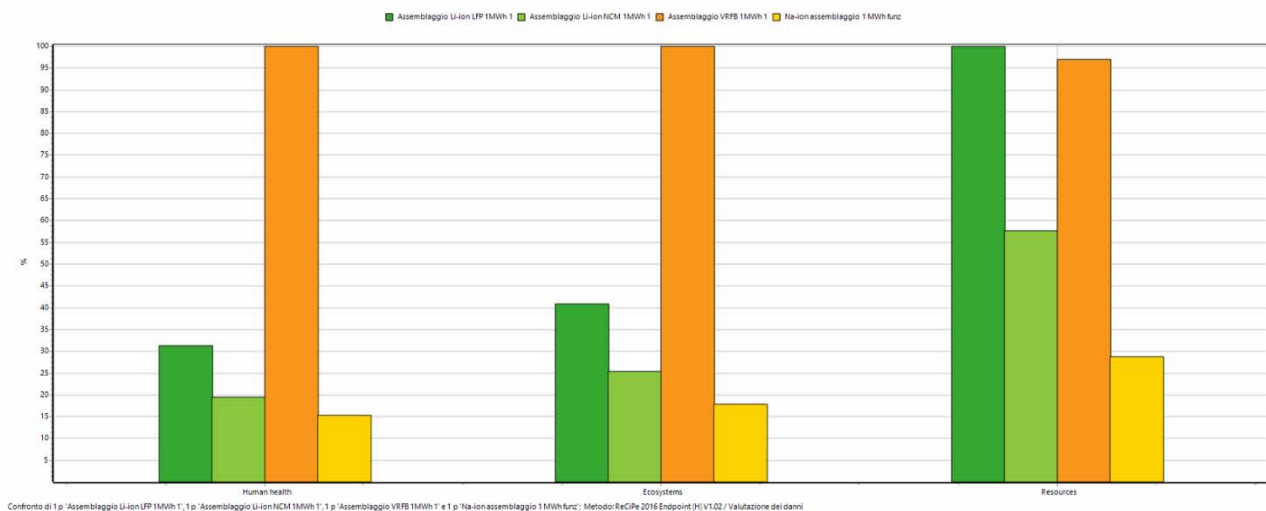


Figura 23: Valutazione dei danni - confronto tra le tecnologie di accumulo

Si nota che a parità di capacità energetica delle tecnologie confrontate, la batteria agli ioni di sodio mostra risultati molto promettenti dal punto di vista degli impatti ambientali. Si deve considerare, tuttavia, che la Na-ion è ad un livello di sviluppo tecnico molto inferiore rispetto alle altre batterie attualmente in commercio.

Osservando la caratterizzazione, Figura 24, mostra risultati positivi per la maggior parte degli indicatori.

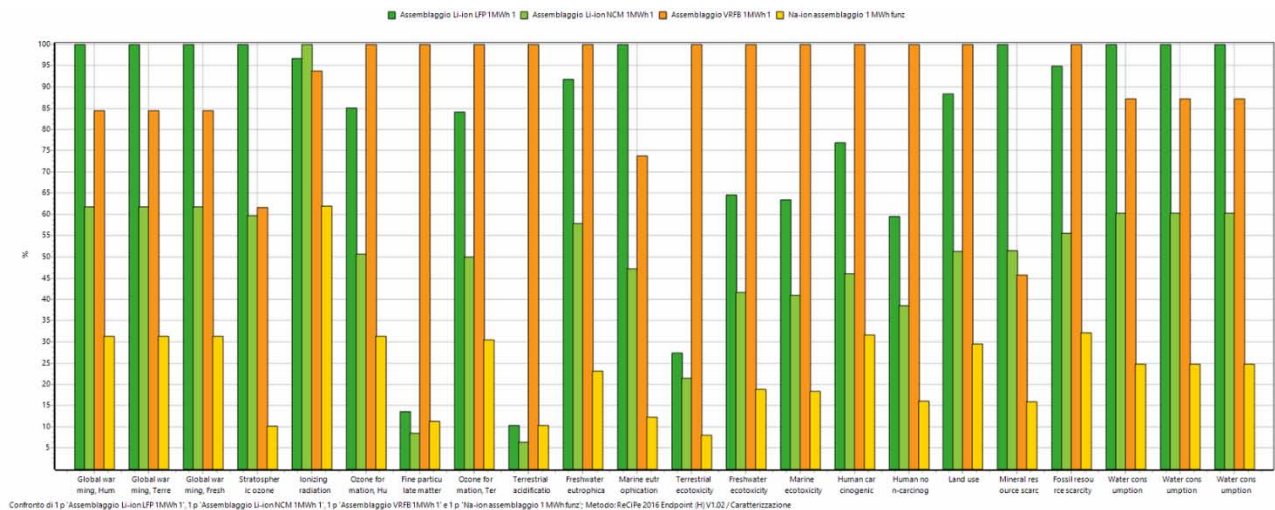


Figura 24: Caratterizzazione - confronto tra le tecnologie di accumulo

In relazione agli indicatori di tossicità ed eutrofizzazione delle acque, gli impatti sono principalmente imputabili all'utilizzo di alluminio invece che rame come collettore; il rame infatti risulta essere una sostanza molto critica per questi indicatori (14,7% per LPF, 14,3% NCM, 69% per VRFB, 0,03% Na-ion).

Le elevate quantità di elettrolita al pentossido di vanadio nella VRFB la rendono la batteria più impattante in quasi tutti gli indicatori. Inoltre, il sistema di gestione per questo tipo di batteria risulta molto grande rispetto a quello per tutte le altre tecnologie considerate; ciò incrementa la quantità di metalli preziosi all'interno dell'insieme che incidono in particolar modo su eutrofizzazione, deplezione e tossicità dei metalli.

In relazione alla mineral resource scarcity le quantità di litio presenti nella LFP e nella NCM danno un contributo all'indicatore del: 42,7% LPF (1.16e3 USD2013), 32% NCM (443 USD2013). L'incidenza del rame è al 4% LPF, a 4,6% NCM, al 64,4% per la VRFB e allo 0,02% Na-ion; partecipano all'indicatore anche l'alluminio, presente in quantità ridotte anche nella LPF (11,3%) e nella NCM (13,1%) e l'acciaio (2%) utilizzato principalmente negli involucri per le diverse tecnologie.

### 6.3 Considerazioni finali sull'LCIA delle batterie

Le batterie agli ioni di sodio sono risultate promettenti per tutti gli aspetti ambientali, mostrando, per MWh di capacità di stoccaggio, impatti ambientali all'estremità inferiore degli indicatori di impatto considerati rispetto alle attuali batterie. Il potenziale di miglioramento per questa tecnologia è ancora significativo e si rifà alla possibilità di ridurre ulteriormente gli impatti ambientali associati alla produzione dell'hard carbon per l'anodo e il contenuto di nichel nel materiale catodico attivo. La produzione del materiale catodico, risultato percentualmente rilevante in sede di valutazione dei danni della singola batteria, mostra la necessità di diminuzione dell'utilizzo di nichel, che porta ad alti impatti in diverse categorie, dall'estrazione del nichel alla produzione di nichel solfato come precursore del carbonato di nichel. Ridurre o eliminare il contenuto di nichel nel materiale catodico attivo dovrebbe quindi essere un altro obiettivo per ridurre gli impatti.

Per rendere meno impattante l'hard carbon, diversi studi propongono l'uso di rifiuti organici come valida alternativa alla produzione del materiale. (19) La possibilità di utilizzare l'alluminio sia per l'anodo che per il catodo evita l'utilizzo del rame, quest'ultimo è uno dei principali innalzatori degli impatti causati dalla produzione delle altre tecnologie.

Un altro fattore critico, specialmente sotto gli aspetti GWP, è il legante usato per la produzione di elettrodi. Il PVdF (polivinilfluoride) è usato come legante per il catodo, che è anche quello dominante nella LPF. La sua produzione è associata a emissioni molto elevate di gas e quindi concorrono con un importante contributo al

GWP. Di conseguenza, l'uso di leganti alternativi a base acquosa anche per il catodo potrebbe ridurre ulteriormente le emissioni di gas a effetto serra, sia per la batteria agli ioni di sodio sia che per la LPF.

La domanda di energia (elettricità e calore) per la produzione delle batterie agli ioni di sodio, ipotizzata equivalente alle altre tecnologie, è un fattore importante per gli impatti ambientali. Il miglioramento dell'efficienza energetica del processo di produzione, fortemente guidato dai forni necessari per l'assemblaggio delle celle, potrebbe ridurre gli impatti ambientali per tutte le diverse tipologie di accumulo confrontate.

Infine, la minimizzazione della quantità richiesta di componenti elettronici (cavi, BMS) potrebbe migliorare le prestazioni ambientali della Na-ion, contribuendo anche in modo significativo agli impatti generali. Ancora una volta, questo vale allo stesso modo per tutte le tecnologie esaminate, specialmente per le VRBF che presentano un'elevata % in peso di componenti associati al BMS.



## 7 Le isole italiane minori non interconnesse

Al fine di valutare gli impatti associati all'utilizzo degli accumulatori collegati agli impianti per la produzione di potenza e di verificare quanto questi ultimi potrebbero incidere su un miglioramento della qualità e quantità dell'energia prodotta da fonte convenzionale, si è scelto per ragioni di tipo applicativo di valutare alcuni possibili scenari sulle isole minori non interconnesse. È necessario specificare che le isole minori italiane non risultano connesse al sistema elettrico nazionale, si parla di impianti stand-alone; quindi mentre per la rete elettrica italiana la quota di energia 'green' prodotta negli ultimi dieci anni è stata tutto sommato considerevole, per queste isole i valori relativi alle FRNP risultano esigui e in alcuni casi inesistenti. Le motivazioni dietro questi bassissimi valori di diffusione delle fonti rinnovabili sono di diversa natura, e verranno spiegate dettagliatamente nei capitoli relativi agli scenari; in generale si può affermare che il vincolo più stringente per queste isole risulta essere di tipo legislativo e normativo, facente riferimento a restrizioni di tipo naturalistico e paesaggistico. Sono infatti presenti parchi marini, naturali, siti Unesco, aree di riproduzione per specie protette e aree di tutela ambientali; in un equilibrio così delicato, nonostante i numerosissimi progetti proposti per l'incremento della quota di rinnovabili, in queste isole, non risultano ad oggi installazioni FRNP superiori al 4% del fabbisogno totale. Un'altra importante considerazione riguarda la differenza nei consumi tra il periodo estivo e il periodo invernale; le isole minori incrementano fino al 70% la quota di utilizzo dell'energia elettrica nel periodo estivo rispetto a quello invernale, e ciò incide notevolmente sui rendimenti delle centrali elettriche presenti alimentate a fonte fossile, e genera allo stesso tempo forti scompensi alla rete elettrica locale. Il turismo per queste isole gioca un ruolo fondamentale e incide pesantemente sui consumi e sulle richieste energetiche. Va inoltre considerato che i dissalatori coprono una parte considerevole dei consumi e che la continuità del funzionamento della rete debba essere mantenuta per assicurare la fornitura di acqua potabile agli abitanti delle isole. Le problematiche fino ad ora esplicitate potrebbero essere fortemente ammortizzate tramite l'utilizzo dei sistemi di accumulo stazionario, questo infatti è uno dei motivi che hanno portato alla valutazione degli scenari in queste isole. Tramite i sistemi SdA come chiarito nel capitolo 4.2.1 sarebbe possibile una regolazione del peak shaving con livellamento dei picchi di domanda che si verificano durante la giornata, evitando l'intervento della generazione distribuita, l'esclusione di interruzioni di rete tramite le funzioni UPS, il mantenimento dell'equilibrio tra generazione e carico, la velocità di risposta in caso di picchi pronunciati di domanda che porterebbero al collasso dei precari equilibri di frequenza su quelle reti. L'SdA contribuisce alla regolazione primaria e al load levelling sul lungo termine, al supporto di tensione e al differimento di capitale.

Le sfide per le isole minori non interconnesse sono di rilevante attualità viste le indispensabili esigenze energetiche e gli ulteriori incentivi statali stanziati con il Decreto ministeriale 14 febbraio 2017 che definisce obiettivi e modalità di incentivazione per le energie rinnovabili nelle isole minori italiane non interconnesse alla rete elettrica. Il decreto punta alla valorizzazione delle elevate disponibilità di risorse energetiche rinnovabili presenti in questi territori e mira a limitare l'utilizzo delle fonti fossili attualmente esistenti per l'alimentazione delle centrali e trasportate via nave, con tutte le problematiche connesse.

È necessario sottolineare che alcune di queste isole vantano tra i più alti potenziali di soleggiamento e ventosità rispetto a tutta la penisola italiana e che al momento la produzione di elettricità viene assicurata tramite centrali termoelettriche, per la maggior parte a gasolio, controllate da società private che garantiscono la produzione e a distribuzione. Il costo di un sistema così poco efficiente incide sul costo medio della produzione elettrica con un incremento di 6 volte più elevato rispetto alla media nazionale, 0,39 €/kWh vs. 0,065 €/kWh (DCO 598/2014/R/eel, ARERA) (28). La maggiorazione sul costo è dovuta alla mancata possibilità di regolazione dei sistemi di produzione a diesel che devono funzionare a regime bruciando una quantità di gasolio di fatto non necessaria, e che incide maggiormente visto il costo del trasporto via nave.

La gestione del sistema elettrico che avviene in questo modo, con società che operano di fatto in regime di monopolio, ha determinato negli anni un'incentivazione all'utilizzo del gasolio che è sempre riuscita a penalizzare i differenti progetti per lo sfruttamento delle fonti FRNP.

Quindi la soluzione che si andrà a proporre negli scenari successivi non solo inciderà sugli impatti associati rispetto all'attuale soluzione e sulla stabilità della rete, ma anche dal punto di vista economico consentirebbe in pochi anni di ripagare gli investimenti effettuati grazie ai costi operazionali virtualmente nulli e metodologie di controllo attivo dei carichi.

Nel rapporto di Legambiente in collaborazione con il CRN (29) vengono indicati quelli i dati principali attorno ai quali sono stati sviluppati gli scenari dell'elaborato. Viene qui riportata una parte della tabella del rapporto (29) che evidenzia l'attuale copertura del fabbisogno elettrico da FRNP per le diverse isole e la presenza o meno degli impianti di dissalazione. La copertura del fabbisogno da FRPN è calcolata tramite la relazione tra la producibilità teorica delle FRNP e la produzione annua da fonte fossile, come da dall'Allegato 1 del Decreto MiSE 14 febbraio 2014.

Tabella 26: Situazione attuale isole minori non interconnesse (Fonte: Terna, 2019 - Ispra, 2017)

Isola	Arcipelago	Energia: copertura fabbisogno elettrico da FER (%) <sup>*</sup>	Rifiuti: incidenza raccolta differenziata (%) <sup>**</sup>	Acqua: modalità approvvigionamento idrico	Depurazione: presenza trattamento acque reflue
Capri	Campano	0,35%	59,4%	Condotte sottomarine dalla penisola sorrentina	Si
Capraia	Toscano	0,78%	29,9%	Dissalatore	No
Isola del Giglio		0,45%	25,7%	Dissalatore	No
Pantelleria ●	Pelagie	2,12%	68,0%	Dissalatori	Si
Lampedusa		0,48%	21,4%	Dissalatore	No
Linosa				Dissalatore	No
Ponza	Pontine	1,39%	6,3%	Dissalatore mobile e navi cisterna. Dissalatore fisso in attesa di installazione.	No
Ventotene ●		5,11%	44,1%	Dissalatore e navi cisterna. Prevista pieno approvvigionamento da dissalatore entro il 2019.	Si

Il MiSE-Decreto del Ministero dello sviluppo economico di spinta alle fonti rinnovabili nelle isole minori, del 2017, prevede entro il 2020 l'incentivazione alle forme di energia pulita con obiettivi di riduzione della fonte convenzionale e incremento delle quote di potenza FRNP visibili in Tabella 27. Tuttavia, ad oggi manca ancora la delibera dall'Autorità per l'energia, che deve fissare le regole per l'accesso alle incentivazioni. I successivi decreti aggiorneranno le scadenze al 2030.

Tabella 27: Il triplice obiettivo fissato dal Decreto MiSE

Isola	Obiettivo potenza FER (kWe) (Art. 2, comma 1, lettera b) (1)	Obiettivo superficie solare termico (m <sup>2</sup> ) (Art. 2, comma 1, lettera a) (2)	Obiettivo di riduzione della produzione elettrica annua convenzionale (Art. 6, comma 1, lettere a, b, c, d) (3)
Capraia	180	250	50%
Isola del Giglio	700	780	50%
Ponza	720	870	50%
Ventotene ●	170	200	50%
Tremiti*	240	290	50%
Favignana	900	1.070	50%
Levanzo	40	40	50%
Marettimo	120	150	40%
Pantelleria ●	2720	3.130	40%

Gli scenari che verranno presentati avranno come obiettivo l'introduzione di quote, in certi casi significative, di fonti rinnovabili e sistemi di accumulo in parallelo alla rete. Per le isole analizzate le percentuali di diminuzione dell'utilizzo della fonte convenzionale tengono conto delle quote previste dal sopracitato decreto. Si sono dunque introdotti sistemi energetici di gestione della potenza prodotta SdA, impianti fotovoltaici ed eolici per raggiungere valori di riduzione della quota di termo-generazione delle centrali a gasolio del 40-50% rispetto ai fabbisogni energetici annuali delle isole. Vengono ora presentate le isole prese in esame con l'obiettivo di definire i valori e dati principali dei contesti che verranno poi considerati come riferimento nei diversi scenari.

## 7.1 Ventotene

Ventotene è un comune della provincia di Latina che si estende sull'isola di Ventotene e sulla vicina più piccola isola di S. Stefano, entrambe nell'arcipelago delle Ponziane e di origine vulcanica. La popolazione residente sull'isola conta 775 presenze che nel periodo estivo aumentano fino a 2500 unità dovute al fiorente turismo presente sull'isola. L'area dell'isola che si estende a forma allungata in direzione nordovest-sudest è 1.4 km<sup>2</sup>, sul territorio isolano sono presenti 1.74 km<sup>2</sup> di aree naturali protette e 28 km<sup>2</sup> di aree marine di tutela. Sull'isola incidono i consumi energetici dovuti alla presenza del depuratore e del dissalatore per la produzione di acqua potabile (166 migliaia di m<sup>3</sup> annui). Questi due impianti a pieno regime contribuiscono ad una quota consistente del fabbisogno elettrico dell'isola.

L'alimentazione elettrica è garantita dalla centrale termoelettrica di proprietà di ENEL distribuzione, che è costituita da n°4 gruppi da 480 kW con alimentazione a diesel. Il trasporto del combustibile alla centrale avviene tramite nave in un'area dedicata all'attracco nell'isola, proprio la necessità di queste grandi navi è stata negli anni fonte di forte polemica da parte delle associazioni ambientaliste locali.

Le installazioni di FRNP contribuiscono alla generazione elettrica per una quota pari al 4.4% del fabbisogno annuale dell'isola; 0.2% dovuto ad installazioni di microeolico per una quota totale di 3 kW e 97 kW di impianti fotovoltaici residenziali, 4.2%. Rispetto alla Tabella 26, in cui Terna propone il calcolo rispetto ai dati forniti dal MiSE2014, negli ultimi anni si è verificato un incremento della domanda energetica sull'isola che ha quindi aumentato il fabbisogno totale energetico facendo calare la quota percentuale della copertura da fonti FRNP. Negli scenari successivi verranno condotte le diverse analisi facendo riferimenti alle quote aggiornate e ai crescenti fabbisogni dimostrati dai valori dello scorso anno, 2019. La Figura 25 descrive la diversificazione energetica e i fabbisogni dell'isola.

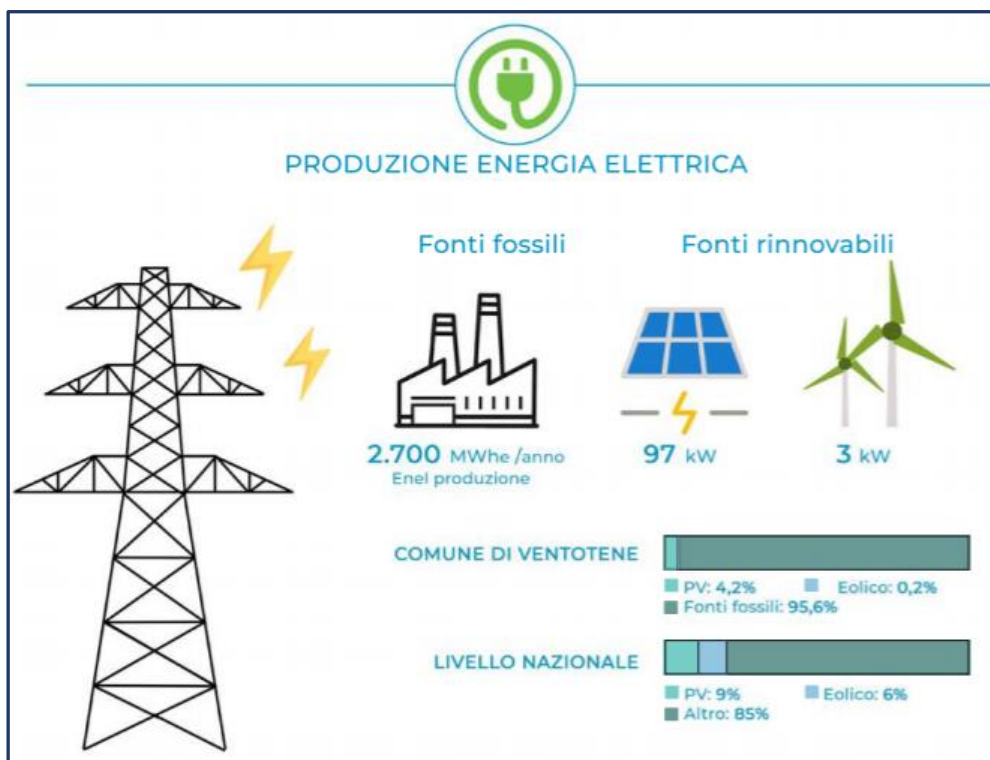


Figura 25: Diversificazione energetica e fabbisogno sull'isola di Ventotene (Fonte: Legambiente-CNR, 2019)

### 7.1.1 Il calcolo del combustibile risparmiato - Ventotene

Vengono ora qui presentate alcune delle ipotesi e calcolazioni prese in esame per la valutazione degli scenari, vengono spiegati i metodi di calcolo e le assunzioni fatte in modo da rendere poi più fluida la spiegazione degli scenari che si andranno ad analizzare.

Come già definito al capitolo 7.1, la richiesta energetica è molto variabile durante l'arco dell'anno, per la marcata presenza estiva del turismo. Il funzionamento dei generatori elettrici durante il picco di domanda estiva è al 52%, mentre nel resto dell'anno il funzionamento al minimo tecnico è del 30%. Per valutare il risparmio energetico che si otterrebbe tramite l'introduzione del sistema di accumulo con funzionamento il parallelo all'impianto di potenza, si ipotizza un risparmio netto di combustibile. La quantità viene calcolata facendo riferimento ai valori del potere calorifico inferiore (PCI) del combustibile utilizzato nella centrale, per Ventotene gasolio, alla quantità energetica che si evita di produrre e all'efficienza media attesa per la centrale.

Viene utilizzata per il calcolo la seguente formula:

$$E = PCI \cdot x \cdot \eta$$

Nella quale  $E$  coincide con il valore energetico, quantità, che si ipotizza di non produrre [kWh],  $x$  indica l'ammontare di combustibile risparmiato i litri (l),  $PCI$  potere calorifico inferiore espresso [kWh/l] ed infine  $\eta$  fa riferimento al rendimento medio atteso dalla centrale.

Si è quindi considerata una media del rendimento dei generatori a gasolio, tra il periodo di funzionamento a carico parziale e quello a pieno carico del periodo estivo, pari a 0.41.

Per la centrale termoelettrica di Ventotene il risparmio energetico per MWh accumulato all'interno dell'accumulatore è pari a 246.9 l/MWh<sup>-1</sup>.

Utilizzando un valore medio di densità del gasolio, pari a 0.835 kg m<sup>-3</sup> e moltiplicando il valore appena ottenuto in [l/MWh] si ottengono i kg di combustibile risparmiato per MWh accumulato, nel caso di Ventotene 206,1 kg MWh<sup>-1</sup>.

Tabella 28: Calcolo del combustibile risparmiato per MWh stoccato - Ventotene

Combustibile risparmiato	Rendimento	Combustibile R. (l/MWh)	combustibile R. (kg/MWh)	PCI	Densità gasolio
Periodo Estivo	0,52	194,6	162,5	9,88	0,835
Periodo Invernale	0,3	337,4	281,7		
<b>MEDIA</b>	<b>0,41</b>	<b>246,9</b>	<b>206,1</b>		

Questi valori qui presentati risulteranno fondamentali in fase di analisi dei vari scenari proposti. Con i valori appena ottenuti si andrà a valutare l'energia stoccata all'interno degli accumulatori nell'arco di un anno, che corrisponderà ad una quota del fabbisogno dell'isola coperto da energia immagazzinata nell'accumulatore e quindi non prodotta dalla centrale termoelettrica. Moltiplicando il valore ottenuto della totale energia non prodotta in MWh per il valore in [l/MWh] si ottengono i litri totali di combustibile non utilizzato.

Il valore verrà moltiplicato nei diversi scenari ipotizzati per l'isola di Ventotene in relazione alla taglia prevista per l'accumulatore e al numero di cicli della batteria considerati.

Infine comparando il fabbisogno annuale da centrale termoelettrica e il valore finale dello scenario ipotizzato diminuito della quota stoccata nell'accumulatore si ottiene la percentuale di riduzione dell'utilizzo della fonte convenzionale; come già introdotto al Capitolo 7 verranno calcolate le quote di energia FRNP e di taglia dell'accumulatore necessarie a ridurre l'utilizzo della fonte convenzionale del valore percentuale indicato dal Decreto MiSE 2017.

### 7.1.2 La fonte solare sull'isola di Ventotene

L'isola di Ventotene, insieme ad altre isole minori italiane, vanta tra i potenziali solari più alti dell'intera penisola. La radiazione solare media globale soprattutto alle longitudini più meridionali tocca punte di 1879 e 1876 kWh/m<sup>2</sup> anno. La media complessiva calcolata su tutte e 20 le isole minori italiane fornisce il valore di 1745 kWh/m<sup>2</sup> anno. Si è voluto calcolare nel dettaglio la radiazione media solare globale annua per l'isola di Ventotene e si è ricorso all'utilizzo dell'atlante solare Sun RiSE di RSE. È dapprima necessario ricordare che, come visibile in Figura 26, sull'isola insistono zone di protezione speciale ZPS, "important bird areas" IBA, siti di importanza comunitaria SIC, aree protette EUAP. La realizzazione di infrastrutture per l'energia in zone così complesse dal punto di vista della tutela e biodiversità è sempre una sfida, che talvolta si scontra anche con le comunità locali.

