Università degli Studi
di Modena e Reggio Emilia

Dipartimento di Scienze
e Metodi dell'Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Valutazione ambientale delle strategie di valorizzazione delle batterie a fine vita dei veicoli elettrici in Italia: un'analisi di riciclo e riutilizzo mediante simulazione System Dynamics

Relatore:
Dott.ssa Maria Angela Butturi
Correlatore:
Dott. Alessandro Neri

Laureando:
Matteo Passirani

Anno Accademico 2024/2025

Indice

1 Introduzione **12**

1.1 Sfide ambientali e transizione energetica 12

1.2 Diffusione dei veicoli elettrici 12

1.2.1 End-of-life delle batterie 14

1.3 Ruolo delle fonti rinnovabili per la decarbonizzazione 15

1.3.1 Battery Energy Storage System (BESS) e comunità energetiche 16

1.4 Materiali critici e normative europee 17

1.4.1 Impatti socio-ambientali nella filiera della produzione delle batterie agli ioni di litio 19

1.5 Research Questions alla base della tesi 20

2 Background **22**

2.1 Revisione della letteratura 22

2.2 Motivi e confini dell'analisi 23

2.3 System Dynamics e Anylogic 25

3 Metodologia **26**

3.1 Modello SD End-of-Life 27

3.1.1 First use 30

3.1.2 Assessments 39

3.1.3 Repurposing 44

3.1.4 Recycling 48

3.2 Carbon footprint assessments 55

3.2.1 GHG Protocol e ISO14064 55

3.2.2 Carbon footprint con riutilizzo 57

3.2.3 Carbon footprint con riciclo 64
3.2.4 Calcolo carbon footprint complessiva 68

4 Risultati **70**

4.1 Scenario 1: BAU + one-loop 71
4.2 Scenario 2: BAU + two-loop 75
4.3 Scenario 3: NET ZERO + one-loop 79
4.4 Scenario 4: NET ZERO + two-loop 83
4.5 Scenario 5: ICE Ban + one-loop 88
4.6 Scenario 6: ICE Ban + two-loop 91
4.7 Analisi di sensitività 96
4.7.1 Incidenza dei ritardi logistici e di processo 96
4.7.2 Incidenza della sostituzione di batterie NMC con LFP 98
4.7.3 Incidenza della distribuzione di probabilità dello SoH 100

5 Discussione **105**

5.1 Analisi scenari principali 105
5.2 Analisi di sensitività 108
5.3 Confronti tra scenari principali e valutazione sensitività 109
5.4 Considerazioni finali 115
5.5 Limitazioni del modello e dei risultati 117