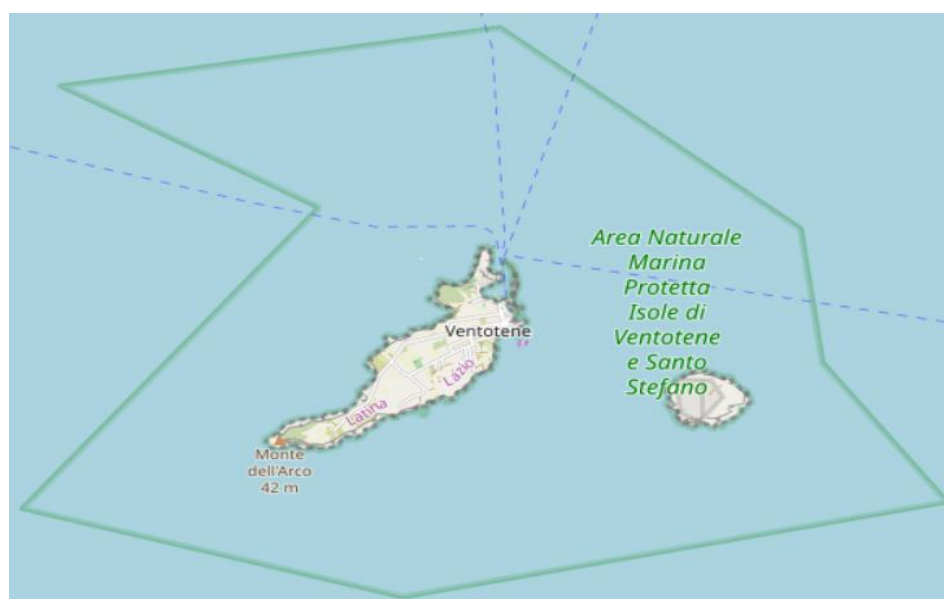


Figura 26: Area Ventotene, zone protette (RSE, 2020)

Tuttavia, i valori della radiazione globale incidente sull'isola sono molto elevati e il loro mancato sfruttamento comporta un elevato spreco in termini energetici. L'atlante solare di RSE indica come energia cumulata giornaliera, al suolo, su piano orizzontale riferita ai valori dell'elaborazione dati dell'archivio RADSAP, che il valore di agosto 2019 sull'isola è stato nel range di 6.91-8.00 kWh/m<sup>2</sup>, il massimo disponibile, come visibile in Figura 27.

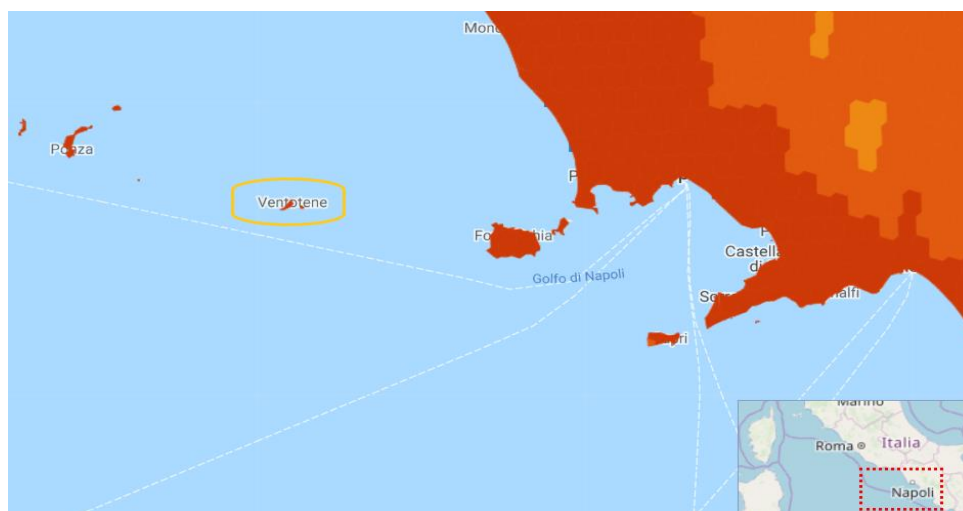


Figura 27: Energia giornaliera (media Agosto, 2019) [kWh/m<sup>2</sup>]

I dati per le diverse mensilità vengono calcolati tramite Solaritaly, ENEA. I valori vengono riportati in Tabella 29; la radiazione globale annua calcolata per un anno convenzionale di 365.25 giorni è di 1563 kWh/m<sup>2</sup> anno.

Tabella 29: Calcolo della radiazione solare globale giornaliera media mensile (Rggmm) su superficie orizzontale ENEA-SOLTERM-Ventotene

<b>Dati di input:</b>		
Coordinate della località:		
- latitudine: 40°47.3'		
- longitudine: 13°25'		
<b>Mese</b>	<b>Rggmm su sup.orizz.</b>	<b>U.misura</b>
Gennaio	2,09 kWh/m2	
Febbraio	2,86 kWh/m2	
Marzo	4,05 kWh/m2	
Aprile	5,12 kWh/m2	
Maggio	6,18 kWh/m2	
Giugno	6,67 kWh/m2	
Luglio	6,7 kWh/m2	
Agosto	5,85 kWh/m2	
Settembre	4,57 kWh/m2	
Ottobre	3,32 kWh/m2	
Novembre	2,13 kWh/m2	
Dicembre	1,72 kWh/m2	

Accertata la disponibilità della fonte solare si è provveduto ad un dimensionamento di massima della potenza da fonte solare installabile. Considerate le zone di tutela e la piccola area dell'isola si esclude la possibilità di installare pannelli fotovoltaici a terra; nell'ambito privato sarebbero disponibili diverse aree, ad oggi, dedicate a coltivazione che potrebbero soddisfare le caratteristiche per gli impianti a terra; tuttavia nell'ambito di tutela del paesaggio, dal punto di vista visivo i possibili impianti inciderebbero notevolmente. Si è quindi pensato ad una possibile soluzione alternativa che prevede lo sfruttamento dei tetti delle abitazioni residenziali dell'isola. Progetti di questo tipo sono già stati applicati; nell'isola dell'arcipelago di El Hierro, ad esempio, sono stati installati pannelli fotovoltaici sui tetti di oltre 10000 abitazioni di famiglie residenti, diventando uno degli esempi da seguire a livello internazionale come isola 'green' 100%, completamente autosufficiente grazie alle rinnovabili. (30)

Si è proceduto dunque con quest'ipotesi: sono presenti sul territorio isolano 548 edifici, dei quali 7 risultano disabitati. 437 edifici sono adibiti ad ambito residenziale con 427 costruiti in muratura portante. Va inoltre considerato che 409 sono considerati in ottimo stato mentre gli altri risultano in diversi modi compromessi (31).

Si deve tener conto che la visualizzazione tramite Google Street Viewer consente di individuare i tetti degli edifici, e si può affermare che la maggior parte di questi sia piatto. Il tetto piatto da un lato consente installazioni fotovoltaiche più semplici e meno costose, dall'altro indica in certi casi l'abitabilità del tetto.

Nei diversi scenari si sono ipotizzate quote di energia da fonte solare differenti, con conseguente numero di tetti da rendere disponibili per le installazioni. Il dimensionamento è stato fatto considerando valori standard di potenza e area necessaria all'installazione. In linea generale si sono considerati impianti per singola abitazione da 3 kW. Un impianto da 3 kW risulta generalmente composto di 12 pannelli fotovoltaici considerati da 250 W di picco. Le dimensioni standard di questi pannelli sono di 1m di larghezza per 1.6 m di altezza, si può definire l'area necessaria ad ogni installazione di almeno 20 m<sup>2</sup>. Negli scenari le ipotesi visibili in Tabella 30, questi dati verranno utilizzati considerando la potenza totale che si vuole rendere disponibile per l'intera isola, e alla producibilità che verrà calcolata sulla base della potenza ipotizzata e del numero di ore di funzionamento degli impianti nell'arco dell'anno.

Tabella 30: Ipotesi per il dimensionamento degli impianti fotovoltaici

Ventotene	Quantità	Unità
impianto residenziale standard	3	KW
Num. pannelli per impianto	12	unita
Dimensioni pannello	1*1,6	m2
Potenza di picco per singolo pannello	250	Wp

### 7.1.3 La fonte eolica sull'isola di Ventotene

La fonte eolica su Ventotene risulta presente con discreti valori. La media per le isole minori italiane indica un valore di velocità media complessiva del vento pari a 4.3 m/s (32), un valore sopra la media rispetto al valore medio nazionale. Anche per la fonte eolica si è voluto verificare la ventosità presente sull'isola attraverso l'utilizzo dell'atlante eolico di RSE. La valutazione ha fornito il risultato visibile in Figura 28.

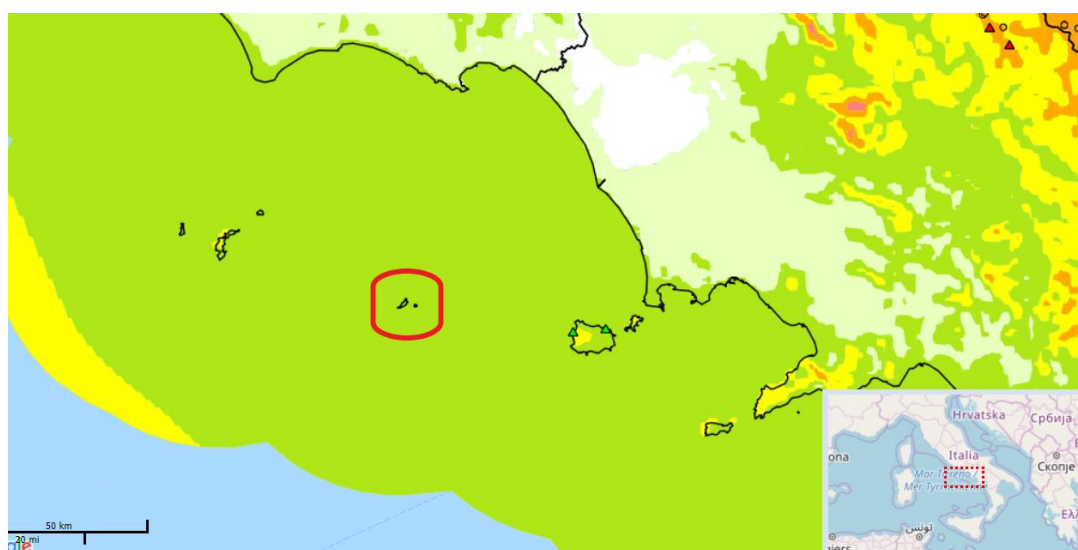


Figura 28: Velocità media annua del vento a 25 m s.l.t./s.l.m (ATLAEOLICO-RSE, 2020)

Evidenziata in rosso, l'isola di Ventotene mostra valori di velocità media annua del vento a 25 m s.l.t./s.l.m nel range di 4-5 m s<sup>-1</sup>. La producibilità specifica indicata dall'atlante risulta compresa tra i 1000-1500 MWh per MW di potenza eolica installata. I valori non consentono l'installazione di grandi turbine per il convogliamento della potenza del vento, ma tramite l'utilizzo di aerogeneratori per il minieolico o comunque di taglia modesta si consentirebbe di sfruttare la potenzialità della fonte. Prima di introdurre le ipotesi fatte per il dimensionamento degli impianti eolici che si andranno a ipotizzare sull'isola è necessario tener conto anche in questo caso dei vincoli ambientali. Il valore fornito dall'atlante eolico per velocità media annua del vento a 50 m s.l.t./s.l.m, diventa di 2000-2500 MWh/MW, il valore è ovviamente più promettente ma ipotizzare turbine con mozzo ad altezza di 50 m risulterebbe inutile visto l'impatto visivo che andrebbe a creare e i ben noti problemi di rumorosità che potrebbero incidere sulla fauna e le aree di riproduzione degli uccelli. Nell'atlante eolico è possibile effettuare simulazioni con l'utilizzo di diverse tipologie di aerogeneratore. La scelta della tecnologia è avvenuta sulla base dell'ingombro e dell'altezza dell'aerogeneratore, oltre che considerando i valori di potenza degli aerogeneratori, in modo da rispettare gli stringenti vincoli ambientali. L'aerogeneratore

SEI EOL 60 17 60 kW ha una torre con altezza pari a 15 m e un diametro di rotore di 17.7 m. Vengono ora riportate le tabelle e i grafici relativi alla simulazione effettuata con il suddetto aerogeneratore.

Dati relativi alla risorsa eolica del sito

Velocità media annua del vento ad altezza mozzo (15 m) [m/s]:

Fattore di forma k della distribuzione di Weibull:

Velocità caratteristica A della distribuzione di Weibull:

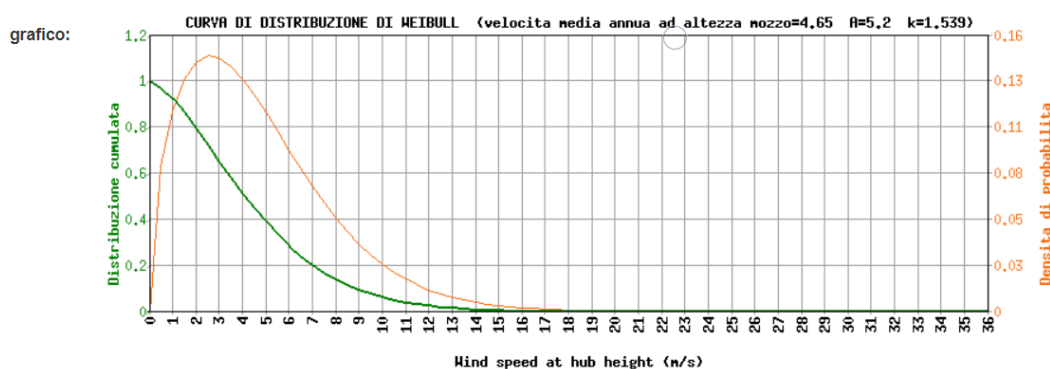


Figura 29: Risorsa eolica Ventotene con aerogeneratore SEI SOL 60 17 60 KW

Come si può vedere in Figura 29, la velocità media annua del vento ad altezza del mozzo dell'aerogeneratore è di 4.65 m/s, e la velocità della caratteristica della distribuzione di Weibull riporta un valore maggiore di 5 m/s. Un'altra tipologia di aerogeneratore considerato per Ventotene è stato l'NPS 20-18 con altezza della torre pari a 24 m e un diametro da 17.6 m come il precedente, la curva che si ottiene è visibile in Figura 30.

Dati relativi alla risorsa eolica del sito

Velocità media annua del vento ad altezza mozzo (24 m) [m/s]:

Fattore di forma k della distribuzione di Weibull:

Velocità caratteristica A della distribuzione di Weibull:

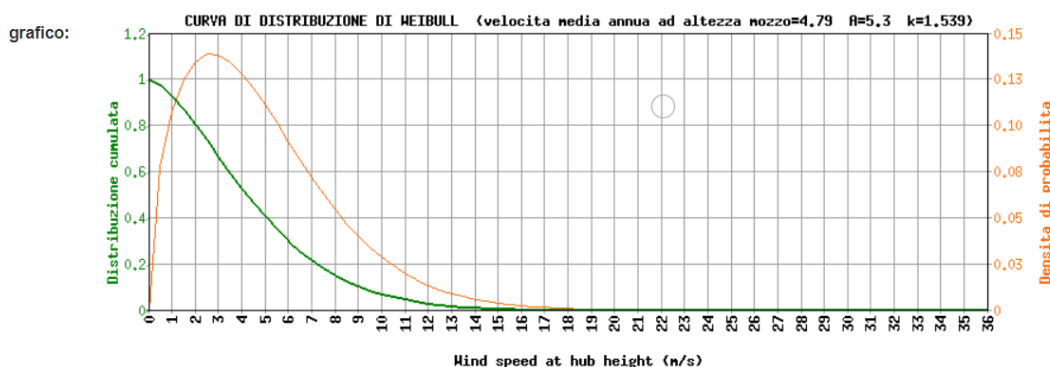


Figura 30: Risorsa eolica Ventotene con aerogeneratore NPS 20-18

Il valore di velocità media annua risulta leggermente più alto rispetto alla configurazione precedente, e così pure la velocità della distribuzione di Weibull. Questi valori più elevati sono giustificabili con la maggior altezza del mozzo da terra, considerando i vincoli ambientali, tuttavia, la soluzione migliore porterebbe ad una scelta basata sul minimo ingombro dell'aerogeneratore e quindi alla turbina SEI SOL 60 17 60.



Negli scenari considerati sono stati presi a riferimento i valori forniti dall'atlante eolico, che consentono la valutazione delle prestazioni con riferimento alla taglia degli impianti; si calcolerà successivamente la producibilità annua mettendo in relazione la potenza scelta per l'impianto e il numero di ore di funzionamento della turbina nell'arco dell'anno, in base allo scenario considerato.

## 7.2 Pantelleria

L'isola di Pantelleria è un comune siciliano della provincia di Trapani, l'isola ha un'estensione di 80 km<sup>2</sup>, che si trova a sud-ovest rispetto alla Sicilia e a nord est sopra la Tunisia. Il territorio è di origine vulcanica e conta nel suo punto massimo un'altezza di 836 m sul livello del mare. L'isola è dotata di un aeroporto che vincola ulteriormente i progetti di installazione degli impianti sull'isola. La popolazione residente è di 7962 abitanti che nel periodo estivo arrivano a 20000. In Figura 31 è visibile in rosso l'incremento nel consumo elettrico dovuto al turismo.

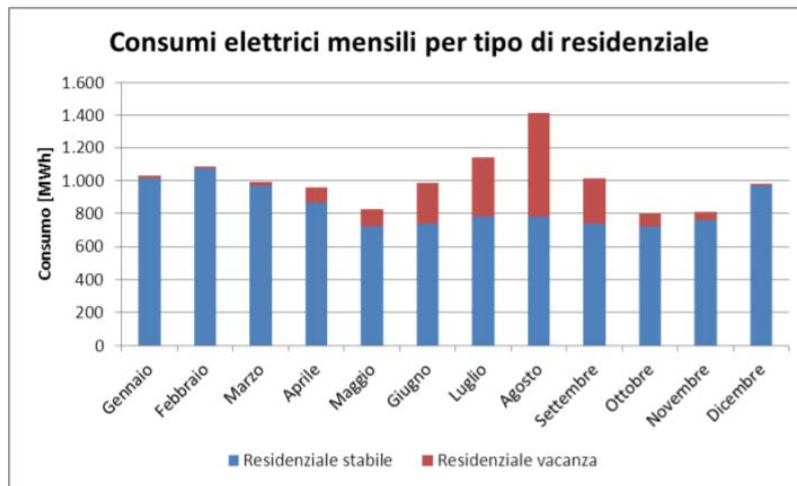


Figura 31: Consumi elettrici mensili in ambito residenziale - Pantelleria (Comune di Pantelleria, 2017)

Sull'isola insiste una area naturale protetta di 65 km<sup>2</sup>, meno di 1/3 del territorio risulta senza limitazioni ma tuttavia le aree di nidificazione delle specie protette sono presenti su tutta l'area dell'isola (IBA). Sono presenti due impianti di dissalazione per la fornitura di acqua potabile (1068 migliaia di m<sup>3</sup> annui) e l'impianto di depurazione delle acque scure. Il dissalatore incide fortemente sul fabbisogno annuo. La fornitura di energia elettrica viene assicurata tramite una centrale a gasolio, e il fabbisogno annuo dell'isola è stato per l'anno 2019 pari a 44.170 MWh. L'alimentazione della centrale termoelettrica a gasolio viene rifornita anche in questo caso tramite navi petroliere. Le installazioni di FRNP contribuiscono alla soddisfazione dei fabbisogni energetici dell'isola soltanto al 1.9%, la quota di fotovoltaico è di 647 kW, mentre risultano installate due microturbine eoliche per un totale di 32 kW ovvero lo 0.1% del fabbisogno totale.

L'evoluzione della produzione di energia elettrica sull'isola ha portato rispetto ai valori del 1990 un incremento della domanda del 128%, con conseguente aumento dei consumi di gasolio per l'alimentazione della centrale SMEDE. È quindi indispensabile cercare soluzioni sostenibili per soddisfare la crescente domanda energetica in loco. Sull'isola di Pantelleria sono stati presentati numerosissimi progetti per l'efficientamento energetico e l'incremento della sostenibilità, sia piani che prevedevano l'incremento dell'efficienza degli edifici residenziali e non, sia progetti per l'installazione di fonti alternative, compreso il geotermico viste le buone caratteristiche dell'isola. Tuttavia, i vari progetti si sono sempre scontrati con la lentezza della burocrazia e l'autorità energetica. Uno studio che invece è stato accolto di buon grado è ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) del quale si è iniziata la sperimentazione ancora nel 2015, un sistema per la conversione del moto ondoso del mare che è stato posizionato a 800 m dalla costa dell'isola. La fase di test è stata conclusa e i dati sono stati soddisfacenti, si è ora in attesa di un'installazione definitiva.

La Figura 32 mostra la diversificazione energetica e il fabbisogno attuale dell'isola di Pantelleria, i valori verranno utilizzati per la modellazione degli scenari essendo aggiornati all'anno precedente, in questo modo si riesce ad ipotizzare uno scenario quanto più conforme alla realtà.

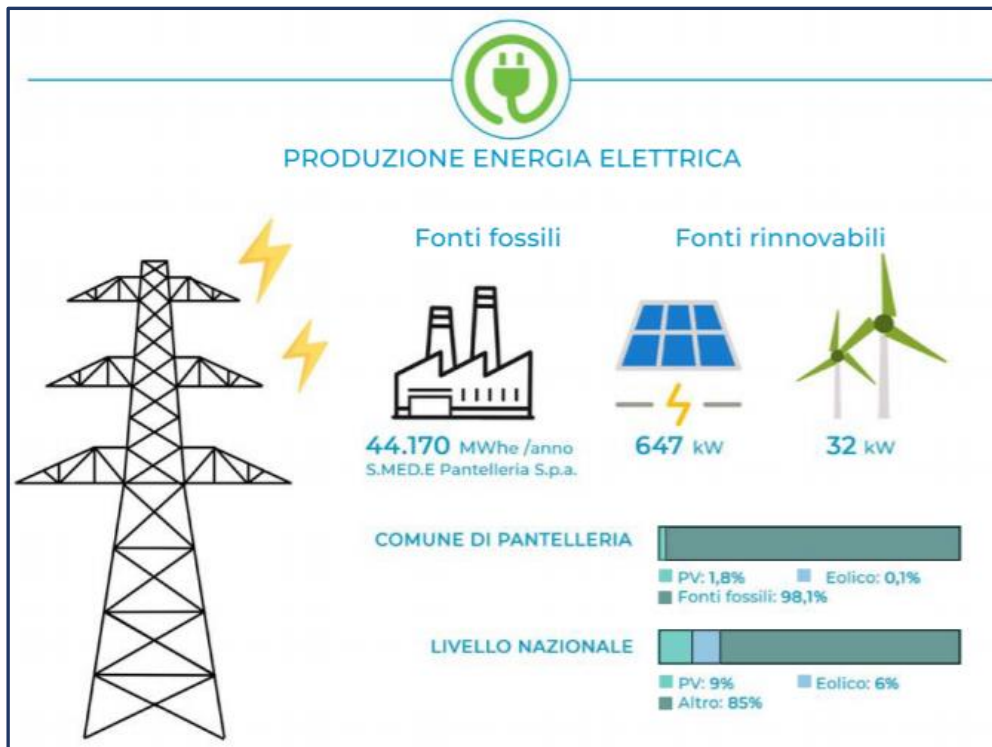


Figura 32: Diversificazione energetica - Pantelleria

### 7.2.1 Il calcolo del combustibile risparmiato -Pantelleria

Per il calcolo del combustibile risparmiato rispetto alla produzione convenzionale affidata ai generatori a diesel della centrale termoelettrica di Pantelleria, si è proceduto utilizzando lo stesso metodo e le stesse assunzioni fatte per Ventotene nel capitolo 7.2.1. La produzione elettrica sull'isola di Pantelleria è affidata alla società S.MED.E Pantelleria S.p.a, una società privata che opera sull'isola sia come ente produttore che distributore. La centrale termoelettrica è costituita da 8 gruppi elettrogeni per un totale di 20 MW. Il consumo annuale di energia elettrica nell'isola di Pantelleria risulta essere del 30% più elevato rispetto alla media nazionale, si calcola un consumo medio pro-capite di 1500 kWh rispetto ai 1200 kWh della media italiana e il dato risulta in crescita soprattutto facendo riferimento al fabbisogno domestico. I rendimenti estivi e invernali della centrale termoelettrica risultano anche nel caso di Pantelleria influenzati dal turismo estivo. Si considerano il funzionamento al minimo tecnico al 30% mentre per quello a pieno carico 48%.

Viene utilizzata per il calcolo la medesima formula utilizzata precedentemente:

$$E = PCI \cdot x \cdot \eta$$

Nella quale  $E$  coincide con il valore energetico, quantità, che si ipotizza di non produrre [kWh],  $x$  indica l'ammontare di combustibile risparmiato i litri (l),  $PCI$  potere calorifico inferiore espresso [kWh/l] ed infine  $\eta$  fa riferimento al rendimento medio atteso dalla centrale.

Il rendimento medio calcolato è quindi di 0.39, e si procede con la valutazione della quantità di combustibile risparmiata per MWh accumulato nella batteria. Si assume il PCI del gasolio pari a 9.88 kWh/l e la sua densità  $0.835 \text{ kg m}^{-3}$ .

Tabella 31: Calcolo del combustibile risparmiato per MWh stoccato - Pantelleria

Combustibile risparmiato	Rendimento	Combustibile R. (l/MWh)	combustibile R. (kg/MWh)	PCI	Densità gasolio
rend estate	0,48	210,9	176,1	9,88	0,835
rend inverno	0,3	337,4	281,7		
<b>MEDIA</b>	<b>0,39</b>	<b>259,5</b>	<b>216,7</b>		

Si evince dalla Tabella 31 che il combustibile risparmiato per MWh stoccato nella batteria è pari a 259.5 l/MWh, moltiplicando il valore appena trovato per la densità del gasolio si ottengono 216.7 kg MWh<sup>-1</sup>.

Il valore verrà utilizzato negli scenari ipotizzati per l'isola di Pantelleria, verrà ogni volta moltiplicato per il numero di MWh accumulati consentendo di ottenere i risparmi associati alle diverse taglie di accumulatori ipotizzati e ai diversi numeri di cicli considerati.

Infine comparando il fabbisogno annuale da centrale termoelettrica e il valore finale dello scenario ipotizzato diminuito della quota stoccata nell'accumulatore, si ottiene la percentuale di riduzione dell'utilizzo della fonte convenzionale; come già introdotto al capitolo 7 verranno calcolate le quote di energia FRNP e di taglia dell'accumulatore necessarie a ridurre l'utilizzo della fonte convenzionale del valore percentuale indicato dal Decreto MiSE 2017.

## 7.2.2 La fonte solare sull'isola di Pantelleria

L'isola di Pantelleria insieme a quella di Favignana vanta il potenziale solare più elevato di tutta la penisola, la radiazione solare media globale annua tocca punte di 1876 e 1879 kWh/m<sup>2</sup>/anno nei mesi estivi. Un così elevato potenziale rispetto ad una così bassa penetrazione delle rinnovabili in quest'isola rappresenta un vero spreco energetico. Andando nel dettaglio tramite l'atlante solare Sun Rise di RSE vengono presentati i potenziali solari sul territorio isolano. Vengono anche qui poste in evidenza anche quelle che sono le aree protette dell'isola in modo da tenere in considerazione le difficoltà con cui si scontrano i vari progetti che propongono l'installazione dei nuovi impianti Figura 33.

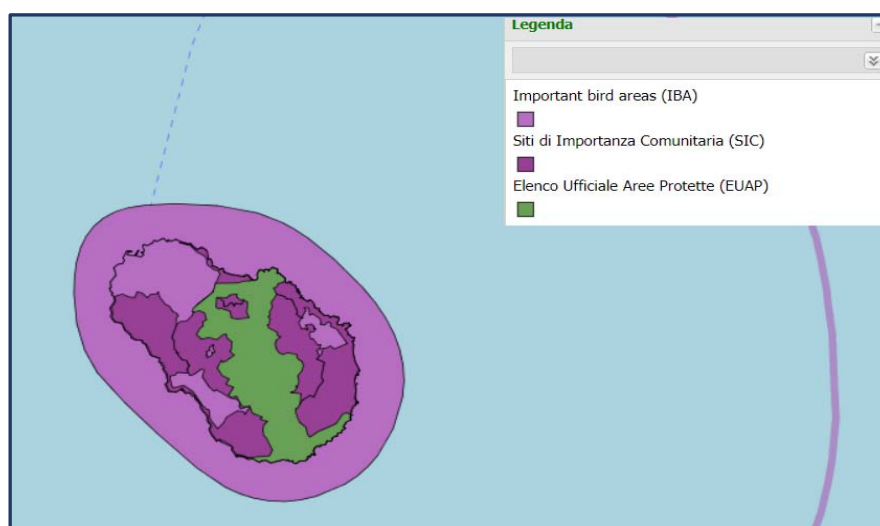


Figura 33: Aree di interesse naturalistico-ambientali. Pantelleria (RSE, 2020)

L'atlante solare di RSE indica che, l'energia media giornaliera, al suolo, su piano orizzontale (riferita ai valori dell'elaborazione dati dell'archivio RADSAF), mostra il valore di agosto 2019 compreso nel range di 6.91-8.00 kWh/m<sup>2</sup>, il massimo disponibile, come visibile in Figura 34.

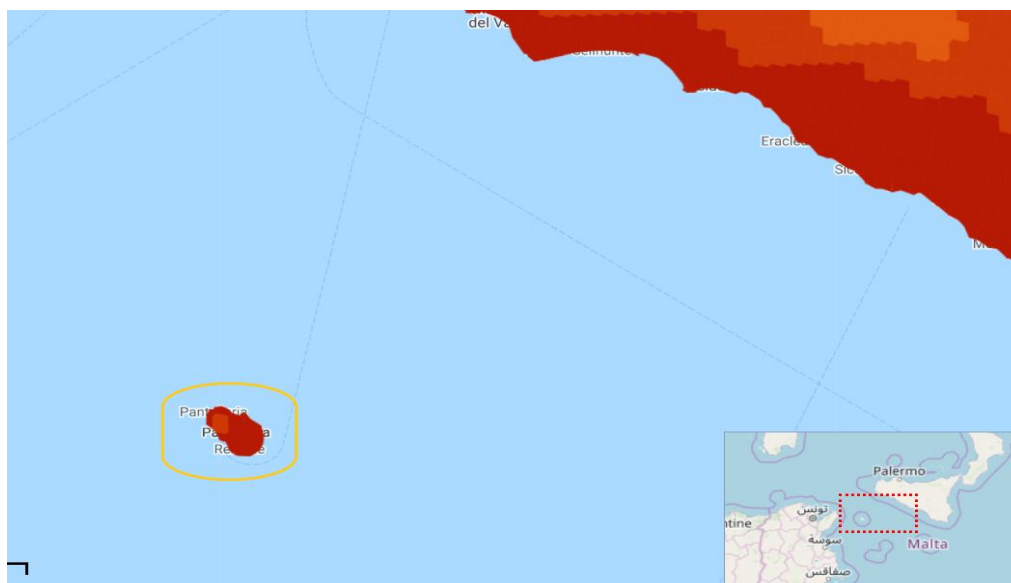


Figura 34: Energia giornaliera (media Agosto, 2019) [kWh/m<sup>2</sup>] - Pantelleria

I valori dell'irradiazione globale annua calcolata su di un arco temporale di un anno convenzionale di 365.25 giorni è di 1779 kWh/m<sup>2</sup>, la Tabella 32 riporta i dati, implementati tramite "solaritaly. ENEA", della radiazione solare globale giornaliera media mensile (Rggmm) su superficie orizzontale. La tabella mostra valori ben più alti se confrontati con quelli dell'isola di Ventotene in Tabella 29.

Tabella 32: Calcolo della radiazione solare globale giornaliera media mensile (Rggmm) su superficie orizzontale ENEA-SOLTERM - Pantelleria

<b>Dati di input:</b>		
Coordinate della località:		
- latitudine: 36°46.9'		
- longitudine: 12°0.7'		
<b>Mese</b>	<b>Rggmm su sup.orizz.</b>	<b>U.misura</b>
Gennaio	2,52	kWh/m <sup>2</sup>
Febbraio	3,36	kWh/m <sup>2</sup>
Marzo	4,4	kWh/m <sup>2</sup>
Aprile	5,44	kWh/m <sup>2</sup>
Maggio	6,4	kWh/m <sup>2</sup>
Giugno	6,7	kWh/m <sup>2</sup>
Luglio	6,75	kWh/m <sup>2</sup>
Agosto	6	kWh/m <sup>2</sup>
Settembre	4,84	kWh/m <sup>2</sup>
Ottobre	3,73	kWh/m <sup>2</sup>
Novembre	2,67	kWh/m <sup>2</sup>
Dicembre	2,26	kWh/m <sup>2</sup>

La disponibilità della fonte consente quindi le installazioni dei pannelli: l'isola di Pantelleria a differenza di Ventotene può contare su un più vasto territorio con zone limitrofe all'aeroporto soggette a vincoli di altezza, che non consentono quindi l'installazione delle turbine eoliche, ma prive di altre restrizioni che potrebbero quindi ospitare seppur in aree di grandezza limitata gli impianti fotovoltaici a terra. Con l'ausilio di Google Street Viewer si è proceduto allo stesso modo utilizzato per Ventotene e si valutata la possibilità di installazioni fotovoltaiche obbligate sui tetti degli edifici pubblici e residenziali. Il tema è già stato dibattuto più volte per quest'isola e diversi progetti avevano indicato come soluzione per la sostenibilità energetica l'installazione degli impianti su tetti degli edifici. Un progetto simile 'Pantelleria emission free' ed oggi in realizzazione ha previsto il potenziale fotovoltaico di 95 kW installabile sul palazzo municipale e su cinque scuole. Nell'ipotesi di intervento che coinvolga tali edifici, la produzione complessiva sarà di 150 MWh. Attualmente è in corso di realizzazione l'intervento su tre scuole.

A differenza del comune di Ventotene nel quale la maggior parte delle abitazioni risultano essere case singole o bifamiliari di altezza massima di 2 piani, Pantelleria può contare un maggior numero di condomini, 51 per l'esattezza, di almeno 4 piani. Dal punto di vista della progettazione degli impianti un tetto condominiale consta di una maggior area che può essere resa disponibile per le installazioni impiantistiche. Il numero complessivo di edifici sull'isola è di 1277, di cui 1001 adibiti ad edilizia residenziale e 194 per uso commerciale o produttivo e solamente 36 risultano in diversi modi compromessi.

Si sono considerate per i diversi scenari installazioni sui tetti degli edifici e anche piccoli-medi impianti a terra nella zona aeroportuale. Il dimensionamento è stato fatto considerando valori standard di potenza e area necessaria agli impianti. Si sono dimensionati impianti da 3kW sui tetti ad uso residenziale e da 5 kW, considerando lo spazio più ampio disponibile, sui tetti condominiali. L'impianto da 3 kW incide su un'area approssimativa di 20 m<sup>2</sup>, mentre quello da 5 kW, su di un'area di 32 m<sup>2</sup>. Sulle coperture dei capannoni industriali, che risultano essere 191, si valuterà l'ipotesi di dedicare parte delle coperture ad impianti fotovoltaici da 40 kW.

Negli scenari le ipotesi visibili in Tabella 33 verranno utilizzate applicandole alla potenza totale che si vuole rendere disponibile per l'intera isola, e alla producibilità che verrà calcolata sulla base della potenza ipotizzata e del numero di ore di funzionamento degli impianti nell'arco dell'anno.

*Tabella 33: Ipotesi per il dimensionamento degli impianti fotovoltaici - Pantelleria*

Pantelleria	Quantità	Unità
impianto residenziale standard	3	KW
Num. pannelli per impianto	12	unita
Dimensioni pannello	1*1,6	m2
Potenza di picco per singolo pannello	250	Wp
impianto residenziale maggiorato	5	KW
Num. pannelli per impianto	18	unita
Dimensioni pannello	1*1,6	m2
Potenza di picco per singolo pannello	250	Wp

### 7.2.3 La fonte eolica sull'isola di Pantelleria

Le caratteristiche anemometriche dell'isola di Pantelleria possono dirsi favorevoli all'installazione di qualsiasi tipologia di impianto. La posizione dell'isola in 'mare aperto' presenta valori di ventosità ampiamente superiori la media nazionale. Si è proceduto alla valutazione della velocità media del vento con l'utilizzo dell'atlante eolico RSE. In Figura 35, viene evidenziata il valore della velocità media annua del vento a 100 m s.l.t./s.l.m., pari a un range di 9-10 m/s nel mare attorno all'isola e nella parte 'collinare' dell'entroterra, e un range di 8-9 m/s sul resto del territorio isolano. A differenza di Ventotene in cui il dato era riportato per un'altezza a 25 s.l.t./s.l.m. qui viene riportato a 100 s.l.t./s.l.m., l'obbiettivo è quello di evidenziare l'ingente disponibilità anemometrica dell'isola; valori di queste entità consentirebbero l'installazione di impianti ad elevata potenza, sia off-shore che on-land, con parchi eolici da decine di MW che consentirebbero all'isola di convertire la sua intera produzione elettrica.

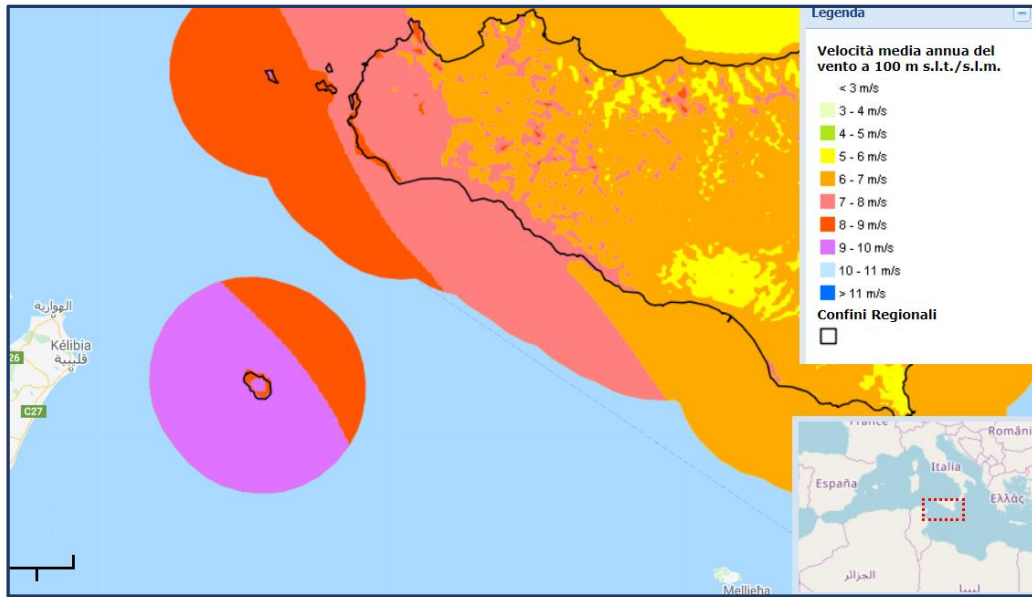


Figura 35: Velocità media annua del vento a 100 m s.l.t./s.l.m - Pantelleria (ATLAEOLICO-RSE, 2020)

Anche il dato a 75 s.l.t./s.l.m. presenta velocità del vento comprese tra 9-10 m/s nella parte centrale dell'isola; mentre il dato a 50 s.l.t./s.l.m. presenta velocità del vento tra 8-9 m/s su tutto l'entroterra. La producibilità specifica risulta 25 s.l.t./s.l.m. tra 2500-4000 MWh/MW con valori più alti sulle coste, per un'altezza di 50-75 s.l.t./s.l.m. tra 3500-4000 MWh/MW, con valori maggiori di 4000 MWh/MW nella parte collinare al centro dell'isola.

Visti le restrizioni ambientali e i delicati equilibri da rispettare in materia di ecosistema e fauna si è scelto di installare turbine aerogeneratori di dimensioni modeste pur essendo a conoscenza delle elevate potenzialità anemometriche. Si è valutato, tramite l'opzione di calcolo dell'atlante eolico RSE, l'installazione di aerogeneratori WES 30 250 kW WIND ENERGY SOLUTION da 250 kW con il mozzo ad un'altezza da terra pari a 31 m e diametro pari a 30 m. Si è optato per la soluzione che consentiva le migliori potenzialità a parità di altezza e ingombro. Per l'aerogeneratore la simulazione porta ai valori visibili in Figura 36.

Dati relativi alla risorsa eolica del sito

Velocità media annua del vento ad altezza mozzo (31 m) [m/s]:

Fattore di forma k della distribuzione di Weibull:

Velocità caratteristica A della distribuzione di Weibull:

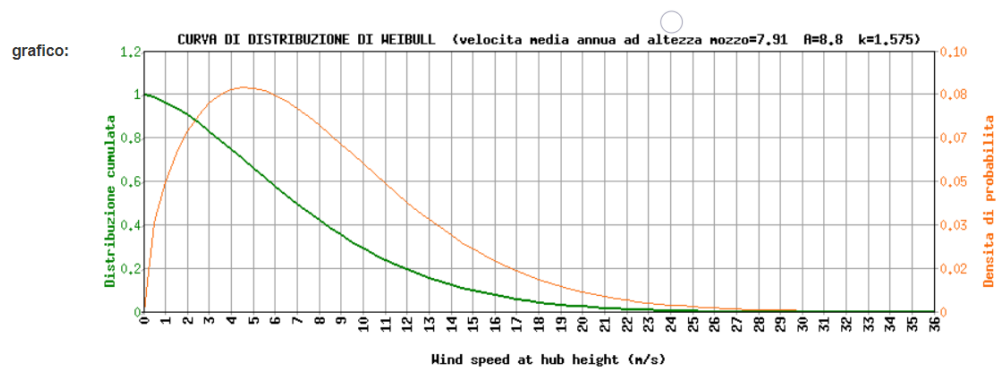


Figura 36: Risorsa eolica per aerogeneratore WES 30 250 kW WIND ENERGY SOLUTION - Pantelleria

La velocità media annua del vento ad altezza del mozzo risulta di 7.91 m/s, mentre la caratteristica della distribuzione di Weibull a 8.8 m/s. A differenza di Ventotene in cui era difficile stabilire un'area specifica da

utilizzare per le installazioni eoliche su Pantelleria è stato considerato il sito più volte preso in considerazione da diversi studi, ovvero l'area a sud ovest del centro urbano di Pantelleria, in piena zona industriale, vicino alla centrale termoelettrica SMEDE, in modo da garantire un facile allacciamento degli aerogeneratori alla rete.

Nei diversi scenari sono stati considerati un numero di aerogeneratori adatto alla potenza che si voleva ottenere da fonte eolica e il numero di ore di funzionamento indicato per gli impianti attualmente esistenti sull'isola ottenendo così la producibilità annua degli impianti.



## 8 Scenari di riferimento, LCIA e confronti

Vengono ora presentati gli scenari ipotizzati e il successivo confronto effettuato attraverso SimaPro per la valutazione LCIA. L'obiettivo in relazione allo scopo prefissato inizialmente per l'analisi è quello di valutare gli impatti associati all'integrazione di tecnologie di accumulo SdA agli attuali impianti per la produzione di energia elettrica. Si procederà variando quindi i contributi delle fonti FRNP per vedere l'effetto sulla produzione elettrica convenzionale; in tutti gli scenari si ipotizza che l'energia accumulata all'interno delle batterie sia quella proveniente dalle fonti FRNP. La quota di energia prodotta dalle FRNP e quindi immagazzinata nei sistemi SdA verrà sottratta dalla totale produzione da centrale termoelettrica in modo da valutare la percentuale di riduzione di utilizzo delle fonti fossili. Lo scenario 3 che per entrambe le isole analizzate è quello che prevede il maggior contributo delle FRNP, avrà come obiettivo il raggiungimento delle quote indicate dal MiSE-D decreto del Ministero dello sviluppo economico di spinta alle fonti rinnovabili nelle isole minori- del 2017.

Per ogni scenario si valuterà l'integrazione di quattro diverse tecnologie di accumulo: l'accumulatore agli ioni di sodio, l'accumulatore fosfato di litio e ferro LPF, l'accumulatore nickel, cobalto, manganese NCM, e infine l'accumulatore a flusso di vanadio VRBF. I vari accumulatori saranno sempre confrontati a parità di taglia ipotizzata a seconda dello scenario di riferimento.

Ogni scenario sarà valutato anche in relazione alla vita utile degli accumulatori, che viene misurata attraverso i cicli completi di carica e scarica, a seconda dell'efficienza dell'accumulatore. Si è scelto di valutare la vita utile dei sistemi SdA a 3000,5000 e 13000 cicli. Il numero di cicli compiuti in un anno solare dalla batteria viene considerato pari a 336,6, considerando un ciclo completo di carica e scarica al giorno, 10 giorni di mancato funzionamento e l'8% di cicli parziali.

Il numero di cicli compiuti in un anno viene diviso per i 3000,5000,13000 cicli considerati di durata di vita degli accumulatori e viene trovato il numero di anni corrispondenti alla vita utile. Si considera la perdita di efficienza delle batterie all'aumentare del numero di cicli, un valore di perdita pari a 0.1 dopo i 3000 cicli, 0.3 dopo i 5000, e 0.4 a 13000.

Tabella 34: Ipotesi sul numero di cicli degli accumulatori

IP su cicli SdA	336,6	cicli anno
8 % parziali	10gg mancato funz	
cicli batteria	Perdita di	numero anni
VITA UTILE	efficienza	corrispondenti
3000	0,1	8,0
5000	0,3	10,4
13000	0,4	23,2

In questo modo si rende possibile adeguare la quantità energetica stoccata negli impianti all'energia prodotta da FRNP e centrale termoelettrica per il numero di cicli corrispondenti alla vita utile della batteria. Lo scopo in relazione all'obiettivo iniziale è sempre quello di valutare gli impatti associati all'energia stoccata nei sistemi SdA integrati agli impianti per la produzione convenzionale e FRNP.

In ogni scenario verranno spiegate le ipotesi fatte e le quote di fonti rinnovabili che si sono inserite ai fini della modellazione.

## 8.1 Ventotene

### 8.1.1 Ventotene zero

Il primo scenario presentato è quello che verrà utilizzato come metro di paragone per gli altri proposti in seguito, nei quali si valuteranno gli impatti associati all'introduzione dei sistemi di accumulo e fonti FRNP in relazione all'obiettivo dell'analisi. Lo scenario descrive la situazione attuale sull'isola di Ventotene, non sono state fatte aggiunte di nessun tipo e l'accumulatore non è stato accoppiato all'insieme. Si riporta la tabella computazionale creata in Excel in cui sono presenti i parametri inseriti in SimaPro per la modellazione dello scenario.

Vengono considerati i dati di Figura 25, la produzione energetica annuale totale sull'isola di Ventotene è di 2824.27 MWh di cui 2700 MWh da centrale termoelettrica, 118.6 MWh di fotovoltaico e 5.6 MWh di eolico che corrispondono al 4.2 e 0.2% della produzione totale. Tramite una proporzione si riesce a ricavare il numero di ore di funzionamento degli impianti da FRNP che sarà poi applicato anche negli altri scenari in modo da renderli quanto più simili alla situazione reale. I dati sono visibili in Tabella 35.

Tabella 35: Ventotene 0, situazione attuale impianti e produzione esistenti

Produzione	valore	Unità	N°ore funz. impianti	Unità
prod. Tot	2824,3	MWh		
termoelettrica	2700	MWh		
fotovoltaico	118,6	MWh	1222,9	h/anno
eolico	5,6	MWh	1882,8	h/anno

Viene ora riportato il dato relativo al consumo di combustibile dalla centrale termoelettrica nell'arco temporale della vita utile della batteria, in questo scenario non è considerato l'accumulatore, ma vengono stimate le quantità di gasolio necessarie per la centrale termoelettrica, tenendo conto della quantità di combustibile che la centrale consumerebbe nel suo normale funzionamento per la soddisfazione del fabbisogno dell'isola, visibili in Tabella 36 .

Tabella 36: Combustibile consumato (Litri)

n. cicli	Litri gasolio
3000	5.346.537
5000	6.930.697
13000	15.445.553

### 8.1.2 Ventotene 1

Nello scenario Ventotene 1 si è considerato di mantenere la soluzione esistente sull'isola dal punto di vista delle quote di FRNP prodotte, ovvero mantenendo inalterati i contributi del 4.2% da fonte solare e dello 0.2% da fonte eolica, e di accoppiare un accumulatore in parallelo alla rete da 0.6 MWh. Come già esplicitato in precedenza, si ipotizza che l'accumulatore venga utilizzato per immagazzinare l'energia prodotta dalle fonti FRNP in modo da rilasciarla durante il picco di domanda, agendo in questo modo come compensatore per evitare la risposta della centrale termoelettrica ai picchi di domanda e allo stesso tempo per migliorare lo sfruttamento dell'energia prodotta dalle fonti aleatorie in fasce orarie diverse da quelle di massima produzione per gli impianti FRNP. Nella situazione presentata, la quantità energetica accumulabile nel sistema SdA in

base alla sua durata utile, è visibile in Tabella 37, mentre la quantità di combustibile che il sistema di accumulo ha consentito di risparmiare è visibile in Tabella 38.

Tabella 37: MWh accumulati - Ventotene 1

N° cicli	MWh accumulati vita utile
3000	1620
5000	2100
13000	4680

Tabella 38: Litri di combustibile risparmiati - Ventotene 1

N° cicli	Litri gasolio necessari	Litri gasolio risparmiati
3000	4.946.616	399.921
5000	6.412.281	518.416
13000	14.290.225	1.155.327

Il calcolo in SimaPro ha prodotto il seguente risultato visibile in Figura 37.

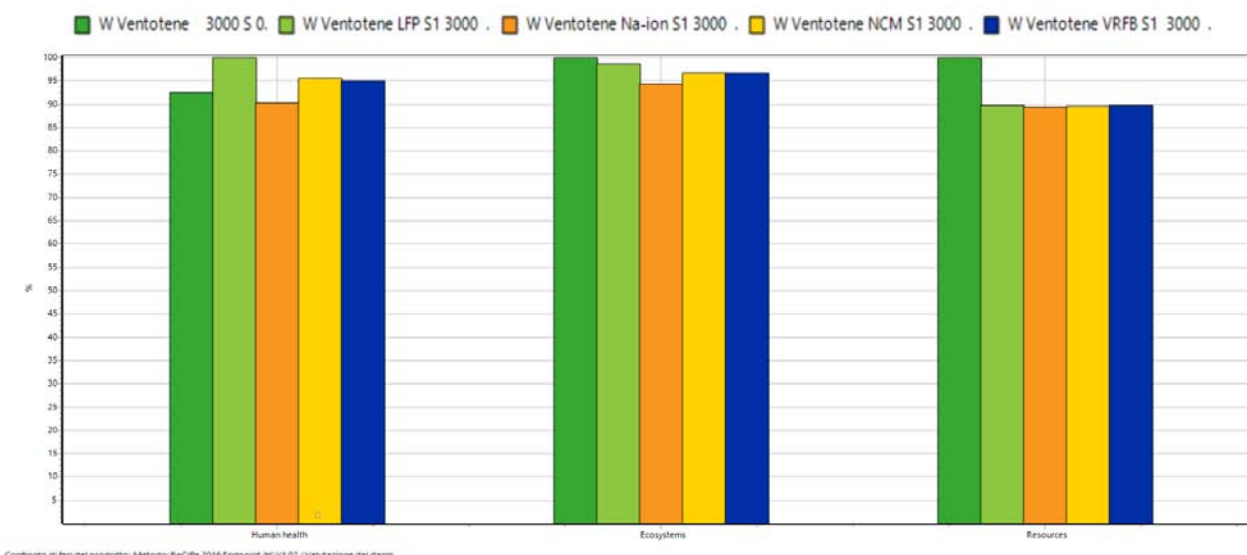


Figura 37: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 3000 cicli

La quota di energie rinnovabili è esigua al momento sul territorio isolano, l'integrazione dell'accumulatore al sistema di generazione a diesel ha prodotto risultati modesti dal punto di vista dell'analisi degli impatti. Con riferimento alle risorse il calo risulta giustificato dalla quota di combustibile che si va a risparmiare con l'introduzione dell'accumulatore pari al 7.5% del fabbisogno di gasolio usuale.

La convenienza dei sistemi di accumulo rispetto alla soluzione che non li prevede risulta conveniente per la batteria agli ioni di sodio che appare la migliore in tutti e tre gli indicatori, mentre le altre tipologie di accumulatori, mostrano di essere vantaggiosi dal punto di vista delle risorse anche se la convenienza risulta minore, pure per l'ecosistema.

Con riferimento alla salute umana il contributo dell'accumulatore LFP risulta più impattante rispetto alla soluzione senza il sistema di accumulo, di un punteggio pari a 7.5%; andando nel dettaglio dell'analisi di inventario i valori associati alle emissioni di bario, zinco e cromo nell'acqua risultano per quest'accumulatore più elevate rispetto a tutte le altre soluzioni, compresa quella senza l'accumulo. Anche il consumo di acqua

primaria nel caso LPF risulta più elevato con un valore pari a 3.07 DALY rispetto agli altri valori dell'ordine di grandezza medio pari a 1.7 DALY.

Valutando nel complesso l'indicatore della human health il valore più alto è associato alle emissioni gassose di particolato dovute alla produzione da fonte fossile e ciò non stupisce vista e considerata la modesta taglia dell'accumulo considerata per questo scenario. Esplicitando la valutazione per processo nello scenario con la LPF, risulta un elevato valore per il processo relativo al rame che incide di 20.2 DALY mentre per le altre tecnologie lo stesso indicatore ha per il rame valori tra i 10-12 DALY.

La valutazione consente di affermare i vantaggi dell'integrazione dei sistemi di accumulo dal punto di vista del consumo delle risorse primarie e che anche un accumulatore di piccole dimensioni può contribuire al risparmio di fonti fossili coinvolte nella generazione distribuita.

Con l'esclusione del lungo termine si evidenzia la convenienza dei sistemi di accumulo, in tutte le categorie gli impatti associati risultano minori che nella soluzione che non li prevede.

Generalmente non viene applicata l'esclusione del lungo termine nella valutazione degli impatti, poiché si esclude parte delle emissioni associate al fine vita degli impianti; il lungo termine considera gli effetti delle emissioni rilasciate anche dopo i 100 anni, quindi la stima del lungo termine è sempre accompagnata da un certo valore di incertezza.

Si è voluto evidenziare l'esclusione del lungo termine in quanto rilevante ai fini dell'indagine sui sistemi di accumulo. Nel lungo termine i processi più impattanti risultavano essere quelli relativi allo smaltimento e riutilizzo dei componenti degli accumulatori, associati ad emissioni in aria e in acqua di sostanze pericolose, attraverso l'esclusione questi processi risultano meno impattanti su tutte le diverse categorie, come si evince da Figura 38. Con l'esclusione del lungo termine, le diverse tecnologie si equivalgono tra loro, la differenza con la soluzione senza accumulatore è calcolata con un punteggio di 7% nelle categorie salute umana ed ecosistema, mentre è del 10.1% la differenza nell'indicatore risorse.

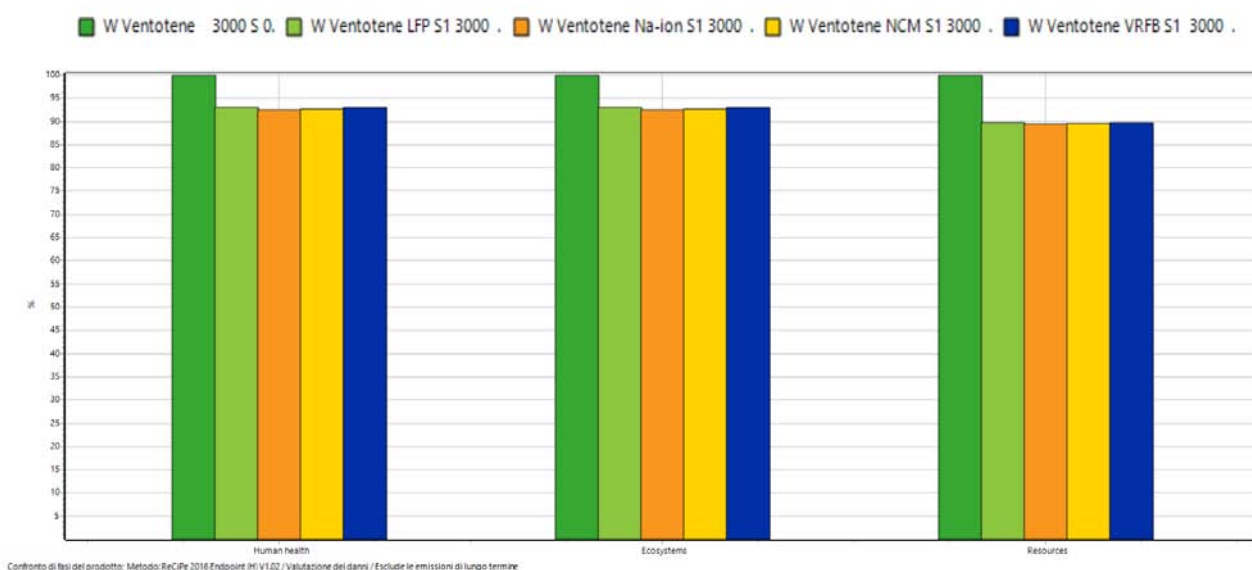


Figura 38: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 3000 cicli - esclusione del lungo termine

Si continua la valutazione del medesimo scenario ma facendo riferimento ad un numero maggiore di cicli della batteria, 5000. L'analisi mostra i risultati leggermente diversi rispetto ai precedenti visibili in Figura 37 per la valutazione a 3000 cicli. Innanzitutto, si può sottolineare come nell'indicatore della salute umana il dislivello precedente tra la soluzione senza batteria e quello con l'accumulatore LPF si sia assottigliato portando la percentuale di incidenza ad una differenza pari allo 0.9%. Anche per le altre tipologie di accumulatori i risultati sono diventati migliori per tutte le categorie confrontate con lo scenario 0, in verde scuro. Si nota subito come la batteria agli ioni di sodio anche in questo caso presenti la soluzione meno impattante, mentre valutando le altre tecnologie si può affermare che le batterie a nichel-cadmio-magnesio e quelle a flusso di vanadio si equivalgono alla fine del ciclo 5000.

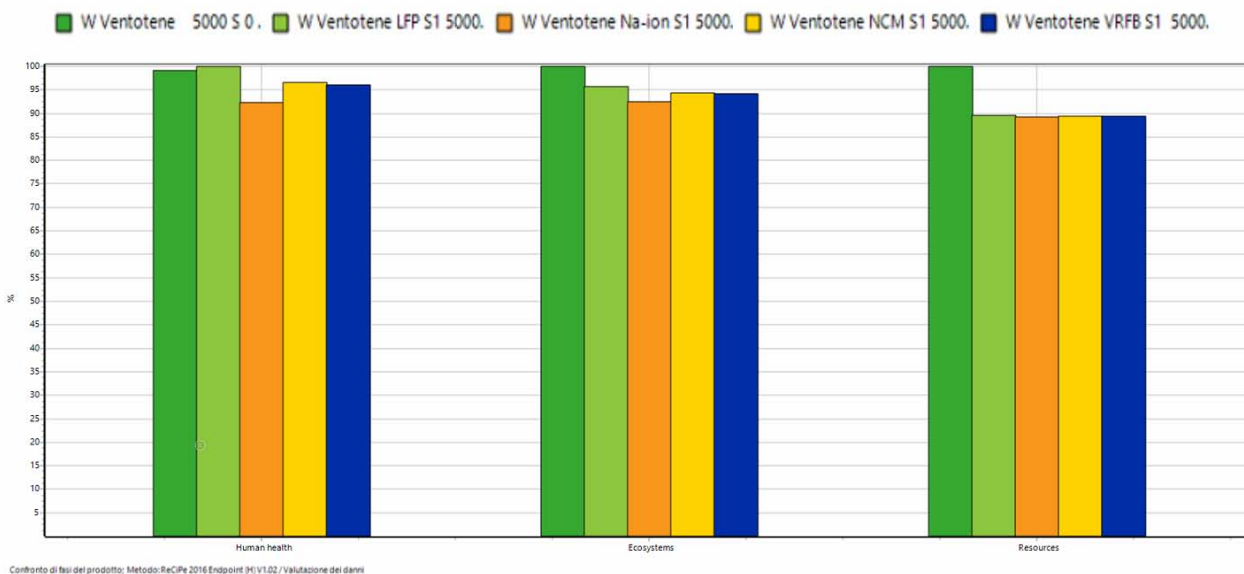


Figura 39: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 5000 cicli

L'esclusione del lungo termine anche in questo caso evidenziava il minor impatto dei sistemi di accumulo rispetto alla soluzione 0, non viene riportata in quanto simile al risultato precedente, Figura 38, la differenza con la soluzione senza accumulatore forniva un punteggio di 7.5% per le categorie salute umana e ecosistema e di 10.5% nella categoria risorse.

Si procede ora con il confronto tra la soluzione senza accumulatore e lo scenario Ventotene 1 a 13000 cicli.

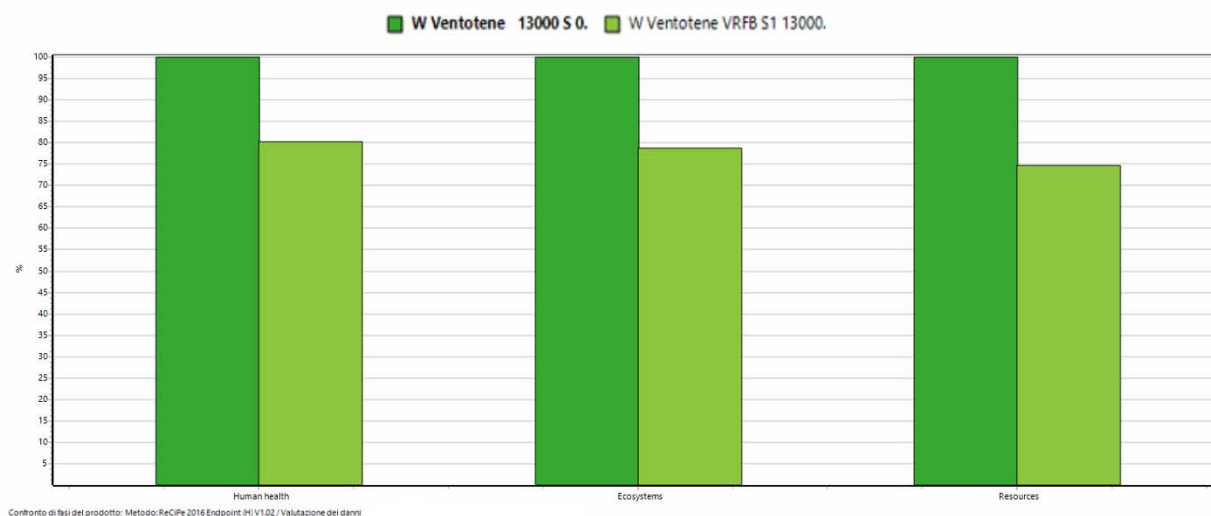


Figura 40: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 13000 cicli

L'unica tecnologia di accumulo che può garantire ad oggi una vita utile così lunga è la batteria a flusso di vanadio. Non vengono dunque confrontate le altre tipologie di accumulo in quanto lo scenario non sarebbe rappresentativo della realtà.

La valutazione dei danni, in Figura 40: Valutazione dei danni - Ventotene 1, 13000 cicli, evidenzia la convenienza del sistema di accumulo rispetto a tutte le categorie d'impatto, con una riduzione più marcata dell'indicatore delle risorse. Il risultato è in linea con quanto ci si aspettava. Nell'arco dei 13000 cicli la batteria ha consentito l'accumulo di più energia e ciò pone lo scenario con la VRFB assolutamente conveniente in termini ambientali rispetto alla soluzione senza l'accumulo.

Possiamo concludere l'analisi di questo primo scenario evidenziando come il sistema di accumulo nelle sue diverse tecnologie confrontate risulti conveniente rispetto alla soluzione priva di sistema di accumulo dal punto di vista degli impatti. Per quanto nella valutazione del contesto a 3000 cicli alcune tecnologie risultino più impattanti in alcune categorie, risultano comunque più convenienti nell'indicatore risorse e con l'esclusione del lungo termine. Si può inoltre affermare che la riduzione degli impatti si attesta a valori modesti rispetto alla soluzione 0 ma i motivi riguardano la bassa penetrazione delle FRNP attualmente sull'isola e gli elevati impatti associati alle tecnologie di accumulo considerata la bassa capacità installata di 0.6 MWh.

### 8.1.3 Ventotene 2

Nel secondo scenario ipotizzato per l'isola di Ventotene si è scelto di incrementare le quote di energia rinnovabile esistenti sull'isola tramite la scelta di percentuali di nuove installazioni adeguate al territorio e alla producibilità delle fonti sull'isola. Sono state effettuate diverse considerazioni, capitoli 7.1.2 e 7.1.3, e si è infine scelto dapprima di valutare lo scenario effettuando in incremento moderato delle FRNP e il conseguente aumento della taglia dell'accumulatore. Si è portata la fonte solare ad un valore del 6.8% e la fonte eolica al 2.8% della copertura del fabbisogno totale dell'isola.

Si sono ipotizzati due generatori eolici NPS 20-18 da 20 kW ognuno per un totale di 40 kW i cui dettagli sono descritti al capitolo 7.2.3, mentre per quanto riguarda la fonte solare si è prevista l'installazione di impianti da 3kW sui tetti di 20 abitazioni residenziali per un totale di 60 kW, dettagli nel capitolo 7.1.2. La quota totale di copertura del fabbisogno isolano con i nuovi impianti previsti diventa del 10%.

La taglia del sistema di accumulo è stata incrementata per seguire le nuove potenzialità delle FRNP, si considerano le quattro diverse tecnologie nella taglia di 1 MWh. L'energia accumulata nella vita utile del sistema SdA nello scenario appena descritto è visibile in Tabella 39. La riduzione di utilizzo della centrale grazie allo sfruttamento del sistema di accumulo porta ad una riduzione dell'utilizzo della centrale termoelettrica pari al 12.5%.

Tabella 39: MWh accumulati - Ventotene 2

N° cicli	MWh accumulati	
	vita utile	
3000	2700	
5000	3500	
13000	7800	

Tabella 40: Litri combustibile fossile risparmiati - Ventotene 2

N° cicli	Litri gasolio necessari	Litri gasolio risparmiati
3000	4.680.002	666.535
5000	6.066.670	864.027
13000	13.520.007	1.925.546

L'incremento moderato delle FRNP è stato voluto per valutare gli impatti del sistema complessivo, impianto di generazione distribuita, accumulo e fonti rinnovabili. Si deve considerare che nella valutazione degli impatti l'aggiunta di quote di energie rinnovabili viene anch'essa associata a degli impatti, tenendo conto della costruzione degli impianti e della loro vita utile, dall'estrazione delle materie prima alla dismissione finale. Da un lato ci si aspetterebbe dunque un incremento percentuale degli indicatori di categoria dovuta all'aggiunta delle nuove FRNP e allo stesso tempo un ulteriore incremento dovuto alla maggior taglia dell'impianto di accumulo, tuttavia un sistema di accumulo con capacità maggiore consente, come da Tabella 39, di accumulare una quantità maggiore di energia, e ciò nell'analisi si traduce come un maggior risparmio di combustibile fossile e un minor utilizzo della centrale termoelettrica. Da un punto di vista prettamente teorico ci si

aspetterebbe un peso maggiore dato dall'incremento della taglia dell'accumulo e in secondo luogo un miglioramento degli indicatori dato dal maggior risparmio di combustibile. Viene ora proposta la valutazione ottenuta in SimaPro considerando la vita utile delle batterie a 3000 cicli, Figura 41.

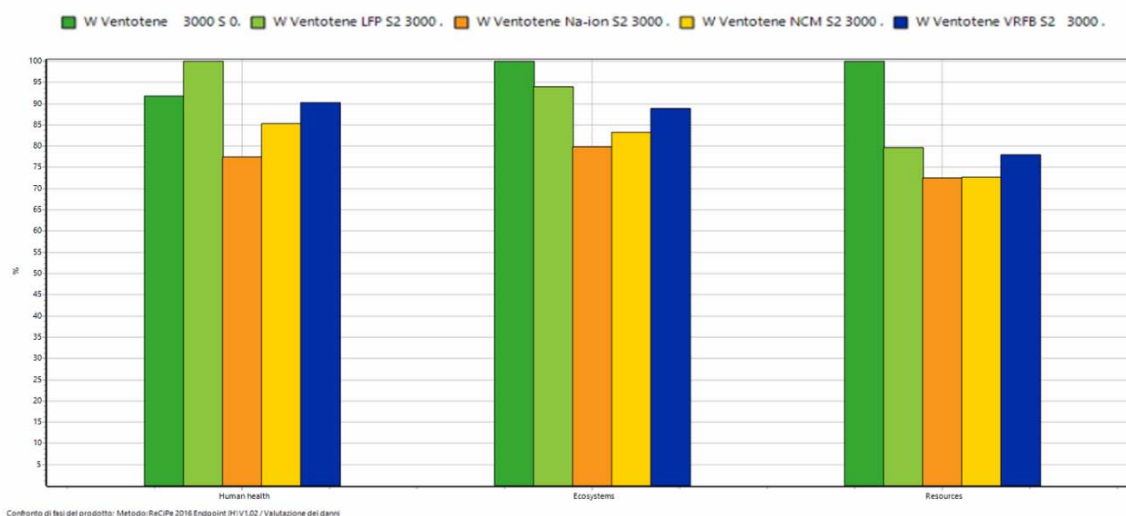


Figura 41: Valutazione dei danni - Ventotene 2, 3000 cicli

A differenza di quello che magari ci si poteva aspettare si nota come la riduzione degli impatti dal punto di vista delle risorse e dell'ecosistema sia molto più consistente, rispetto allo scenario 1; l'introduzione di un accumulo di taglia maggiore e delle quote di fonti rinnovabile ha impattato meno sul sistema rispetto all'incremento del risparmio di combustibile. La convenienza dei sistemi di accumulo è quindi ancora più marcata. Gli accumulatori agli ioni di sodio e gli NCM presentano un buon distacco dalla soluzione attuale sull'isola, verde scuro. Le batterie VRFB presentano buoni valori di impatto rispetto a risorse ed ecosistema ma si portano al pari della soluzione senza accumulo per la categoria della salute umana. Le LFP si mantengono più impattanti dello scenario Ventotene 0, considerando la salute umana.

Si riporta l'analisi del dettaglio dei processi nella valutazione dei danni, in questo caso si è scelto di esplicitare il caso della batteria LFP in modo da vedere con più accuratezza quelli che sono le categorie di processo che contribuiscono maggiormente all'impatto dello human health, Figura 42.

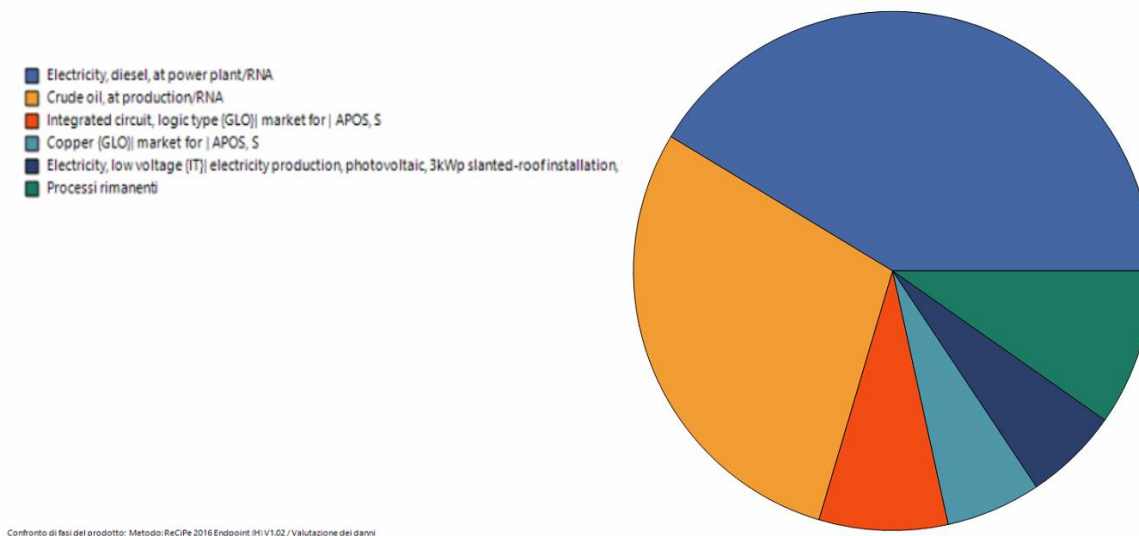


Figura 42: Valutazione dei danni per singolo indicatore - Human Health- Ventotene 2 LFP, 3000 cicli

Come si evince il contributo maggiore è dato dalla quota di combustibile utilizzato nella centrale termoelettrica e dall'elettricità così prodotta; questo valore però è lo stesso per tutte le quattro tecnologie utilizzate e quindi impatta allo stesso modo negli scenari degli altri sistemi SdA, quindi ci si concentra sull'analisi delle altre parti del grafico. Il contributo in rosso è dato dai circuiti integrati, risalendo al processo principale si arriva all'insieme del BMS Li-ion, battery manager system, utilizzato nella modellazione delle LPF.

In blu scuro si nota il contributo alla categoria di salute umana dato dall'impatto dell'impianto fotovoltaico aggiunto allo scenario che incide per un valore di 32.1 DALY, questo valore qui riportato per la LPF è lo stesso per le altre batterie; varia solo la percentuale in peso associata all'indicatore a seconda dei materiali e processi componenti l'assemblaggio.

L'impatto dato dall'aggiunta della potenza eolica per la soddisfazione dei fabbisogni incide per un valore di 3.7 DALY per le diverse tecnologie. Non risulta tuttavia nella Figura 42, in quanto a fronte dell'analisi erano stato usato un valore di esclusione per il grafico pari a 1,3%.

Si riportano gli impatti associati alle fonti FRNP ipotizzate anche per gli altri indicatori di impatto, per gli impianti solari 0.0191 species.yr sull'ecosistema e 6.43e3 USD2013 sulle risorse, mentre per l'eolico 0.00171 species.yr e 825 USD2013 rispettivamente.

Si valuta ora lo stesso scenario Ventotene 2 per una vita utile delle batterie al ciclo numero 5000, Figura 43.

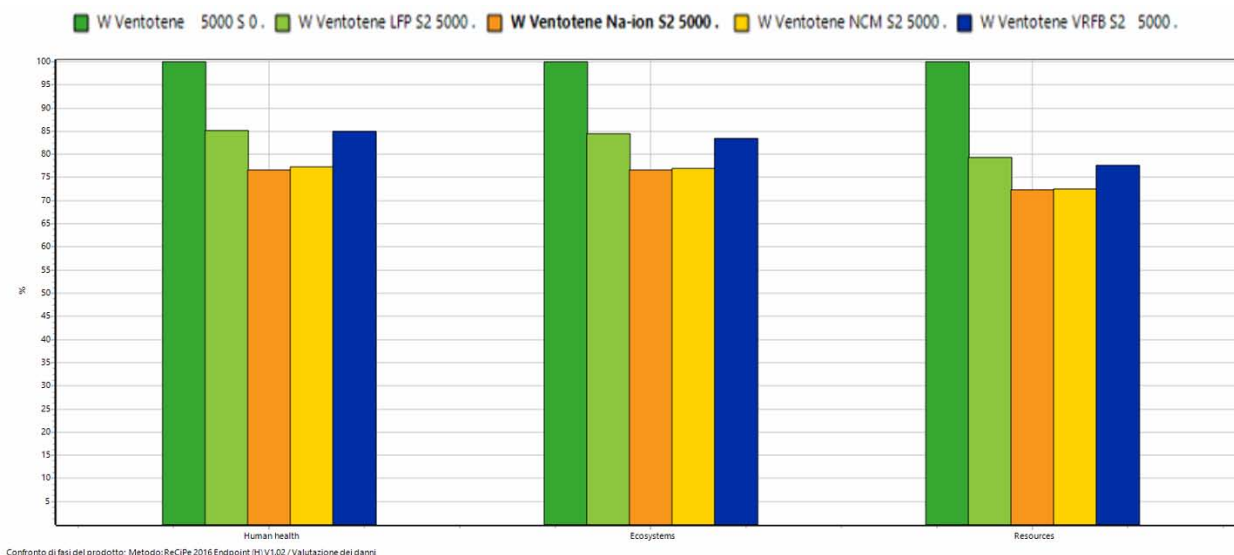


Figura 43: Valutazione dei danni - Ventotene 2, 5000 cicli

Si può notare come l'incremento capacitivo della batteria faccia rientrare nel campo della convenienza ambientale tutte le tipologie di accumulatori. Il distacco dalla soluzione senza accumulo si accentua in tutte le categorie d'impatto e anche la LPF rispetto alla categoria di salute umana ottiene un distacco di 14.1%. Nell'analisi delle risorse il punteggio tra soluzione senza accumulo e la tecnologia più inquinante presenta una differenza del 20.4%, con la meno inquinante del 27.7%. Si osserva che la NCM si è portata a livelli migliori, molto vicina alla soluzione agli ioni di sodio, e così pure anche se su percentuali più elevate dell'ordine del 8%, anche la LPF può essere considerata equivalente alla VRFB in questo scenario.

L'esclusione del lungo termine in questo caso non genera variazioni significative, si ritiene più interessante la valutazione dei valori associati agli impatti delle FRNP su una vita utile dell'accumulatore di 5000 cicli. I dati del dettaglio dell'analisi degli impatti per processo riportano:

- Per il fotovoltaico valori tra 0.539 DALY nell'indicatore di salute umana, 0.0088 species.yr per l'ecosistema e 8.71e3 USD2013 per le risorse.
- La generazione eolica invece presenta risultati 0.0672 DALY per la salute umana, 8.26e-5 species.yr per l'ecosistema e 1.05e3 USD2013 nell'indicatore delle risorse.



Si riporta ora lo scenario Ventotene 2 per una vita utile della batteria a 13000, come già esplicitato l'unica tecnologia tra quelle proposte che arriva ad un'efficienza finale del 80% dopo il ciclo 13000 è la VRFB. Quindi si confronta tale batteria con lo scenario in considerazione, Figura 44.

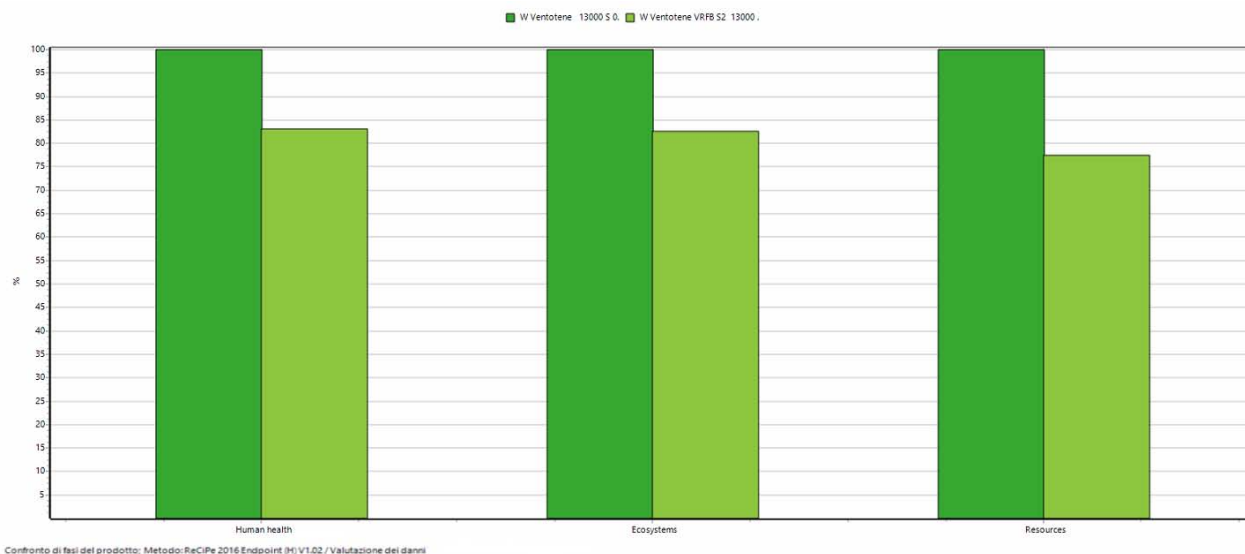


Figura 44: Valutazione dei danni - Ventotene 2, 13000 cicli

La batteria si dimostra una valida soluzione dal punto di vista di tutti gli indicatori, la riduzione che ci si aspettava poteva essere migliore del grafico in figura, tuttavia è necessario considerare che la quantità di energia accumulata è maggiore, come più elevata è anche la riduzione dell'utilizzo della centrale termoelettrica, però anche l'energia prodotta dalle FRNP è maggiore, ed è quindi associata ad un impatto più elevato.

Si riporta l'impatto associato alle FRNP, per capire quanto incida sulle tre categorie d'impatto valutate. Visto che la quantità di dati esaminati dal programma è minore in quanto il confronto verte sullo scenario zero e su Ventotene 2-13000, si sceglie di porre a confronto i due scenari per valutare anche gli impatti aggiuntivi rispetto alla situazione attuale dell'isola con le quote di FRNP al 4.4% del totale del fabbisogno e la soluzione proposta con accumulatore e FRNP al 10% del fabbisogno; i valori sono già stati esplicitati per le valutazioni precedenti, ma si procede con una considerazione rilevante. Si deve considerare che negli scenari con numero di cicli inferiore, 3000-5000, l'equivalenza effettuata sulla base delle ipotesi del numero di cicli annui compiuti da una batteria porta a valori di 8 anni per i 3000 cicli e 10 anni per i 5000 cicli. La durata degli impianti FRNP dal punto di vista della vita utile è più equiparabile ai 13000 cicli, che corrispondono a 23 anni. La durata media di un impianto eolico viene calcolata con una durata operativa di minimo 20 anni di cui 15 con funzionamento garantito, per gli impianti fotovoltaici la durata operativa è tra i 20 e i 25 anni. Si ritiene dunque che il confronto qui proposto possa essere più rappresentativo, infatti viene considerata sia la vita utile della batteria, ma anche quella completa degli impianti FRNP, con i relativi impatti, soprattutto in termini di energia prodotta dagli FRNP stessi nel periodo di riferimento, Tabella 41.

Tabella 41: Valutazione dei danni, inventario, FRNP Ventotene 0, 13000 cicli - Ventotene 2, 13000 cicli

<b>Human health</b>				
<b>Processo</b>	<b>Progetto</b>	<b>Unità</b>	<b>W Ventotene 13000 S 0.</b>	<b>W Ventotene VRFB S2 13000 .</b>
Il totale di tutti i processi		DALY	101,10279	84,080913
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	1,09E-05	0,15
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	0,77	1,18
<b>Ecosystems</b>				
<b>Processo</b>	<b>Progetto</b>	<b>Unità</b>	<b>W Ventotene 13000 S 0.</b>	<b>W Ventotene VRFB S2 13000 .</b>
Il totale di tutti i processi		species.yr	0,25317	0,20892
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	1,46E-08	0,00020
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	0,00126	0,00192
<b>Resources</b>				
<b>Processo</b>	<b>Progetto</b>	<b>Unità</b>	<b>W Ventotene 13000 S 0.</b>	<b>W Ventotene VRFB S2 13000 .</b>
Il totale di tutti i processi		USD2013	9350524,8	7238091,8
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	0,17	2,29E+03
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation  APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	1,25E+04	1,90E+04

Ovviamente l'impatto associato agli impianti eolici risulta minore vista la loro taglia considerata rispetto agli impianti fotovoltaici, in Ventotene 0 sono presenti i contributi di 3 kW di eolico e 97 kW di fotovoltaico, in Ventotene 2 si aggiungono 40 kW di eolico e 60 kW di solare fotovoltaico. In SimaPro vengono inseriti i valori sulla base delle energie prodotte dagli impianti che vengono ricavate considerando un numero di ore di funzionamento uguale tra i 2 scenari, ma diverse per tecnologia considerata sulla base della disponibilità della fonte sull'isola. L'unità di riferimento rimane il MWh stoccato nella batteria, si è voluto evidenziare le differenze tra le fonti e il contributo delle FRNP all'impatto complessivo per categoria.

### 8.1.4 Ventotene 3

Nel terzo scenario ipotizzato per l'isola di Ventotene, l'obiettivo che si è cercato di conseguire, come indicato più volte, è stato il raggiungimento delle quote di riduzione dell'utilizzo di impianti convenzionali previste dal Decreto ministeriale 14 febbraio 2017 MiSE, Tabella 27, che per Ventotene prevede una riduzione pari al 50%. Si sono quindi effettuate diverse ipotesi, con riferimento ai capitoli 7.1.2 e 7.1.3, e si sono incrementati i contributi da fonti FRNP e la capacità del sistema di accumulo.

Per l'incremento degli impianti fotovoltaici si sono previste le installazioni degli impianti da 3 kW sui tetti di 280 abitazioni residenziali nell'isola, un po' più della metà dei tetti disponibili; un totale di 840 kW di nuova potenza installata, che sommata a quella già presente sul territorio isolano porta il contributo della fonte solare alla soddisfazione del 40.5% del fabbisogno totale dell'isola.

L'incremento della fonte eolica è stato più moderato, per tutte le ragioni precedentemente spiegate relative ai vincoli naturali e paesaggistici, si è prevista l'installazione di 60 kW che può essere conseguita con 2 diverse soluzioni presentate nei capitoli di riferimento: l'utilizzo di tre aerogeneratori da 20 kW oppure l'installazione di una sola turbina da 60 kW. La turbina da 60 kW presenta ingombro minore in altezza che si traduce in una producibilità meno spinta osservando le distribuzioni di Weibull per entrambi i modelli proposti. Tuttavia, gli impatti associati a tre aerogeneratori incidono notevolmente dal punto di vista dell'occupazione visiva, delle interazioni acustiche, ambientali e soprattutto in termini economici. Si propende per l'unica turbina, e se ne valutano il numero di ore di funzionamento in modo da calcolare i MWh prodotti.

L'accumulatore considerato in questo scenario ha una capacità di 4 MWh, a differenza degli scenari precedenti le quantità energetiche coinvolte sono molto più elevate. In Tabella 42, è visibile l'energia accumulata nel sistema SdA nella sua vita utile, mentre in Tabella 43, sono evidenziati i dati relativi alla centrale

termoelettrica; la prima colonna riguarda i litri di combustibile comunque necessari alla soddisfazione del fabbisogno dell'isola mentre accanto sono presentati i valori relativi al risparmio di utilizzo della fonte convenzionale che la batteria comporta nella sua vita utile. La riduzione ottenuta, in linea con il MiSE2017 è del 50%.

Tabella 42: MWh accumulati nella batteria

N° cicli	MWh accumulati vita utile
3000	10800
5000	14000
13000	31200

Tabella 43: Combustibile necessario al fabbisogno e combustibile risparmiato

N° cicli	Litri gasolio necessari	Litri gasolio risparmiati
3000	2.680.397	2.666.140
5000	3.474.589	3.456.107
13000	7.743.370	7.702.182

Per Ventotene 3 ci si aspetta un incremento degli impatti dovuti all'aumento della taglia del sistema di accumulo e l'impiego di quantità energetiche più elevate da FRNP. La riduzione generata dal gasolio risparmiato risulta molto consistente rispetto alla situazione attuale Ventotene 0, con cui verrà confrontato lo scenario. Viene riportata l'analisi per i tre indicatori di endpoint ottenuta in SimaPro Figura 45.

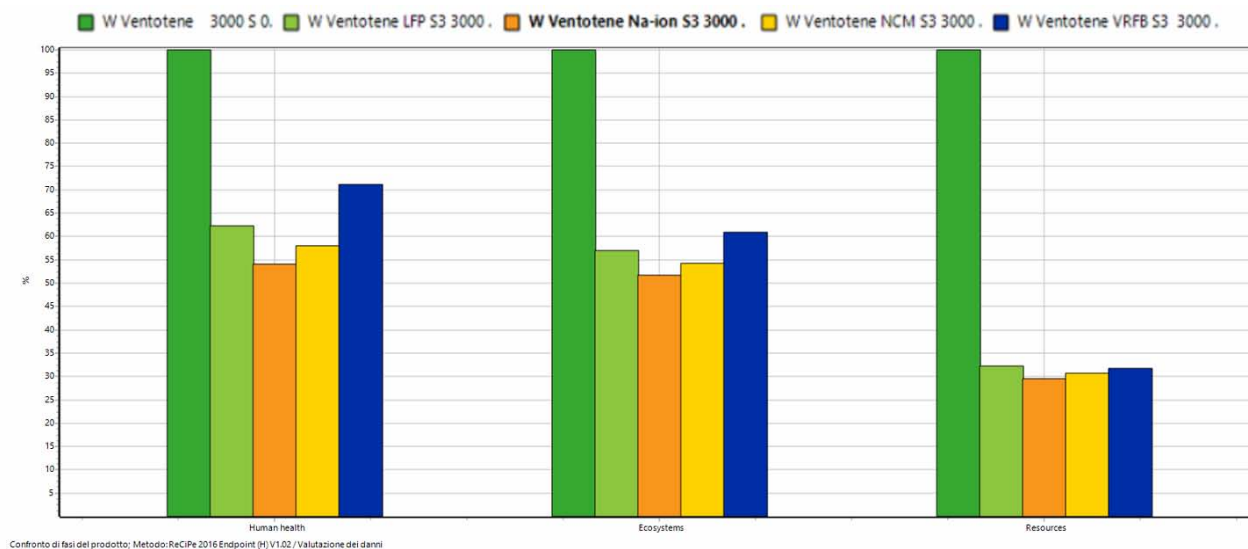


Figura 45: Valutazione dei danni - Ventotene 3, 3000 cicli

Il risultato pone la soluzione Ventotene 3 in un'ottica assolutamente conveniente dal punto di vista ambientale. Le riduzioni degli impatti sui diversi indicatori sono molto consistenti: per la salute umana una riduzione tra il 28.8-45.9% a seconda della tecnologia utilizzata, rispetto alla soluzione attuale dell'isola, Ventotene 0; per l'ecosistema un calo compreso tra 38.9-48.9%; mentre il risultato più rilevante si ha nella categoria delle risorse in cui l'impatto diminuisce di un valore compreso tra 67.7-70.4% (risultati presentati considerando la tecnologia più inquinate e meno inquinante per ogni indicatore). L'esclusione del lungo termine non comporta risultati significativi, ma solamente un modesto abbassamento dei valori complessivi nell'indicatore human health.

Una doverosa osservazione riguarda le diverse tecnologie di accumulatori, negli scenari precedenti la LPF si era dimostrata la batteria associata agli impatti più elevati nelle diverse categorie. Si era visto come l'aumento del numero dei cicli e quindi della durata utile della batteria facesse rientrare il campo di convenienza ambientale anche per questa tecnologia; tuttavia nello scenario attuale, Ventotene 3, si è verificato un cambiamento dei precedenti equilibri associati agli impatti per diversa tecnologia. Osservando, Figura 45, si evince come la batteria più impattante per la salute umana e l'ecosistema sia la VRFB, segue LPF, poi NCM ed infine la tecnologia agli ioni di sodio. Prima di entrare nel dettaglio dell'inventario degli impatti e del contributo di processo è opportuna una considerazione sulle taglie degli accumulatori. La differenza rilevante con gli scenari precedenti riguarda l'incremento della capacità, gli accumulatori sono stati modellati per capacità da 1 MWh, incrementando la taglia in questo scenario si sono ovviamente aggiunti tutti gli impatti associati ai processi di produzione smaltimento e riutilizzo delle sostanze coinvolte. Determinate quantità di certe sostanze causano specifici impatti, l'incremento della quantità non genera un impatto che cresce linearmente ma può essere associato a mutazioni delle sostanze coinvolte e conseguente produzione di effetti diversificati. L'analisi del contributo di processo nella valutazione degli impatti indica i maggiori contributi all'incremento del danno per la salute umana nella VRFB, in particolare si ha un'incidenza elevata data dal pentossido di vanadio, utilizzato per la produzione dell'elettrolita della batteria, il suo valore è di 4.08 DALY, che incide al 16% su l'indicatore salute umana per la tecnologia in esame, e non risulta presente negli altri assemblaggi analizzati. Si ha poi l'impatto associato all'acido solforico 0.083 DALY, utilizzato per la produzione dell'elettrodo e presente come processo per l'elettrolita della VRFB. Altri impatti minori come quello del solfato d'ammonio, del carbonato di sodio e del solfato di sodio presentano valori 0.5-0.8% dell'impatto della batteria sulla salute umana e sono processi utilizzati nella produzione del pentossido di vanadio. Anche per l'indicatore ecosistema il pentossido di vanadio ha un'incidenza consistente 8.99%, ovvero 0.0478 species.yr, e così pure per le risorse i sotto processi della produzione dell'elettrolita, precedentemente citati, incidono mediante tra il 3.78e3 - 4.81e3 USD13.

Il secondo contributo più rilevante nell'analisi degli impatti per tutte e tre gli indicatori e per tutte le tecnologie di accumulo confrontate è associato al sostanziale incremento della fonte fotovoltaica, l'incidenza sugli endpoint è di 2.59 DALY per lo human health (tra il 10.5 - 13.8% a seconda della tecnologia), di 0.00422 species.yr per l'ecosystem (7.93 - 9.35% nelle diverse tecnologie), e di 4.18e4 USD2013 per le risorse (tra 4 - 4.36% per le differenti tecnologie di accumulo).

Si continua con la valutazione esaminando ora gli impatti associati allo stesso scenario Ventotene 3 considerando 5000 cicli di vita utile degli accumulatori, Figura 46.

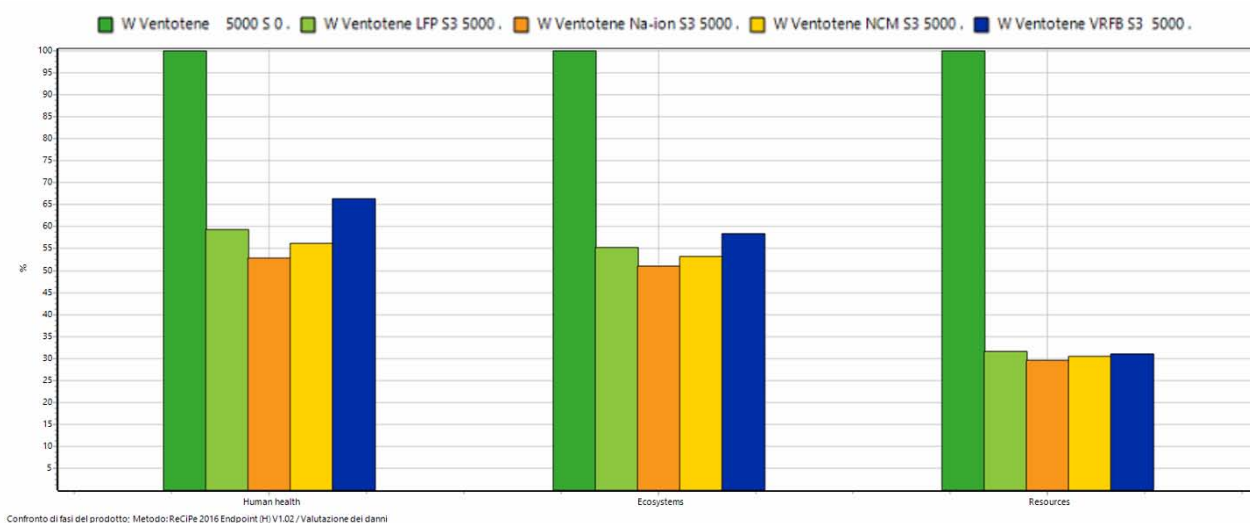


Figura 46: Valutazione dei danni - Ventotene 3, 5000 cicli

La riduzione degli impatti si ha per tutte le categorie rispetto allo stesso scenario valutato sui 3000 cicli; il grafico è molto simile al precedente, ma le percentuali di impatto si abbassano per tutti gli endpoint e in tutte le tecnologie in esame.

Le riduzioni sono dell'ordine del 33.7-47.1% per la salute umana, 41.7-48.9% per l'ecosistema e 68.4-70.5 % per le risorse. Si assottiglia il distacco tra la VRFB e le altre batterie negli impatti sulla salute umana.

Si deve considerare che la differenza nella valutazione tra 3000 e 5000 cicli comparata con i numeri di cicli annui presenta una differenza quantificata in anni pari a 2. Le valutazioni effettuate in precedenza comprendevano valori più modesti di energie accumulate e producibilità delle fonti FRNP di conseguenza le variazioni negli impatti risultavano più consistenti visti i valori modesti degli accumulatori; in questo caso in cui le energie coinvolte sono più elevate si ha una variazione meno significativa.

Nel dettaglio dei singoli processi si riportano gli impatti associati alle FRNP: per l'indicatore salute umana 3.35 DALY associati alla produzione elettrica da fonte fotovoltaica con un'incidenza nell'indicatore dal 11.1-14 % a seconda della tecnologia, per l'ecosistema 0.0547 species.yr con valore pari a 8.28-9.42%, e sulle risorse 5.41e4 USD2013 tra il 4.14-4.37%.

Si procede ora con il caso a Ventotene 3 a 13000 cicli, Figura 47.

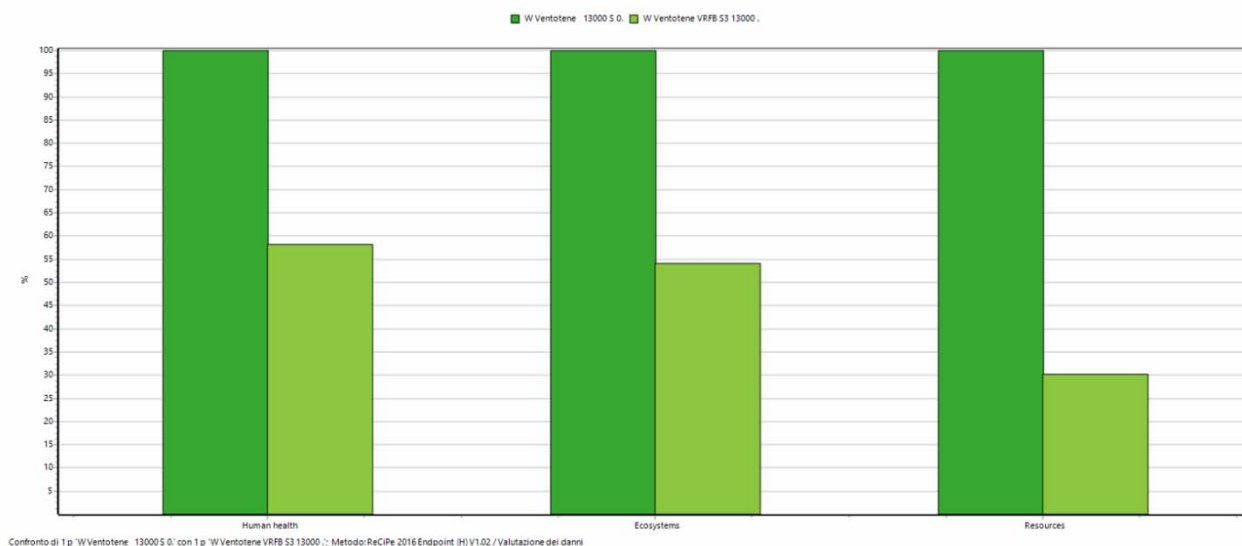


Figura 47: Valutazione dei danni - Ventotene 3, 13000 cicli

La riduzione risulta molto marcata in ambito di impatti alle risorse, nonostante le quantità energetiche coinvolte molto rilevanti la riduzione degli impatti sulla categoria risorse rispetto al caso attuale Ventotene 0, è del 70%.

Vengono riportati gli impatti associati alle fonti rinnovabili per categoria, come fatto in precedenza nel caso Ventotene 2, Tabella 44.

Tabella 44: Valutazione dei danni per processo FRNP - Ventotene 3, 13000 cicli

<b>Human health</b>				
<b>Processo</b>	<b>Progetto</b>	<b>Unità</b>	<b>W Ventotene 13000 S 0.</b>	<b>W Ventotene VRFB S2 13000 .</b>
Il totale di tutti i processi				
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	101,10279	58,872311
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	1,09E-05	0,23
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	0,77	7,47
<b>Ecosystems</b>				
<b>Processo</b>	<b>Progetto</b>	<b>Unità</b>	<b>W Ventotene 13000 S 0.</b>	<b>W Ventotene VRFB S2 13000 .</b>
Il totale di tutti i processi				
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	0,25317	0,13678
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	1,46E-08	0,00031
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	0,00126	0,01219
<b>Resources</b>				
<b>Processo</b>	<b>Progetto</b>	<b>Unità</b>	<b>W Ventotene 13000 S 0.</b>	<b>W Ventotene VRFB S2 13000 .</b>
Il totale di tutti i processi				
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	9350524,8	2819883,9
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	0,17	3,57E+03
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	1,25E+04	1,21E+05

Ovviamente i vari valori sono ben diversi dalla soluzione Ventotene zero e si ha un incremento sostanzioso anche rispetto ai valori della tabella dello scenario precedente, Tabella 41.

## 8.2 Pantelleria

### 8.2.1 Pantelleria 0

Lo scenario Pantelleria 0 è lo scenario rappresentativo dell'attuale situazione energetica sull'isola di Pantelleria. La modellazione della situazione attuale in SimaPro è necessaria al confronto con gli scenari che verranno proposti di seguito nei quali si valuteranno gli impatti associati all'accoppiamento agli impianti presenti attualmente sull'isola dei dispositivi di accumulo elettrochimico e delle FRNP in quote aumentate per lo scopo prefissato dell'analisi in oggetto. Non vi sono accumulatori accoppiati a questo scenario e si riportano le quote attualmente disponibili di energia eolica e fotovoltaica dell'isola oltre al fabbisogno quasi interamente soddisfatto dalla centrale termoelettrica a gasolio SMEDE.

Si riporta la situazione attuale dell'isola, Figura 32, al momento risultano installati 647 kW di impianti fotovoltaici residenziali e 32kW di potenza eolica provenienti da due micro eolico, le quote di contribuzione delle FRNP attualmente installate alla soddisfazione del fabbisogno sono rispettivamente 1.8% per il fotovoltaico e 0.1% per l'eolico. Mediante l'utilizzo di una proporzione si ricavano i MWh prodotti sull'isola dalle diverse fonti, tenendo conto del numero di ore di funzionamento dei vari impianti. I dati sono riportati in Tabella 45, e corrispondono ai valori utilizzati nell'Excel che si è utilizzato per la modellazione e successivo inserimento dei risultati in SimaPro.

Tabella 45: Diversificazione energetica MWh - Pantelleria

<b>Produzione</b>	<b>valore</b>	<b>Unità</b>	<b>N°ore funz. impianti</b>	<b>Unità</b>
prod. Tot	45025,5	MWh		
termoelettrica	44170	MWh		
fotovoltaico	810,5	MWh	1252,6	h/anno
eolico	45,0	MWh	1407,0	h/anno

Il numero di ore di funzionamento ricavato per la fonte eolica risulta basso e il motivo è dovuto all'elevata, ventosità dell'isola, gli aerogeneratori di micro-eolico hanno spesso valori di cut-out a basse velocità del vento per evitare danneggiamenti dell'aerogeneratore. In numero di ore di funzionamento nello scenario 2 verrà incrementato grazie all'utilizzo di aerogeneratori di taglia maggiore.

Si riporta ora il dettaglio del consumo di combustibile della centrale termoelettrica considerato nell'arco della vita utile dell'accumulatore. Si ricorda che in questo scenario non si considera l'accumulo tuttavia si rende necessaria la stima delle quantità di gasolio per la centrale termoelettrica, per poterle poi confrontare con gli scenari successivi. Nel confronto successivo lo scenario 0 riporterà i valori energetici necessari alla soddisfazione del fabbisogno con i valori corrispondenti di gasolio consumati dalla centrale per l'arco di vita utile della batteria considerato Tabella 46.

Tabella 46: Combustibile consumato

<b>N° cicli</b>	<b>Litri gasolio</b>
3000	91.950.797
5000	119.195.478
13000	265.635.637

## 8.2.2 Pantelleria 1

Nel primo scenario per l'isola di Pantelleria si è ipotizzato di aggiungere un accumulatore di quota adeguata alla situazione attuale dell'isola. Non sono quindi state incrementate le quote energetiche relative alle FRNP, le quote rimangono quindi del 1.8% per la soddisfazione del fabbisogno da parte degli impianti fotovoltaici e dello 0.1 % la copertura da impianti eolici. L'accumulatore scelto sulla base della produttività annua delle fonti esistenti e del fabbisogno isolano è da 2.8 MWh. Si ipotizza che l'accumulo venga utilizzato per accumulare l'energia proveniente dalle FRNP. In questo modo si riesce a svincolare la domanda dall'offerta vista l'aleatorietà delle fonti, oltre a migliorare la qualità della potenza erogata e la stabilità di rete. Vengono presentate in, Tabella 47, le quote energetiche accumulabili dal sistema SdA in relazione alla producibilità degli impianti attuali nell'arco della vita utile del sistema di stoccaggio. In Tabella 48, vengono presentati i valori associati ai litri di combustibile che rimane necessario per la soddisfazione del fabbisogno da parte della centrale termoelettrica e quelli risparmiati grazie al sistema SdA. La differenza tra il combustibile consumato della soluzione attuale e quello risparmiato con l'impiego dell'accumulatore comporta un risparmio del 2.1% di utilizzo della fonte convenzionale fossile per la soddisfazione dei fabbisogni energetici sull'isola.

Tabella 47: MWh accumulati - Pantelleria 1

<b>N° cicli</b>	<b>MWh accumulati vita utile</b>
3000	7560
5000	9800
13000	21840

Tabella 48: Litri di combustibile risparmiato - Pantelleria 1

N° cicli	Litri gasolio necessari	Litri gasolio risparmiati
3000	89.988.792	1.962.006
5000	116.652.138	2.543.341
13000	259.967.621	5.668.016

Si procede con l'analisi degli impatti, il calcolo in SimaPro fornisce il seguente risultato, Figura 48.

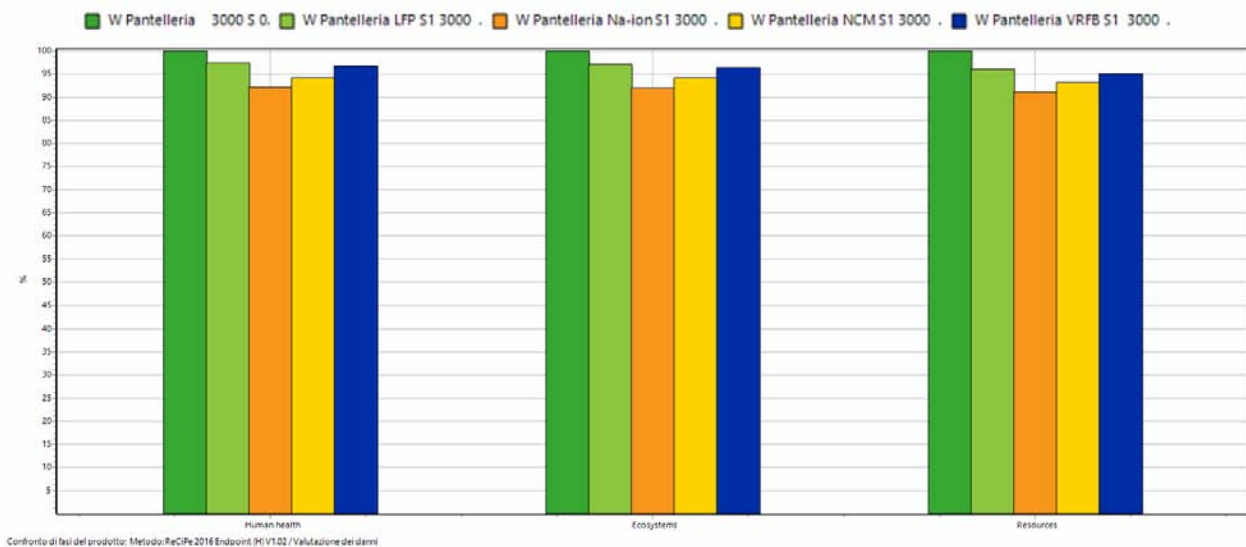


Figura 48: Valutazione dei danni - Pantelleria 1, 3000 cicli

Si può notare come la riduzione apportata dall'introduzione del sistema di accumulo sia minima rispetto allo scenario Pantelleria 0, privo di sistema di accumulo, tuttavia i vari scenari con le diverse tecnologie di accumulo si mostrano comunque ambientalmente più convenienti rispetto alla soluzione in verde scuro, anche se di poco. Valutando le diverse tecnologie nei tre indicatori di endpoint si hanno grandi differenze, in ordine dalla meno impattante si ha: la Na-ion, l'NCM, l'VRFB e l'LPF. Le ultime due tecnologie citate si equivalgono nei vari indicatori tuttavia sul consumo di risorse la VRFB ha un punto percentuale in meno della LPF a 96 %.

Si può affermare che la quota di combustibile comunque necessaria è molto elevata, di conseguenza gli impatti associati alla centrale termoelettrica risultano molto impattanti rispetto alla capacità dell'accumulo prevista per questo scenario.

Nei dettagli di processo dell'analisi dei danni il contributo dedicato alla produzione convenzionale incide al 64%, con un valore di 364 DALY nello scenario Pantelleria 0; mentre in Pantelleria 1, associato ai diversi sistemi di accumulo, la quota è del 63.4-63.9 %, ovvero 335 DALY.

Sull'ecosistema la produzione termoelettrica ha un valore ancora più elevato, per lo scenario 0, 1.07 species.yr ovvero il 74.8%, su Pantelleria 1 la produzione rimanente incide sull'ecosistema per 1.03 species.yr, ovvero tra 74.4-74.7% dell'indicatore a seconda della tecnologia di accumulo in esame.

Da ultimo il valore nell'indicatore delle risorse il 'crude oil, at production' incide per Pantelleria 0, di 5.07e7 USD2013, il 96% del valore dell'indicatore, mentre per Pantelleria 1 e le diverse tecnologie di accumulo 4.67e7 USD2013, tra il 95.4- 95.6% dell'indicatore.

L'esclusione del lungo termine non ha portato a risultati significativi, i valori variano complessivamente di un'unità percentuale solamente nella categoria human health.



I valori degli altri impatti nell'analisi dei processi risultano percentualmente poco rilevanti rispetto alla generazione termoelettrica, i risultati saranno visibili in appendice.

La valutazione continua con lo scenario Pantelleria 1 a 5000 cicli di vita utile della batteria, Figura 49.

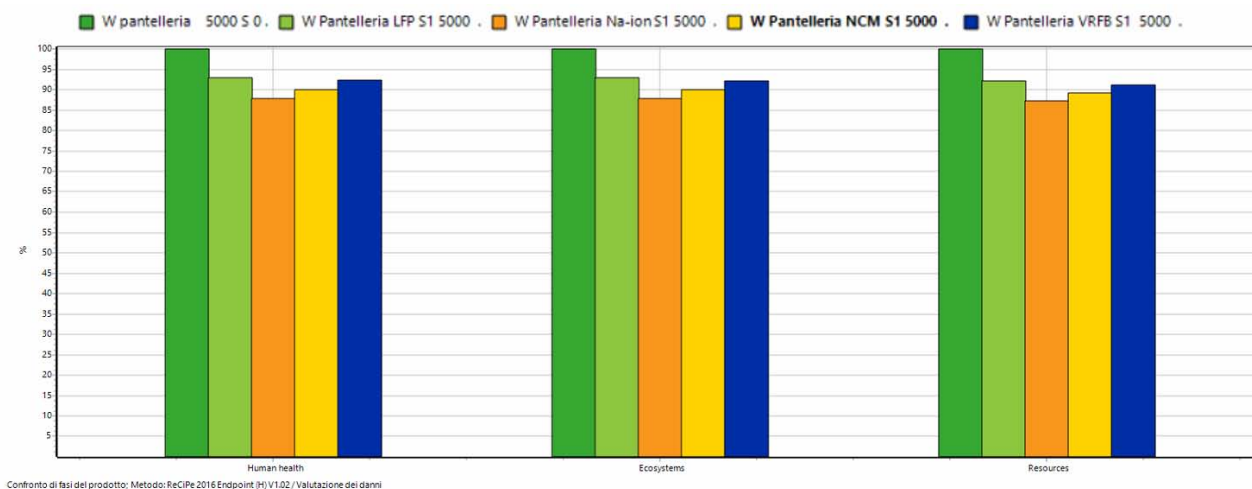


Figura 49: Valutazione dei danni - Pantelleria 1, 5000 cicli

Lo scenario valutato su una vita utile della batteria a 5000 cicli presenta una situazione simile alla precedente, ma come ci si aspettava con una riduzione maggiore degli impatti. Innanzitutto, il sistema di accumulo risulta conveniente in tutti e tre gli indicatori di endpoint e per tutte le tecnologie considerate. La riduzione degli impatti si ha per tutte le categorie, per la human health, la batteria VRFB ha abbassato la percentuale di incidenza sull'indicatore di un valore pari al 6.3%, la LFP del 4.4%, la Na-ion 4.2%, la NCM del 4.5%, rispetto allo scenario precedente, Pantelleria 1 3000.

Per gli altri indicatori le percentuali di riduzione si attestano a valori compresi tra il 4-5% per tutte le tecnologie. Aumentando la durata di vita della batteria l'accumulo e quindi l'energia stoccata al suo interno si riesce a contrastare in parte gli elevati impatti associati alla produttività della centrale termoelettrica che resta necessaria per la soddisfazione del fabbisogno.

Si presenta il risultato ottenuto per la valutazione dello scenario Pantelleria 1 a 13000 cicli, Figura 50.

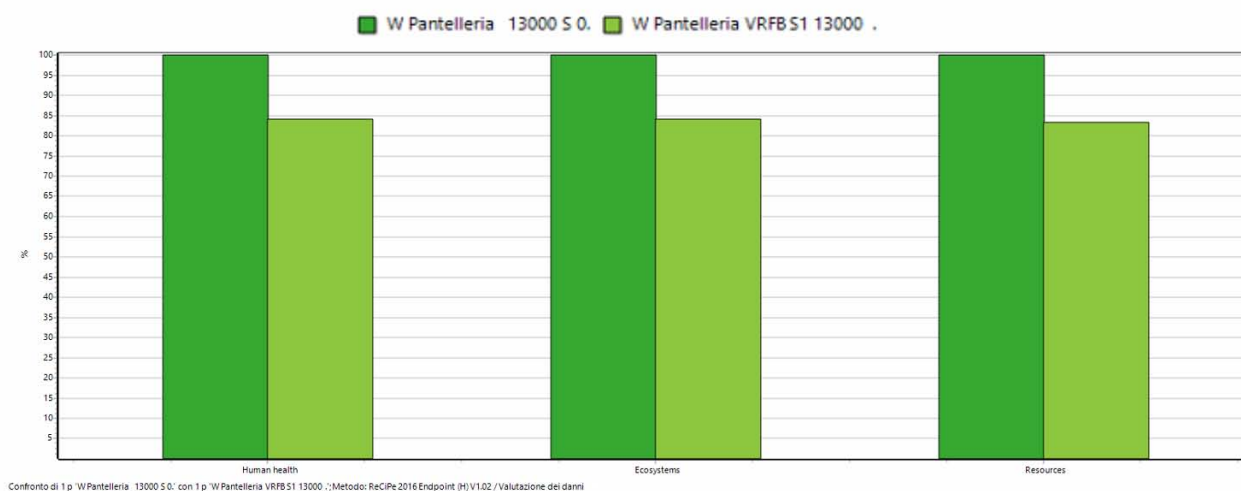


Figura 50: Valutazione dei danni - Pantelleria 1, 13000 cicli

Aumentando ulteriormente la durata utile della batteria si ha un netto distanziamento dallo scenario Pantelleria 0 senza accumulatore. La riduzione è del 15.8% per la salute umana, del 15.7% per l'ecosistema e del 16.6% per le risorse.

Possiamo dunque affermare che la soluzione Pantelleria1 con l'accumulo è conveniente dal punto di vista ambientale e comporta una riduzione del 2% dell'utilizzo della centrale termoelettrica. Tuttavia, si ritiene in ultima analisi che sia necessaria una produzione più diversificata con un maggior contributo di FRNP e un accumulatore di taglia maggiore al fine di offrire un valido contributo di stabilità ed efficienza della rete e abbassare i picchi di domanda e la chiamata al funzionamento della centrale. Le disponibilità di FRNP ad oggi presenti sull'isola non sono adeguate e l'inserimento dell'accumulatore per quanto ambientalmente meno impattante della soluzione originale, modificherebbe di poco la situazione energetica dell'isola.

Proprio per questa ragione nel secondo scenario ipotizzato per Pantelleria una penetrazione di FRNP molto più consistente.

### 8.2.3 Pantelleria 2

Per il secondo scenario ipotizzato nell'isola di Pantelleria, come il caso Ventotene 3, si sono incrementate le quote di FRNP e di capacità dell'accumulatore previsto per raggiungere l'obiettivo indicato dal Decreto ministeriale 14 febbraio 2017 MiSE che prevede la riduzione della percentuale di utilizzo della centrale termoelettrica SMEDE a gasolio, presente sull'isola, di un valore pari al 40%, Tabella 27. Nell'valutare la fattibilità degli impianti si sono riscontrate diverse difficoltà facenti riferimento alle aree protette dell'isola e all'ingente fabbisogno elettrico isolano. Si è proceduto per gradi, l'ampliamento della disponibilità degli impianti FRNP risulta limitata sul territorio. Vengono ora specificate le ipotesi fatte e le successive considerazioni a riguardo, con riferimento ai capitoli 7.2.2, 7.2.3.

L'installazione fotovoltaica residenziale obbligatoria è stata prevista su 900 tetti di edifici ad uso abitativo, per le considerazioni fatte in precedenza e la disponibilità di tetti più ampi, visti i diversi condomini presenti sul territorio,

Si è ipotizzata l'installazione di impianti in media da 5 kW. Si è tenuto conto del progetto 'Pantelleria emission free' in fase di realizzazione che prevede un'ulteriore installazione di 95 kW di potenza sui tetti delle scuole e sull'edificio del comune. E si sono ipotizzate installazioni da 40 kW sui tetti di 50 edifici industriali, come anche previsto dal progetto 'Pantelleria emission free' che portano nel complessivo all'aggiunta di 2 MW di potenza in un'area vicina all'attuale centrale. (33)

Le ipotesi così descritte portano ad un complessivo di 6.6 MW di potenza fotovoltaica installata, il valore porta ad una copertura del fabbisogno totale del 20% da fonte solare, considerando i preesistenti 647 kW.

Se si considera che nelle ipotesi si sono andati a coprire quasi tutti i tetti residenziali disponibili e più della metà degli edifici industriali con area di copertura sufficiente grande, si evince che la sola fonte solare non può coprire le necessità energetiche dell'isola. Sono in corso valutazioni su aree disponibili per impianti a terra di taglie superiori al MW, ma al momento si scontrano con le direttive comunali e ambientali. (33)

Per l'eolico la situazione diventa ancor più delicata, i limiti di ingombro, rumore, impatto visivo e 'disturbo' delle specie protette sono tutelate da ordinanze comunali e enti di concessione di tutela ambientale.

Con riferimento al capitolo 7.2.3, vengono ora riportate le assunzioni fatte.

Si è ipotizzata l'installazione di 3 aerogeneratori da 275 kW per un totale di 825 kW di potenza eolica installata, il posizionamento degli aerogeneratori è stato previsto vicino alla centrale termoelettrica in modo da ottenere una buona regolazione della rete e non creare scompensi al delicato sistema elettrico di Pantelleria. Gli aerogeneratori contribuiscono al 3.5% della soddisfazione del fabbisogno totale dell'isola, considerando i preesistenti 32 kW installati.

L'accumulo dimensionato per far fronte alla disponibilità ipotizzata da FRNP è da 30 MWh, una taglia consistente che tuttavia si rende necessaria vista l'intensa domanda su Pantelleria. Rispetto agli scenari precedenti in cui le quantità ipotizzate di accumulo erano sempre modeste e così pure gli incrementi nelle

FRNP qui gli equilibri vengono fortemente cambiati. Nella valutazione dello scenario ci si aspetta contributi molto più diversificati nelle varie tecnologie di accumulo.

Si riportano i dati relativi alle quantità energetiche accumulabili nella vita utile del sistema SdA, Tabella 49, e i conseguenti litri di combustibile necessari nonostante l'introduzione dell'accumulo, Tabella 50, la riduzione dell'utilizzo della centrale termoelettrica risulta consistente. Tuttavia la percentuale si attesta al 23% e non al 40% come ci si era prefissati, le motivazioni saranno spiegate di seguito.

Tabella 49: MWh accumulati per numero di cicli - Pantelleria 2

N° cicli	MWh accumulati vita utile
3000	81000
5000	105000
13000	234000

Tabella 50: Combustibile necessario al fabbisogno e combustibile risparmiato con SdA

N° cicli	Litri gasolio necessari	Litri gasolio risparmiati
3000	70.929.309	21.021.489
5000	91.945.400	27.250.078
13000	204.906.892	60.728.745

Si analizza lo scenario Pantelleria 2 in SimaPro partendo dalla valutazione a 3000 cicli di vita dell'accumulatore, Figura 51.

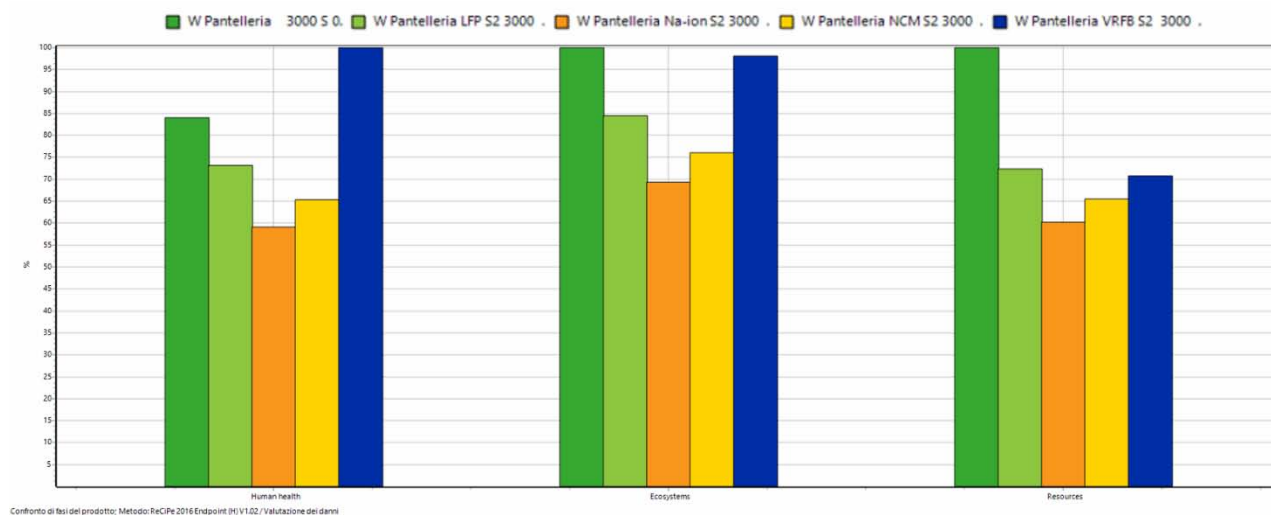


Figura 51: Valutazione dei danni - Pantelleria 2, 3000 cicli

Come ci si aspettava si ha avuto un forte mutamento nei valori associati agli endpoint per le quattro diverse tecnologie, dovuto alle elevate quantità energetiche coinvolte.

Emerge subito come l'impatto associato alla salute umana della VRFB sia molto più impattante della soluzione senza il sistema di accumulo, Pantelleria 0, in verde scuro, il distacco è del 15.1%. Anche nella categoria ecosistema la VRFB ha un impatto molto elevato, la convenienza rispetto alla soluzione 0 è solamente del 1.8 % del valore dell'indicatore. Per l'indicatore risorse invece il risultato è molto buono, si ha una riduzione tra il 30 e il 40% rispetto al caso senza accumulo. Le differenze percentuali nei diversi valori per le varie tecnologie dell'indicatore risorse variano percentualmente di meno rispetto ai valori negli altri indicatori, si ha quasi

un'equivalenza negli impatti della VRFB e della LFP. In linea generale si può sostenere che la convenienza dell'accumulo valutata tutti gli indicatori vede al primo posto la Na-ion, al secondo la NCM segue la LFP e non viene invece considerata la VRFB visto che presenta valori di non convenienza ambientale per la human health.

Per la VRFB incide il pentossido di vanadio al 23% dell'indicatore salute umana, un valore di 155 DALY, non presente nelle altre tecnologie. Altri valori che incidono per questa tecnologia sono il solfato d'alluminio, il carbonato di sodio e l'acido solforico in percentuali dal 3-5%. anche sull'ecosistema il componente principale dell'elettrolita della VRFB ha un peso del 13%, 0.182 species.yr.

Il pentossido di vanadio non rientra nelle materie prime dell'indicatore risorse in quanto prodotto chimicamente, gli impatti infatti risultano associati ai componenti primari del pentossido di vanadio (solfato di ammonio, solfato di sodio, carbonato di sodio), ma non concorrono in maniera rilevante al peso totale dell'indicatore per la batteria, i valori si attestano intorno al  $1.4e5 - 1.8e5$  USD<sub>2013</sub>, ovvero lo 0.3-0.4% del totale.

L'incremento delle quote prodotte di energia da FRNP non compare nei dettagli degli impatti per contributo di processo come valore elevato, ma si attesta intorno al 2-4% dei diversi indicatori per il fotovoltaico, per l'eolico tra lo 0.04-0.2%.

Si riportano i valori per indicatori associati agli incrementi di FRNP, l'energia solare: sulla salute umana 20 DALY, per l'ecosistema 0.0327 species.yr,  $3.25e5$  USD<sub>2013</sub> per le risorse; l'energia eolica invece: 1.07 DALY sull'indicatore salute umana, 0.0143 species.yr per l'ecosistema e  $1.66e4$  USD<sub>2013</sub> per le risorse.

Anche in questo caso l'esclusione del lungo termine non presenta risultati diversamente rilevanti, le percentuali di riduzione tra VRFB e la soluzione 0 nell'indicatore salute umana variano solamente di 1.4% negli altri indicatori non si ottengono differenze. Le ragioni di questa mancata variazione sono dovute alle quantità consistenti coinvolte nell'analisi e al peso del combustibile fossile necessario, che Pantelleria risulta molto elevato.

I valori sono notevolmente maggiori rispetto allo scenario Pantelleria 0, tuttavia non incidono in modo prevalente sull'incremento degli impatti ambientali associati agli indicatori.

Si procede con la valutazione dello scenario Pantelleria 2 a 5000 cicli di vita utile della batteria, Figura 52.

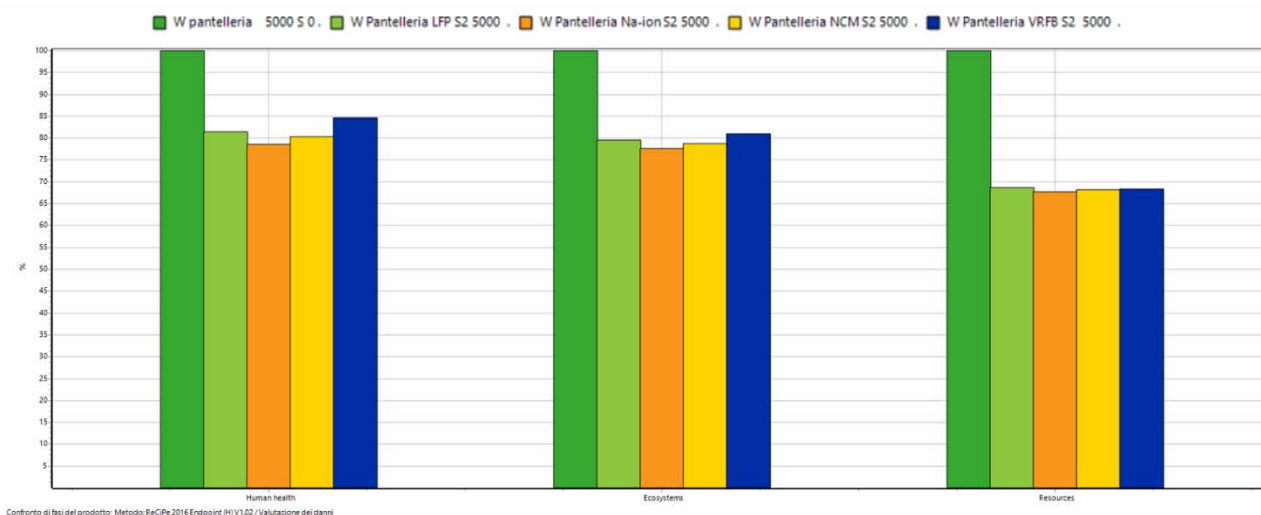


Figura 52: Valutazione dei danni - Pantelleria 2, 5000 cicli

Si nota come l'allungamento della vita degli accumulatori abbia inciso positivamente su tutte le tecnologie confrontate, la VRFB è ampiamente rientrata nel campo di convenienza ambientale e per l'indicatore risorse le diverse tecnologie possono essere considerate tra loro equivalenti. Anche per l'indicatore salute umana ed

ecosistema le tecnologie si assestano valori poco diversi tra loro e si stabilizza il divario con la soluzione attuale sull'isola, verde scuro.

Crescono mediamente gli impatti associati alle FRNP e calano rispettivamente i valori relativi alla produzione della centrale termoelettrica, vengono riportati gli impatti associati alle fonti rinnovabile nello scenario in oggetto.

Per l'energia prodotta tramite pannelli fotovoltaici: salute umana 26 DALY, tra il 4.15-4.47% del peso dell'indicatore a seconda della tecnologia in esame, ecosistema 0.0424 species.yr, 2.82-2.94%, per le risorse 4.19e5 USD2013, tra lo 0.89-0.90% del valore totale dell'indicatore.

Per l'energia prodotta tramite aerogeneratori invece si ha: salute umana 1.38 DALY, compreso tra 0.22-0.23%, per l'ecosistema 0.00185 species.yr , lo 0.126-0.129% ed infine sull'indicatore delle risorse 2.14e4 USD2013, 0.045-0.046% del peso dell'indicatore per le diverse tecnologie.

Rispetto al caso precedente Pantelleria 2,3000 cicli si ha un moderato aumento dei valori e del peso delle FRNP sul totale per ogni tecnologia esaminata, il tutto è coerente con l'aumento della vita utile della batteria, le quantità stoccate e prodotte dagli impianti aumentano linearmente.

Si è scelto di riportare per questo caso l'analisi completa di caratterizzazione che comprende tutte le singole categorie d'impatto che vengono poi riassunti dagli indicatori di endpoint. Si sceglie di farlo in questa fase in quanto è quella che consente di valutare le caratteristiche dei sistemi SdA con maggior completezza, se venisse fatto sui 3000 cicli, batterie come quella a flusso di vanadio non risulterebbero convenienti e d'altro canto prolungare a 13000 cicli la vita di batterie che non possono tecnologicamente sostenere tale limite risulterebbe inutile. Viene quindi riportata la caratterizzazione completa, divisa in due immagini per problemi di spazio ed impaginazione.

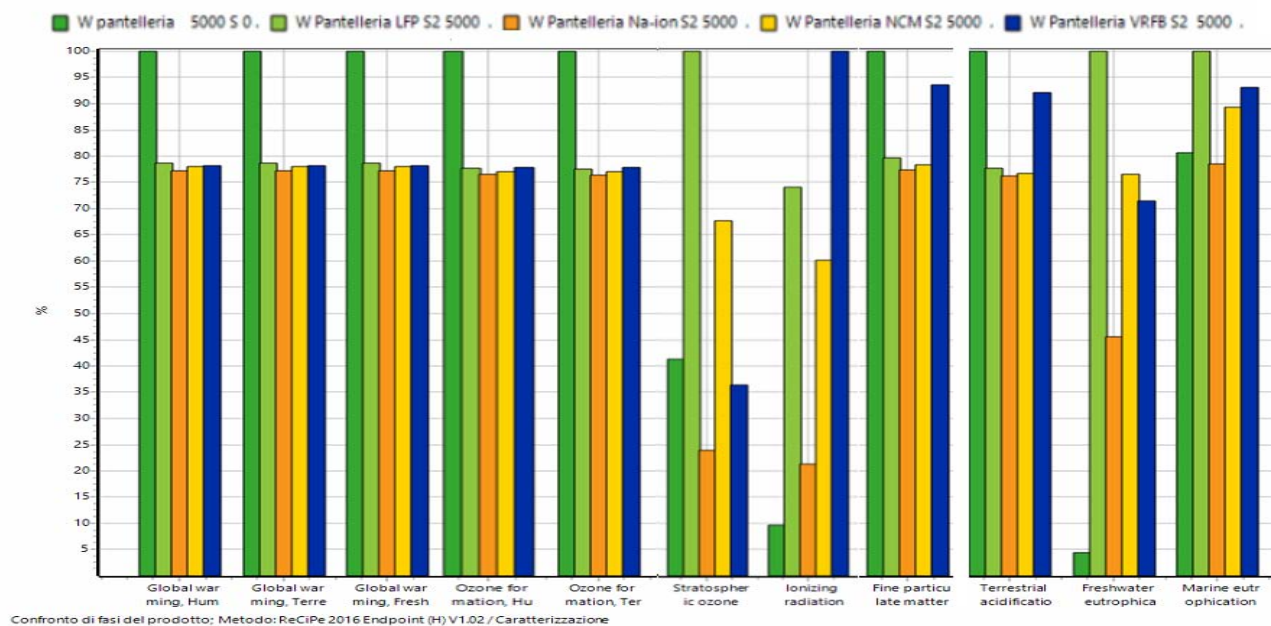


Figura 53: Caratterizzazione - Pantelleria 2, 5000 cicli A

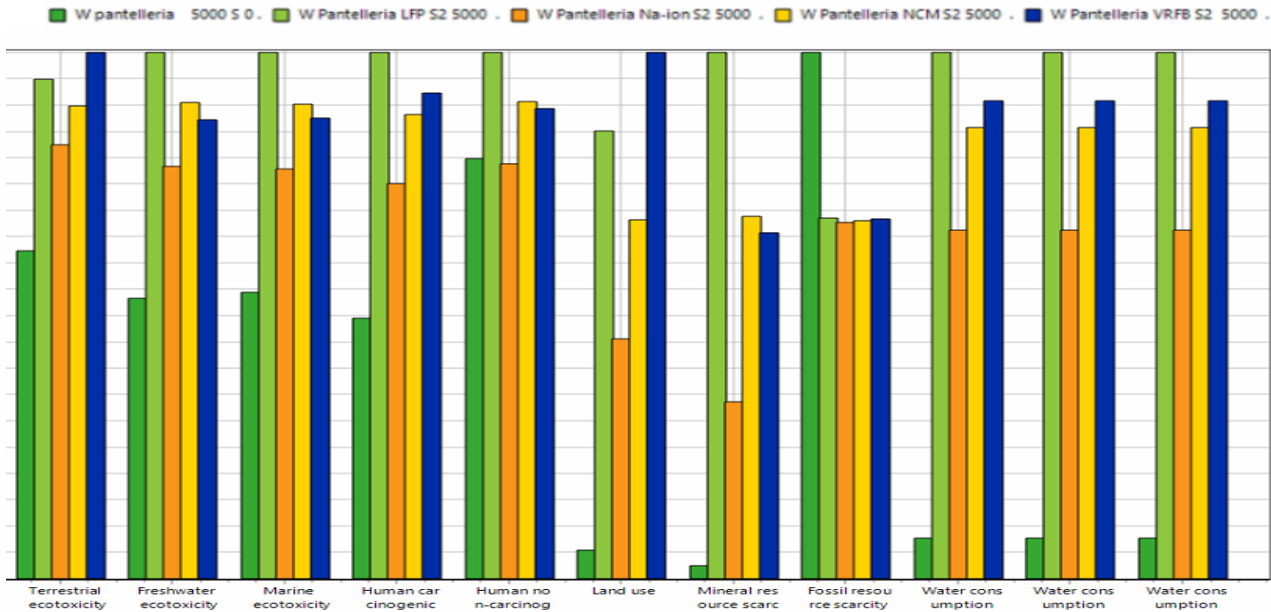


Figura 54: Caratterizzazione - Pantelleria 2, 5000 cicli B

Analizzando i risultati ottenuti dalla caratterizzazione si nota come i primi tre valori global warming potential-human, global warming-terrestrial ecosystem e global warming fresh water ecosystem presentino praticamente risultati uguali tra loro, le diverse tecnologie di accumulo possono dirsi equivalenti in questi tre indicatori, si nota anche come vi sia un distacco percentuale di almeno 20 punti tra la soluzione priva di accumulo e le quattro tecnologie proposte.

Anche i valori dell'ozone formation-human health, dell'ozone formation-terrestrial ecosystem rimangono come i precedenti in linea con quelli analizzati nella valutazione dei danni.

Per lo stratospheric ozone depletion, il contributo maggiore è dovuto alla LFP, segue la NCM e invece Na-ion e VRFB si mantengono molto impattanti della soluzione priva di accumulo. Si prosegue quindi nel dettaglio di processo, il contributo maggiore lo ha il tetrafluoroetilene, componente utilizzato sia nella produzione del catodo della batteria agli ioni di sodio, in entrambi gli elettrodi per la LFP e nella membrana al nafion per la VRFB. Per la LFP il tetrafluoroetilene incide al 75.9% del peso dell'indicatore dell'esaurimento dell'ozono stratosferico. Per la NCM al 66.9%.

Per le radiazioni ionizzanti la VRFB si mostra la batteria più impattante seguita dal NCM, l'impatto in dettaglio mostra il solfato di sodio come processo a maggior impatto per entrambe le tecnologie.

Gli indicatori fine particulate matter e terrestrial acidification mostrano risultati equivalenti, tutte le tecnologie risultano meno impattanti della soluzione priva di batteria eccetto la VRFB, il dettaglio dell'analisi dei processi reputa come maggior responsabile il pentossido di vanadio, utilizzato nell'elettrolita che incide per entrambi gli indicatori con un peso pari al 15% del totale valore dell'indicatore.

Per il fresh water eutrophication la diversificazione degli impatti associati alle diverse tecnologie presenta valori molto diversi, tutti gli scenari con gli accumulatori presentano impatti anche molto rilevanti rispetto alla soluzione priva di accumulatori. Il dettaglio dei processi imputa gli impatti maggiori non tanto a processi relativi a componenti interne degli accumulatori ma ai processi di produzione di FRNP, il solare tra il 35-40% e l'eolico al 2.5-3%. Nei componenti delle batterie incide il rame, presente nel BMS della LFP e nei cavi di collegamento per tutte le altre tecnologie.

Gli indicatori marine eutrophication, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity e human non-carcinogenic toxicity presentano valori molto simili in cui tutti i sistemi SdA hanno valori molto maggiori della soluzione priva di accumulo anche per questi indicatori il peso maggiore è attribuito alla generazione FRNP e al rame.

L'ultimo indicatore al quale si desidera dare particolare rilievo è il mineral resource scarcity, anche in questo caso tutti gli scenari con accumulatore presentano valori molto maggiori dello scenario che non lo prevede.

Come ci si aspettava la batteria agli ioni di sodio presenta l'impatto minore, segue la VRFB, poi la NCM e l'impatto maggiore è attribuito alla LPF.

Il litio incide per la LPF al 29.6% del peso dell'indicatore e per la NCM al 22.3%, l'incidenza delle FRNP è elevata anche in questo indicatore tra il 26 e il 78% in base alla tecnologia in esame. Si riporta ora come confronto il dettaglio della Mineral resource scarcity per l'accumulatore con l'impatto maggiore sull'indicatore (LPF) e quello con l'impatto minore (Na-ion).

I colori non sono rappresentativi degli stessi processi, nello scenario della LPF la maggior incidenza è associata al litio utilizzato negli elettrodi, mentre il secondo impatto è relativo all'energia prodotta da fonte solare, si ha poi il rame degli elettrodi e la produzione dei substrati, Figura 55.

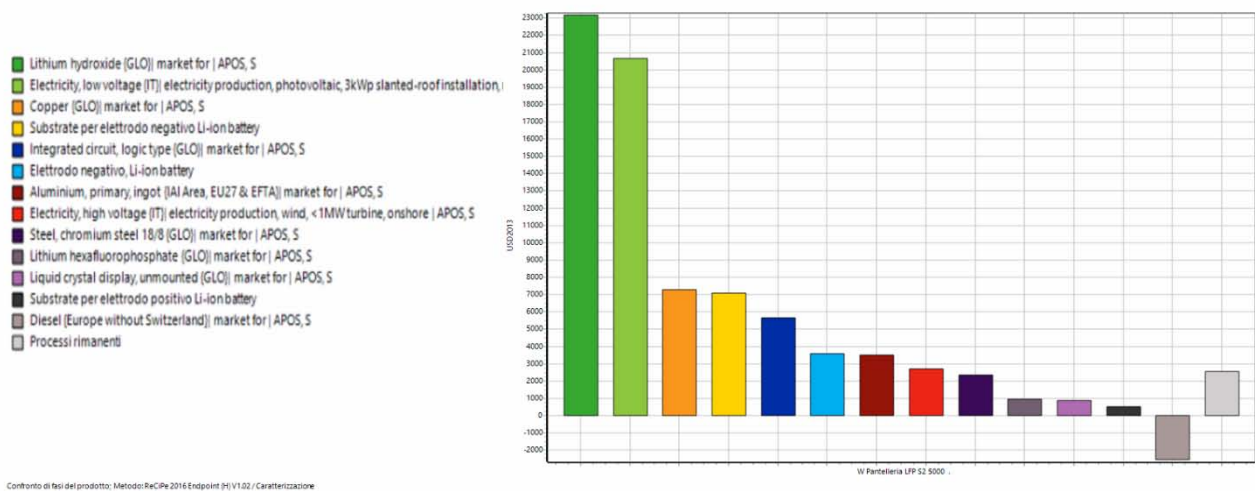


Figura 55: Mineral Resource Scarcity - Pantelleria 2, 5000 LPF

Per lo scenario con la Na-ion, priva di litio, Figura 56, l'impatto maggiore è associato alla fonte solare, segue il solfato di nickel utilizzato nella produzione del carbonato di nickel per la composizione del catodo e segue infine in arancione la quota relativa alla produzione dell'energia eolica che alimenta l'accumulatore.

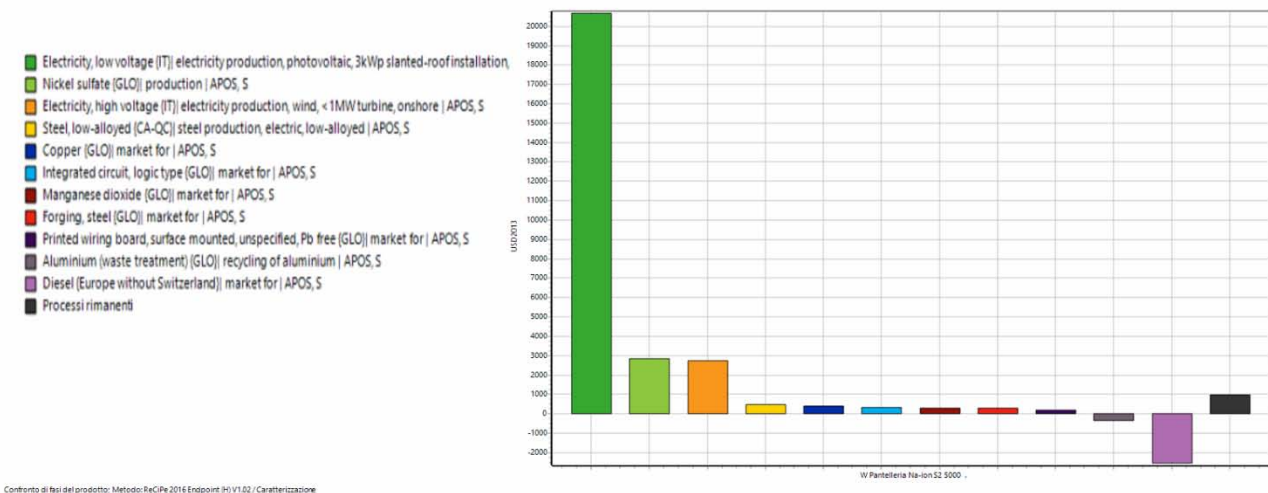


Figura 56: Mineral Resource Scarcity - Pantelleria 2, 5000 Na-ion

Si conclude con lo scenario Pantelleria 2, 13000 cicli, Figura 57.

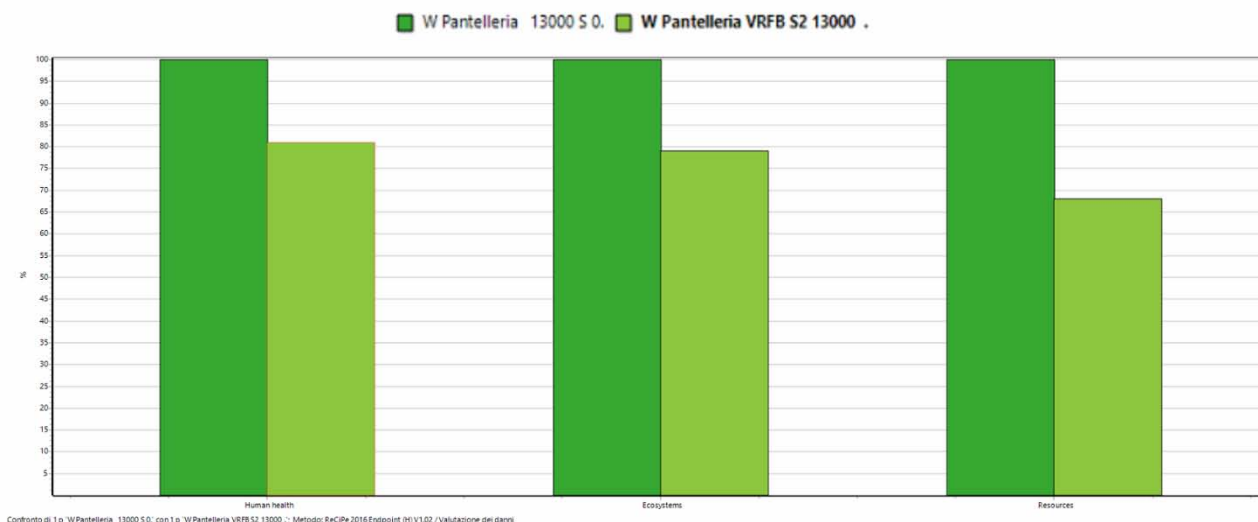


Figura 57: Valutazione dei danni - Pantelleria 2, 13000 cicli

La soluzione risulta conveniente dal punto di vista ambientale, la riduzione nell'indicatore delle risorse è del 32% del peso. Come per le altre valutazioni in questo scenario a 13000 si sommano impatti aggiuntivi dovuti all'incremento delle quote di energia prodotta da FRNP che nella durata di vita utile della batteria sono maggiori. Si riporta il dettaglio del confronto tra gli impatti associati alla soluzione attuale e quella con le percentuali di FRNP incrementate al 23% della copertura del fabbisogno, che comportano la riduzione del 23% dell'utilizzo della centrale termoelettrica.

Tabella 51: Valutazione dei danni per processo FRNP - Pantelleria 2, 13000 cicli

Human health				
Processo	Progetto	Unità	W Pantelleria 13000 S.0.	W Pantelleria VRFB S2 13000.
Il totale di tutti i processi				
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	1646,5983	1333,5871
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	DALY	8,67E-05	3,08
		DALY	5,29	57,88
Ecosystems				
Processo	Progetto	Unità	W Pantelleria 13000 S.0.	W Pantelleria VRFB S2 13000.
Il totale di tutti i processi				
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	4,12967	3,26239
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	species.yr	1,16E-07	0,00413
		species.yr	0,00862	0,09441
Resources				
Processo	Progetto	Unità	W Pantelleria 13000 S.0.	W Pantelleria VRFB S2 13000.
Il totale di tutti i processi				
Electricity, high voltage {IT}  electricity production, wind, <1MW turbine, onshore   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	152848800	103928290
Electricity, low voltage {IT}  electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation  APOS, S	Ecoinvent 3 - allocation at point of substitution - system	USD2013	1,35	4,81E+04
		USD2013	8,53E+04	9,34E+05

Visti gli impatti qui sopra associati si possono fare una serie di considerazioni. Innanzitutto, come già esplicitato nella fase di presentazione dello scenario non si è conseguito l'obiettivo posto dal decreto MiSE 2017, che prevedeva la riduzione del 40% dell'utilizzo della fonte convenzionale, ovvero la centrale



termoelettrica di SMEDE a gasolio. In realtà per come si è impostato il procedimento di calcolo in questo lavoro di tesi determinate assunzioni funzionali alla valutazione degli impatti non corrispondono alla realtà nella gestione degli impianti e delle reti. E' stato spiegato come si sia ipotizzato che la totale energia prodotta dagli impianti FRNP venga direttamente accumulata all'interno dei sistemi SdA e già quest'assunzione non considera una gestione intelligente dell'sistema di accumulo; il sistema viene utilizzato per l'immagazzinamento delle quote energetiche FRNP, ma non necessariamente di tutta la potenza prodotta da eolico e fotovoltaico, generalmente di quella parte non necessaria nel momento di mancato picco della domanda energetica. La risposta dei sistemi di accumulo all'assorbimento e smorzamento dei picchi di domanda e offerta viene regolata sulla base del conseguimento della stabilità della rete elettrica. Si può quindi affermare che in un'ottica di smart grid la riduzione di utilizzo della centrale termoelettrica con le quote di FRNP aggiunte al 23% e un accumulatore da 30MWh possa portare ad una riduzione dell'utilizzo della centrale termoelettrica superiore al 23%. E questo è il motivo per cui non si è scelto di procedere con un ulteriore incremento delle taglie dei sistemi coinvolti. Il calcolo di massima era stato comunque effettuato in ambiente Excel e portava il valore di penetrazione delle rinnovabili al 30% del fabbisogno attuale, insistendo maggiormente sulla fonte eolica e comporta però un accumulatore da 62MWh, la soluzione comportava la riduzione del 39.9% di utilizzo della centrale SMEDE.

Tuttavia, si ritiene quello presentato in quest'ultimo scenario Pantelleria 2, in particolare per la durata di vita utile a 5000 cicli, una valida alternativa alle risorse attualmente utilizzate. Si deve considerare che valori di penetrazione delle FRNP maggiori di quelli proposti sono attualmente poco realistici viste le stringenti norme comunali e ambientali. Si sono approfonditi diversi studi riguardanti la possibilità di impianti off-shore vicini all'isola che la porterebbero ad essere al 100% alimentata a rinnovabile.

Il sistema di accumulo nella taglia proposta presenta valori di impatto notevolmente minori della situazione attuale.

Si sottolinea la sostanziale differenza tra i 2 scenari proposti per Pantelleria, nel caso in cui si applicasse solamente il sistema di accumulo senza incrementare le quote di energia pulita la soluzione porterebbe alla riduzione del 2% di utilizzo della centrale termoelettrica e non ostante gli impatti siano comunque minori è evidente che la riduzione associata al secondo scenario Pantelleria 2 risulta notevolmente più conveniente, sia considerando gli impatti ambientali ma anche facendo riferimento alla riduzione dei litri di combustibile associata. È chiaro che a fronte della realizzazione di queste tipologie di scenari subentra un fatto di costo di installazione di impianti non certo irrilevante. Tuttavia, le cifre di incentivo stabilite da MiSE fanno rientrare la soluzione in un campo di convenienza sia per il comune che per il gestore SMEDE.

# Conclusioni

In relazione all'obiettivo iniziale dell'analisi LCA si sono valutati gli impatti e la convenienza ambientale delle quattro tipologie di accumulatori analizzati sia singolarmente che in relazione a specifici scenari energetici. La modellazione di una batteria tecnologicamente nuova e ad uno stato iniziale di sviluppo ha dimostrato la sua convenienza ambientale nella maggior parte delle categorie. Essa emerge dunque come potenziale alternativa alle altre tipologie di sistemi oggi utilizzati.

Le batterie agli ioni di sodio sono risultate promettenti per tutti gli aspetti ambientali, mostrando, per MWh di capacità di stoccaggio, impatti ambientali all'estremità inferiore degli indicatori di impatto considerati rispetto alle attuali batterie. Il potenziale di miglioramento per questa tecnologia è ancora significativo e si rifà alla possibilità di ridurre ulteriormente gli impatti ambientali associati alla produzione dell'hard carbon per l'anodo e al contenuto di nichel nel materiale catodico attivo.

Per rendere meno impattante l'hard carbon, diversi studi propongono l'uso di rifiuti organici come valida alternativa alla produzione del materiale (19). La possibilità di utilizzare l'alluminio sia per l'anodo che per il catodo evita l'utilizzo del rame, quest'ultimo è uno dei principali innalzatori degli impatti causati dalla produzione delle altre tecnologie.

Un altro fattore critico è il legante usato per la produzione di elettrodi. Il PVdF (polivinilfluoride) è associato a emissioni molto elevate di gas che concorrono con un importante contributo al GWP. Di conseguenza, l'uso di leganti alternativi a base acquosa anche per il catodo potrebbe ridurre ulteriormente le emissioni di gas a effetto serra, sia per la batteria agli ioni di sodio sia che per la LPF.

La domanda di energia (elettricità e calore) per la produzione delle batterie agli ioni di sodio, ipotizzata equivalente alle altre tecnologie, è un fattore importante per gli impatti ambientali. Il miglioramento dell'efficienza energetica del processo di produzione, fortemente guidato dai forni necessari per l'assemblaggio delle celle, potrebbe ridurre gli impatti ambientali per tutte le diverse tipologie di accumulo confrontate.

Infine, la minimizzazione della quantità richiesta di componenti elettronici (cavi, BMS) potrebbe migliorare le prestazioni ambientali della Na-ion, contribuendo anche in modo significativo agli impatti generali. Ancora una volta, questo vale allo stesso modo per tutte le tecnologie esaminate, specialmente per le VRBF che presentano un'elevata % in peso di componenti associati al BMS.

I valori della valutazione ambientale per la Na-ion sono molto soddisfacenti; tuttavia, se si considera la capacità di accumulo di energia nel corso della vita utile, è fondamentale raggiungere un'elevata durata del ciclo e una buona efficienza di carica-scarica. Ciò rappresenta la sfida principale soprattutto quando si compete con batterie agli ioni di litio di tipo LFP-NCM che mostrano già una durata straordinariamente lunga.

Per quanto riguarda la valutazione dei cinque diversi scenari analizzati, si è verificata la convenienza ambientale dell'installazione degli accumulatori per tutti gli scenari, fatta eccezione di qualche impatto maggiore associato alla LPF e alla VRFB nelle fasi di valutazione a 3000 cicli di vita utile. L'incremento della vita dei sistemi fa rientrare nel campo della convenienza ambientale le singole tecnologie che a 3000 risultavano in alcuni casi escluse.

I sistemi di accumulo consentono di ridurre gli impatti associati alla produzione energetica convenzionale, considerando le ipotesi e le assunzioni fatte, tuttavia si è verificato come l'incremento di quote modeste di energia rinnovabile nel paniere produttivo, consenta di migliorare l'efficienza ambientale complessiva dei sistemi comprendenti le tecnologie SdA rispetto a quelli sprovvisti.

Si è potuto verificare come certe condizioni energetiche di scenario assottiglino le differenze associate agli impatti delle diverse tecnologie di accumulo, in particolare, considerando sistemi di taglia più grande come nel caso di Pantelleria 2, dove i sistemi di accumulo potevano considerarsi tra loro equivalenti.

La quota di consumo di combustibile che il sistema di accumulo va a ridurre incide con un impatto positivo sugli eco-indicators ed è quindi associata ad un miglioramento dei livelli degli indicatori principalmente sulle risorse, meno evidente sulla salute umana e sull'ecosistema.

Per quanto gli scenari si riferiscano a località italiane con caratteristiche ben definite nell'analisi degli impatti non è stata inserita nessuna specifica riguardo al luogo di emissione delle sostanze.

Sicuramente il progresso tecnologico implementerà le caratteristiche degli accumulatori qui esaminati e la ricerca continua sui materiali porterà, nel breve termine, a tecnologie più mature con caratteristiche diverse in termini di stabilità, numero di cicli di vita utile e densità energetica. Si ritiene in ultima analisi che i sistemi di accumulo siano un valido supporto alla gestione della rete e consentano la riduzione degli impatti associati alla produzione convenzionale, sia che vengano utilizzati in appoggio a situazioni esistenti e ancor più se l'installazione risulta congiunta con impianti da fonti FRNP.

# Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento alla prof.ssa. Anna Stoppato per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro di tesi, per la fiducia manifestata e per l'infinita disponibilità dimostrata ancor più in questa difficile situazione d'emergenza, con l'impossibilità di un confronto personale e di poter utilizzare gli spazi didattici. La sua tempestiva risposta e il suo attivo impegno per la risoluzione delle problematiche relative ai procedimenti per la prosecuzione di questo lavoro di tesi, mi hanno consentito di completare il compito nei tempi prefissati nonostante tutto.

Ringrazio gli amici dell'università per l'aiuto reciproco, la collaborazione nello studio ma anche per le distrazioni e i divertimenti che hanno fatto da contorno a 5 anni di studi. Il più grande ringraziamento va alla mia famiglia e ai miei genitori che con i loro sacrifici e il loro supporto mi hanno dato la possibilità di raggiungere questo importante traguardo, e a Danny per il sostegno, la pazienza e l'affetto che non mi fa mai mancare.

# Elenco degli acronimi utilizzati

Na-ion- accumulatore agli ioni di sodio

LFP- accumulatore litio-ferro-fosfato

VRFB- accumulatore a flusso di vanadio

NCM-accumulatore nichel-cadmio-magnesio

LCA- life cycle assessment

LCIA- life cycle impact assessment

FRNP-fonti rinnovabili non programmabili

SdA-sistemi di accumulo

BMS-sistema di gestione batteria

NMNT-materiale attivo per la produzione catodo

LFP-litio ferro fosfato

LTO-litio titanato

GWP-global warming potential

DALY

Species.yr

USD2013

CMC- carbossimetilcellulosa di sodio

MGP-mercato del giorno prima

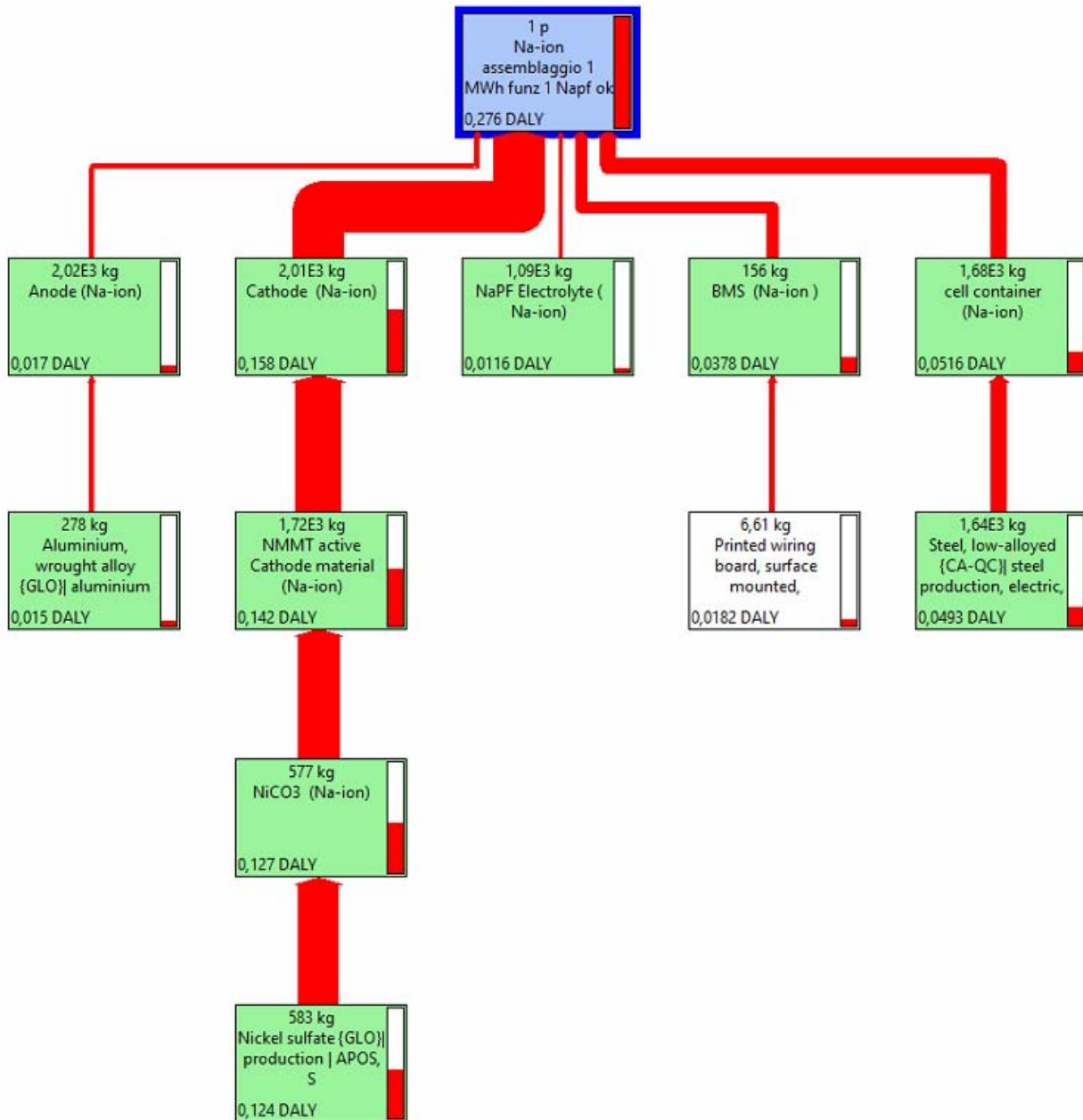
# Bibliografia

1. Riva, C. R. (2016). *Diritto penale dell'ambiente: Parte generale: Principi, beni e tecniche di tutela; Parte speciale: Reati contenuti nel d. lgs. n. 152/2006 e nel codice penale*. G Giappichelli Editore.
2. Bonato, D. (2012). *La terza crisi: come sconfiggere la crisi e difendere il futuro di imprese e famiglie*. Edizioni Ambiente.
3. ARE, U. (2020). 1987: Rapporto Brundtland. Retrieved 31 March 2020, from [https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/cooperazione-internazionale/agenda2030/onu\\_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile/1987--rapporto-brundtland.html](https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/cooperazione-internazionale/agenda2030/onu_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile/1987--rapporto-brundtland.html)
4. R, Molesti. "I fondamenti della bioeconomia. Il pensiero di N. Georgescu-Roegen sull'eccessivo sfruttamento delle risorse energetiche – Iniziative bioeconomiche . *Economia e Ambiente*. 2005,
5. Pettenella, D., Zanchi, G., Pilli, I., Anfodillo, T., & Dalla Valle, E. (2006). Inquadramento generale del protocollo di Kyoto. Opportunità e limiti per il settore forestale. *Stima del Carbonio in foresta: metodologie e aspetti normativi*” (Pilli R, Anfodillo T, Della Valle E eds). *Atti del*, 42, 1-10.
6. L'Italia ed il Protocollo di Kyoto | Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. (2020). Retrieved 31 March 2020, from <https://www.minambiente.it/pagina/litalia-ed-il-protocollo-di-kyoto>
7. Pacchetto per il clima e l'energia 2020 - Azione per il clima - European Commission. (2016). Retrieved 31 March 2020, from [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_it](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_it)
8. CIEL (2012). Retrieved 31 March 2020, from <https://www.ciel.org/news/its-a-crisis-act-like-it-cop25-outcome-inconsistent-with-urgency-and-ambition-demanded-to-confront-the-climate-crisis/>
9. Emas — (2014). Retrieved 31 March 2020, from <http://www.isprambiente.gov.it/it/certificazioni/emas>
10. EUR-Lex - I28011 - EN - EUR-Lex. Retrieved 31 March 2020, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM%3AI28011>
11. normazione, UNI ente italiano di. UNI EN ISO 14040:2006. [Online] 2006. [http://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-14040-2006?josso\\_back\\_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso\\_cmd=login\\_optional&josso\\_partnerapp\\_host=store.uni.com](http://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-14040-2006?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_optional&josso_partnerapp_host=store.uni.com).
12. Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2005). *Analisi del ciclo di vita LCA: materiali, prodotti, processi*. Edizioni ambiente.
13. EPRI, D. (2010). Electricity Energy Storage Technology Options-A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits. *Report*.
14. Olivieri, G., Romani, A., & Neri, P. (2006). Environmental and economic analysis of aluminium recycling through life cycle assessment. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 13(4), 269-276.

15. Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric power systems research*, 79(4), 511-520.
16. Pietrucci, M. *Progetti Pilota Power Intensive: Descrizione degli impianti e delle tecnologie*. s.l. : TERNA.
17. Conte, M., Graditi, G., Ippolito, M. G., Sanseverino, E. R., Telaretti, E., & Zizzo, G. (2011). Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate. *Report RdS/2011/303*.
18. Alessandrini, F., Appetecchi, G. B., & Conte, M. (2010). Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie al litio nelle reti elettriche—Stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici. *ENEA Report*.
19. Palomares, V., Serras, P., Villaluenga, I., Hueso, K. B., Carretero-González, J., & Rojo, T. (2012). Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems. *Energy & Environmental Science*, 5(3), 5884-5901.
20. Ong, S. P., Chevrier, V. L., Hautier, G., Jain, A., Moore, C., Kim, S., ... & Ceder, G. (2011). Voltage, stability and diffusion barrier differences between sodium-ion and lithium-ion intercalation materials. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3680-3688.
21. Peters, J., Buchholz, D., Passerini, S., & Weil, M. (2016). Life cycle assessment of sodium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 9(5), 1744-1751.
22. Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J. (2010). Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles
23. Woyski, M. M., Shenk Jr, W. J., & Pellon, E. R. (1950). Hexafluorophosphates of Sodium, Ammonium, and Potassium. *Inorganic Syntheses*, 3, 111-117.
24. Berni TV, Guimaraes FH, Pereira ACC. Process for production of nickel carbonate. 2012.
25. Salin, D. (2019). LCA di accumulatori elettrochimici in diversi contesti energetici.
26. V. Baglio, A. Paolone, A. Sanson, P. P. Prosini, E. Micolano, L. Pellegrino. Sistemi di accumulo elettrochimico . *RSE*. 2008.
27. Liu, T., Zhang, Y., Chen, C., Lin, Z., Zhang, S., & Lu, J. (2019). Sustainability-inspired cell design for a fully recyclable sodium ion battery. *Nature communications*, 10(1), 1-7.
28. Retrieved 31 March 2020, from [https://www.autorita.energia.it/allegati/relaz\\_ann/15/RAVolumeII\\_2015.pdf](https://www.autorita.energia.it/allegati/relaz_ann/15/RAVolumeII_2015.pdf)
29. Legambiente, CNR-IIA. *ISOLE SOSTENIBILI-osservatorio sulle isole minori* . 2019.
30. Enel-sostenibilità. *El Hierro: l'isola dove le rinnovabili sono un tesoro*. 2016.
31. Town of Ventotene ZIP 04020 (LT) Lazio, Italy. Retrieved 31 March 2020, from <http://italia.indettaglio.it/eng/lazio/ventotene.html>
32. Guastalla, S. (2000). Valutazione sulle potenzialità dell'impiego dei sistemi ibridi (fotovoltaico, eolico, diesel) nelle Isole Minori Italiane. *relazione CESI per Ricerca di Sistema, prot. A0-042371*, 22-12.

# Appendice A

## A. Diagramma ad albero processo di assemblaggio Na-ion





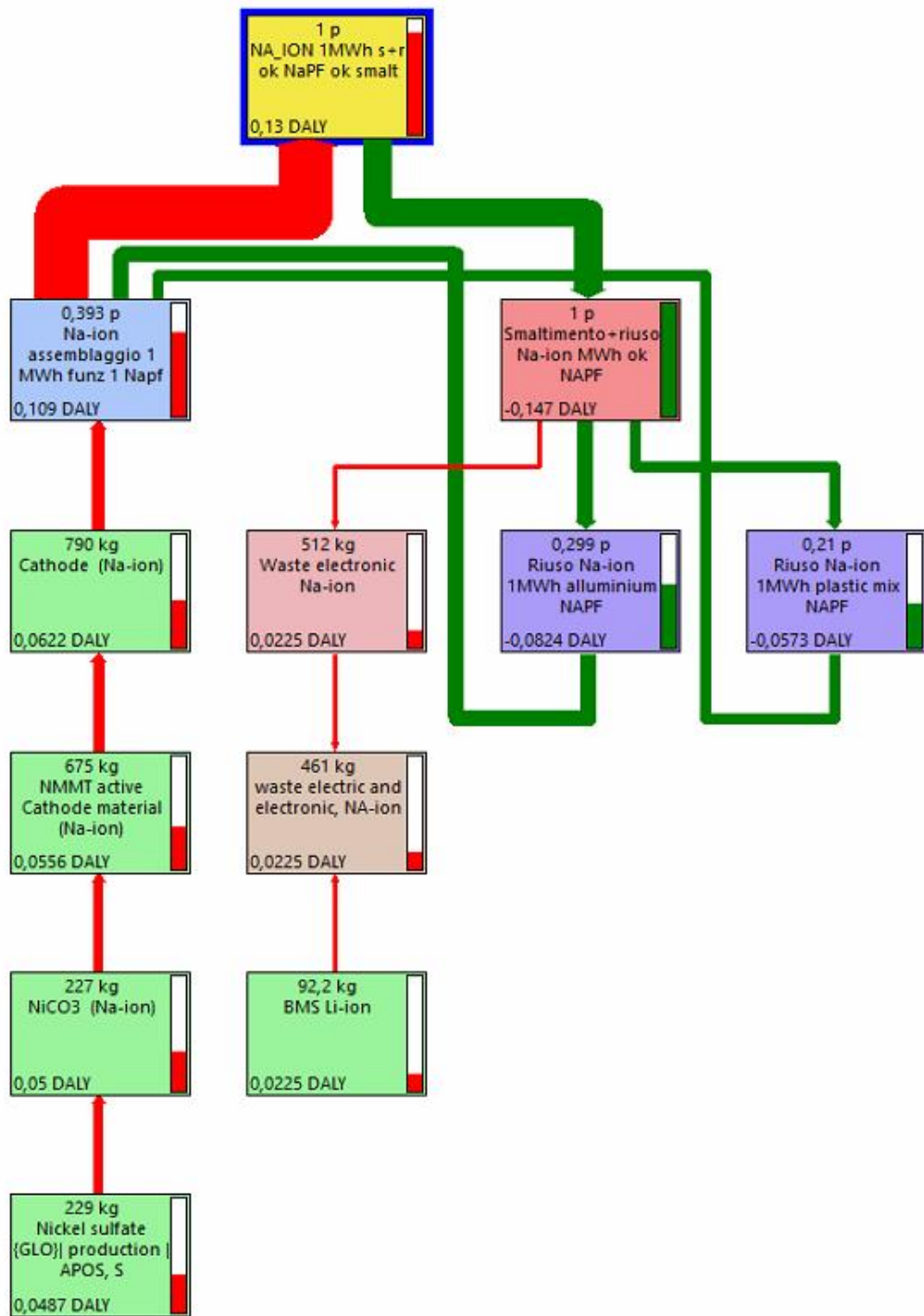
## B. Valutazione dei danni- Na-ion assemblaggio

N.	Processo	Progetto	Unità	Totale	Anode (Na-ion)	Separator (Na-ion)	Cathode (Na-ion)	NaPF Electrolyte (	BMS (Na-ion)	cell container
	Il totale di tutti i processi									
	Processi rimanenti									
1	Aluminium, wrought alloy (GLO) aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,276	0,017	4,04E-5	0,158	0,0116	0,0378	0,0516
2	Aluminium, wrought alloy (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00645	0,00178	4,04E-5	0,00314	0,000597	1,58E-5	0,000879
3	Cable, data cable in infrastructure (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,015	0,015	x	x	x	x	x
4	Cable, three-conductor cable (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00992	x	x	0,00992	x	x	x
5	Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00397	x	x	x	x	0,00397	x
6	Ethylene carbonate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00793	x	x	x	x	0,00793	x
7	Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00147	x	x	x	x	x	0,00147
8	Hydrogen fluoride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,0034	x	x	x	0,0034	x	x
9	Lime, hydrated, packed (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00198	0,000219	x	0,00176	1,7E-6	x	x
10	Manganese dioxide (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00393	x	x	x	0,00393	x	x
11	Nickel sulfate (GLO) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00119	x	x	x	0,00119	x	x
12	Phosphorus pentachloride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00498	x	x	0,00498	x	x	x
13	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,124	x	x	0,124	x	x	x
14	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00246	x	x	x	0,00246	x	x
15	Soda ash, dense (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00769	x	x	x	x	0,00769	x
16	Sodium chloride, brine solution (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,0182	x	x	x	x	0,0182	x
17	Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production, electric, low-alloyed   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00485	x	x	0,00485	x	x	x
18	Tetrafluoroethylene (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,00274	x	x	0,00274	x	x	x
19	Titanium dioxide (RoW) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	DALY	0,0493	x	x	x	x	x	0,0493
			DALY	0,00554	x	x	0,00554	x	x	x
			DALY	0,00132	x	x	0,00132	x	x	x

N.	Processo	Progetto	Unità	Totale	Anode (Na-ion)	Separator (Na-ion)	Cathode (Na-ion)	NaPF Electrolyte (	BMS (Na-ion)	cell container
	Il totale di tutti i processi									
	Processi rimanenti									
1	Aluminium, wrought alloy (GLO) aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	0,000326	2,86E-5	8,02E-8	0,000213	2,18E-5	3,79E-5	2,45E-5
2	Aluminium, wrought alloy (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	5,79E-6	7,68E-7	8,02E-8	4,23E-6	5,85E-7	1,08E-8	1,21E-7
3	Cable, data cable in infrastructure (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	2,4E-5	x	x	x	x	x	x
4	Cable, three-conductor cable (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,59E-5	x	x	1,59E-5	x	x	x
5	Carboxymethyl cellulose, powder (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	4,09E-6	x	x	x	x	4,09E-6	x
6	Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	7,65E-6	x	x	x	x	7,65E-6	x
7	Ethylene carbonate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,27E-6	x	x	x	x	x	x
8	Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	2,65E-6	x	x	x	x	x	2,65E-6
9	Hydrogen fluoride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	7,01E-6	x	x	x	7,01E-6	x	x
10	Lime, hydrated, packed (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	5,36E-6	5,94E-7	x	4,76E-6	4,6E-9	x	x
11	Manganese dioxide (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	6,16E-6	x	x	x	6,16E-6	x	x
12	Metal working factory (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	3,15E-6	x	x	x	3,15E-6	x	x
13	Nickel sulfate (GLO) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,06E-5	x	x	1,06E-5	x	x	x
14	NMMT active Cathode material (Na-ion)	Copia_LCA_Accumulc	species.y	0,000144	1,09E-6	x	x	x	x	8,85E-7
15	Nylon 6-6 (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,7E-6	x	x	1,7E-6	x	x	x
16	Phosphorus pentachloride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,23E-6	x	x	x	x	x	1,23E-6
17	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	4,39E-6	x	x	x	4,39E-6	x	x
18	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	7,77E-6	x	x	x	x	7,77E-6	x
19	Sheet rolling, aluminium (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,83E-5	x	x	x	x	1,83E-5	x
20	Soda ash, dense (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,49E-6	8,98E-7	x	5,92E-7	x	x	x
21	Sodium chloride, brine solution (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	9,33E-6	x	x	9,33E-6	x	x	x
22	Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production, electric, low-alloyed   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	4,09E-6	x	x	4,09E-6	x	x	x
23	Tetrafluoroethylene (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,95E-5	x	x	x	x	x	1,95E-5
24	Titanium dioxide (RoW) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	1,49E-5	x	x	1,49E-5	x	x	x
25	Transport, freight train (Europe without Switzerland) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	species.y	2,47E-6	x	x	2,47E-6	x	x	x
			species.y	1,3E-6	3,56E-8	x	6,83E-7	4,71E-7	2,42E-8	9,05E-8

N.	Processo	Progetto	Unità	Totale	Anode (Na-ion)	Separator (Na-ion)	Cathode (Na-ion)	NaPF Electrolyte (	BMS (Na-ion)	cell container
	Il totale di tutti i processi									
	Processi rimanenti									
1	Aluminium, wrought alloy (GLO) aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	2,56E3	300	2,19	1,21E3	513	322	213
2	Aluminium, wrought alloy (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	104	40,9	2,19	39,6	19,9	0,339	1,27
3	Cable, data cable in infrastructure (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	182	182	x	x	x	x	x
4	Cable, three-conductor cable (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	121	x	x	121	x	x	x
5	Carbon black (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	46	x	x	x	x	46	x
6	Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	61,6	x	x	x	x	61,6	x
7	Ethylene carbonate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	70	41,2	x	28,8	x	x	x
8	Ethylene glycol (RER) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	25,8	x	x	x	x	x	25,8
9	Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	289	x	x	x	289	x	x
10	Hydrogen fluoride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	-51,9	x	x	x	-51,9	x	x
11	Lime, hydrated, packed (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	204	22,6	x	181	0,175	x	x
12	Manganese dioxide (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	117	x	x	x	117	x	x
13	Metal working factory (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	46,5	x	x	x	46,5	x	x
14	Methanol (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	144	x	x	144	x	x	x
15	Nickel sulfate (GLO) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	23,3	12,8	x	x	x	x	10,5
16	Nylon 6-6 (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	37,6	x	x	x	37,6	x	x
17	Phosphorus pentachloride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	377	x	x	377	x	x	x
18	Polyethylene, low density, granulate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	34,8	x	x	x	x	x	34,8
19	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	47,9	x	x	x	47,9	x	x
20	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	23,2	x	x	23,2	x	x	x
21	Soda ash, dense (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	63,7	x	x	x	x	63,7	x
22	Sodium chloride, brine solution (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	150	x	x	x	x	150	x
23	Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production, electric, low-alloyed   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	181	x	x	181	x	x	x
24	Tetrafluoroethylene (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	38,8	x	x	38,8	x	x	x
25	Titanium dioxide (RoW) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	137	x	x	x	x	x	137
26	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUROS (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allcati	USD2013	34,8	x	x	34,8	x	x	x
			USD2013	25,2	x	x	25,2	x	x	x
			USD2013	23,2	0,997	x	10,6	7,11	0,365	4,09

C. Diagramma ad albero – ciclo di vita Na-ion con smaltimento e riutilizzo



## D. Valutazione dei danni - ciclo di vita Na-ion con smaltimento e riutilizzo

N.	Processo /	Progetto	Unità	Totale	Na-ion assemblaggio	Smaltimento- Na-ion MWh
	Il totale di tutti i processi		DALY	0,13	0,276	-0,147
	Processi rimanenti		DALY	0,00288	0,00621	-0,00333
1	Aluminium (waste treatment) (GLO) recycling of aluminium   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	-0,0127	x	-0,0127
2	Aluminium scrap, new (RER) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00149	x	0,00149
3	Aluminium, wrought alloy (GLO) aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,0059	0,015	-0,00912
4	Aluminium, wrought alloy (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,0039	0,00992	-0,00602
5	Cable, data cable in infrastructure (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00156	0,00397	-0,00241
6	Cable, three-conductor cable (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00312	0,00793	-0,00481
7	Copper (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00995	x	0,00995
8	Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,000577	0,00147	-0,000891
9	Electricity, medium voltage (Europe without Switzerland) market group for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,000854	0,000242	0,000612
10	Ethylene carbonate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00134	0,0034	-0,00207
11	Forging, steel (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00701	x	0,00701
12	Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,000778	0,00198	-0,0012
13	Hydrogen fluoride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00155	0,00393	-0,00239
14	Integrated circuit, logic type (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,0112	x	0,0112
15	Lime, hydrated, packed (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,000466	0,00119	-0,000719
16	Manganese dioxide (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00196	0,00498	-0,00302
17	Nickel sulfate (GLO) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,0487	0,124	-0,0753
18	Phosphorus pentachloride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,000968	0,00246	-0,0015
19	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00302	0,00769	-0,00467
20	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,00714	0,0182	-0,011
21	Soda ash, dense (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	DALY	0,0019	0,00485	-0,00294

N.	Processo /	Progetto	Unità	Totale	Na-ion assemblaggio	Smaltimento- Na-ion MWh
	Il totale di tutti i processi		species.yi	0,000149	0,000326	-0,000177
	Processi rimanenti		species.yi	6,26E-6	1,35E-5	-7,28E-6
1	Aluminium (waste treatment) (GLO) recycling of aluminium   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	-1,86E-5	x	-1,86E-5
2	Aluminium scrap, new (RER) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	2,21E-6	x	2,21E-6
3	Aluminium, wrought alloy (GLO) aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	9,43E-6	2,4E-5	-1,46E-5
4	Aluminium, wrought alloy (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	6,24E-6	1,59E-5	-9,63E-6
5	Cable, data cable in infrastructure (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,61E-6	4,09E-6	-2,48E-6
6	Cable, three-conductor cable (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	3,01E-6	7,65E-6	-4,64E-6
7	Copper (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	9,22E-6	x	9,22E-6
8	Deep drawing, steel, 10000 kN press, automode (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,04E-6	2,65E-6	-1,61E-6
9	Electricity, medium voltage (Europe without Switzerland) market group for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,89E-6	5,35E-7	1,36E-6
10	Ethylene carbonate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	2,76E-6	7,01E-6	-4,26E-6
11	Forging, steel (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	9,04E-6	x	9,04E-6
12	Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	2,11E-6	5,36E-6	-3,26E-6
13	Hydrogen fluoride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	6,24E-6	6,16E-6	-3,74E-6
14	Integrated circuit, logic type (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,05E-5	x	1,05E-5
15	Lime, hydrated, packed (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,24E-6	3,15E-6	-1,91E-6
16	Manganese dioxide (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	4,18E-6	1,06E-5	-6,46E-6
17	Nickel sulfate (GLO) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	5,66E-5	0,000144	-8,74E-5
18	Phosphorus pentachloride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,72E-6	4,39E-6	-2,66E-6
19	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	3,05E-6	7,77E-6	-4,72E-6
20	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	7,2E-6	1,83E-5	-1,11E-5
21	Soda ash, dense (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	3,67E-6	9,33E-6	-5,66E-6
22	Sodium chloride, brine solution (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	species.yi	1,61E-6	4,09E-6	-2,49E-6

N.	Processo /	Progetto	Unità	Totale	Na-ion assemblaggio	Smaltimento- Na-ion MWh
	Il totale di tutti i processi		USD2013	1,27E3	2,56E3	-1,29E3
	Processi rimanenti		USD2013	236	488	-253
1	Aluminium (waste treatment) (GLO) recycling of aluminium   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	-132	x	-132
2	Aluminium scrap, new (RER) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	27,5	x	27,5
3	Aluminium, wrought alloy (GLO) aluminium ingot, primary, to market   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	71,4	182	-110
4	Aluminium, wrought alloy (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	47,7	121	-73,7
5	Cable, three-conductor cable (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	24,2	61,6	-37,4
6	Carbon black (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	27,5	70	-42,5
7	Copper (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	44,5	x	44,5
8	Ethylene carbonate (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	114	289	-176
9	Ethylene glycol (RER) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	-20,4	-51,9	31,5
10	Forging, steel (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	179	x	179
11	Heat, central or small-scale, natural gas (Europe without Switzerland) heat production, natural gas	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	80,1	204	-124
12	Hydrogen fluoride (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	46	117	-71
13	Integrated circuit, logic type (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	81,3	x	81,3
14	Manganese dioxide (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	56,6	144	-87,3
15	Nickel sulfate (GLO) production   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	148	377	-229
16	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	25	63,7	-38,6
17	Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	58,8	150	-90,9
18	Soda ash, dense (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	71,2	181	-110
19	Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production, electric, low-alloyed   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	53,8	137	-83,1
20	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (GLO) market for   APOS, S	Ecoinvent 3 - allocati	USD2013	26,6	23,2	3,47