6 Conclusioni **120**

A Appendice supplementare **123**

A.1 Funzione Delay 123
A.2 Distribuzione di Weibull 124

Elenco delle figure

1 Modello end-of-life 28

2 Stock della fase "First use" con inflow e outflow 30

3 Stock della fase "Assessments" con inflow e outflow 39

4 Stock della fase "Repurposing" con inflow e outflow 44

5 Stock della fase "Recycling" con inflow e outflow 48

6 Calcolo Carbon Footprint per produzione BESS con o senza il repurposing 57

7 Evoluzione della capacità di BESS in GWh secondo regressione lineare 60

8 Evoluzione della capacità di BESS in GWh secondo regressione logaritmica 61

9 Evoluzione della capacità di BESS in GWh secondo il modello logistico 63

10 Carbon Footprint per l'estrazione di materiali critici senza riciclo . . . 65

11 Carbon footprint per l'estrazione di materiali critici con il riciclo . . . 67

12 Calcolo carbon footprint con e senza riciclo e repurposing 68

13 Calcolo risparmio complessivo carbon footprint 69

14 Scenario 1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 72

15 Scenario 1: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2 72

16 Scenario 1: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 72

17 Scenario 1: Kg di materiali critici 73

18 Scenario 1: Quote di riciclo 73

19 Scenario 1: EVBC in First use 74

20 Scenario 1: EVBC High and Low quality 74

21 Scenario 1: EVBC in Repurposing 74

22 Scenario 1: EVBC in Recycling 74

23 Scenario 2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 75

24 Scenario 2: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2 75

25 Scenario 2: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 76

26 Scenario 2: Kg di materiali critici 77

27 Scenario 2: Quote di riciclo 77

28 Scenario 2: Batterie in uso stazionario annualmente 77

29 Scenario 2: EVBC in First use 78

30 Scenario 2: EVBC High and Low quality 78

31 Scenario 2: EVBC in Repurposing 79

32 Scenario 2: EVBC in Recyclying 79

33 Scenario 3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 80

34 Scenario 3: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2 80

35 Scenario 3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 80

36 Scenario 3: Kg di materiali critici 81

37 Scenario 3: Quote di riciclo 81

38 Scenario 3: EVBC in First use 82

39 Scenario 3: EVBC High and Low quality 82

40 Scenario 3: EVBC in Repurposing 83

41 Scenario 3: EVBC in Recyclying 83

42 Scenario 4: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 84

43 Scenario 4: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2 84

44 Scenario 4: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 84

45 Scenario 4: Kg di materiali critici 85

46 Scenario 4: Quote di riciclo 85

47 Scenario 4: Batterie in uso stazionario annualmente 86

48 Scenario 4: EVBC in First use 87

49 Scenario 4: EVBC High and Low quality 87

50 Scenario 4: EVBC in Repurposing 87

51 Scenario 4: EVBC in Recyclying 87

52 Scenario 5: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 88

53 Scenario 5: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2 88

54 Scenario 5: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 89

55 Scenario 5: Kg di materiali critici 90

56 Scenario 5: Quote di riciclo 90

57 Scenario 5: EVBC in First use 91

58 Scenario 5: EVBC High and Low quality 91

59 Scenario 5: EVBC in Repurposing 91

60 Scenario 5: EVBC in Recyclying 91

61 Scenario 6: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 92

62 Scenario 6: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2 92

63 Scenario 6: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 92

64 Scenario 6: Kg di materiali critici 93

65 Scenario 6: Quote di riciclo 93

66 Scenario 6: Batterie in uso stazionario annualmente 94

67 Scenario 6: EVBC in First use 95

68 Scenario 6: EVBC High and Low quality 95

69 Scenario 6: EVBC in repurposing 95

70 Scenario 6: EVBC in recyclying 95

71 S1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 96

72 S1: Kg di materiali critici 97

73 S1: Quote di riciclo 97

74 S1: EVBC in recycling 98

75 S2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 99

76 S2: Kg di materiali critici 99

77 S2: Quote di riciclo 99

78 S2: EVBC in Recycling 100

79 S3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2 101

80 S3: Carbon footprint W/ repurposing, W/o repurposing, risparmio di CO2 101

81 S3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2 101

82 S3: Kg di materiali critici 102

83 S3: Quote di riciclo 102

84 S3: Batterie in uso stazionario annualmente 103

85 Carbon footprint evitata nel one-loop 111

86 Carbon footprint generata a confronto (ICE Ban e Net Zero) 111

87 Carbon footprint evitata nel two-loop 113

88 Contributo di riutilizzo e riciclo nel risparmio di carbon footprint . . 113

89 Confronti riduzione carbon footprint nell'analisi di sensitività 115

90 Average lifespan nel periodo di simulazione 127

Elenco delle tabelle

1 Auto vendute annualmente in Italia 32

2 Quota di veicoli elettrici nei diversi scenari 33

3 Efficienza di recupero dei materiali nelle diverse finestre temporali . . 52

4 Dati storici e previsioni disponibili della capacità energetica di BESS 58

5 Valore parametri MaterialCarbonFootprintImpact 66

6 Scenario 1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 72

7 Scenario 1: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 73

8 Scenario 1: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 73

9 Scenario 1: Kg di materiali critici, ogni 5 anni 73

10 Scenario 1: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni 74

11 Scenario 2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 76

12 Scenario 2: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 76

13 Scenario 2: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 76

14 Scenario 2: Kg di materiali critici, ogni 5 anni 77

15 Scenario 2: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni 78

16 Scenario 2: Numero di EV batteries convertite in applicazioni stazionarie annualmente, ogni 5 anni 78

17 Scenario 3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, saving di CO2, ogni 5 anni 80

18 Scenario 3: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 81

19 Scenario 3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 81

20 Scenario 3: Kg di materiali critici, ogni 5 anni 81

21 Scenario 3: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni 82

22 Scenario 4: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 84

23 Scenario 4: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 85

24 Scenario 4: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 85

25 Scenario 4: Kg di materiali critici, ogni 5 anni 86

26 Scenario 4: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni 86

27 Scenario 4: Numero di EV batteries convertite in applicazioni stazionarie annualmente, ogni 5 anni 87

28 Scenario 5: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 89

29 Scenario 5: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 89

30 Scenario 5: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 89

31 Scenario 5: Kg di materiali critici, ogni 5 anni 90

32 Scenario 5: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni 90

33 Scenario 6: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, saving di CO2, ogni 5 anni 93

34 Scenario 6: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 93

35 Scenario 6: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 93

36 Scenario 6: Kg di materiali critici, ogni 5 anni 94

37 Scenario 6: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni 94

38 Scenario 6: Numero di batterie destinate al repurposing ogni 5 anni . 95

39 S1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 97

40 S1: Kg di materiali critici ogni 5 anni 97

41 S1: Quota di riciclo ogni 5 anni 98

42 S2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 99

43 S2: Kg di materiali critici ogni 5 anni 100

44 S2: Quote di riciclo ogni 5 anni 100

45 S3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni 101

46 S3: Carbon footprint W/ repurposing, W/o repurposing, risparmio di CO2 ogni 5 anni 102

47 S3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni 102

48 S3: Kg di materiali critici ogni 5 anni 103

49 S3: Quote di riciclo ogni 5 anni 103

50 S3: Quantità annuale di batterie destinate al repurposing ogni 5 anni 104

51 Quote obbligatorie di riciclo per litio, cobalto e nickel secondo la Battery Regulation 1542/2023 105

52 Parametri aggregati della distribuzione di Weibull per periodi di 5 anni126

Abstract

Questa tesi analizza le strategie di gestione del fine vita delle batterie per veicoli elettrici, confrontando il riciclo immediato dei materiali (one-loop) con il riutilizzo in applicazioni stazionarie prima del riciclo finale (two-loop). Lo studio si basa su un modello di System Dynamics, sviluppato con il software AnyLogic, che simula la domanda di batterie per veicoli elettrici (incluso il tasso di dismissione) e i principali ritardi logistici e di processo, restituendo infine, a seconda delle diverse strategie di end-of-life, la disponibilità effettiva di materiali critici e l'impronta di carbonio legata sia all'estrazione delle materie prime sia al mercato delle BESS. In tale contesto, l'Unione Europea ha introdotto quote minime obbligatorie di riciclo per litio, nickel e cobalto, nella prospettiva di ridurre la dipendenza dalla fornitura di materie prime vergini da paesi Esteri con situazioni geopolitiche instabili. I risultati mostrano che, per soddisfare più rapidamente tali requisiti, la filiera delle batterie potrebbe privilegiare il riciclo diretto, rinunciando però al beneficio ambientale offerto dal prolungamento della vita utile delle batterie. In questo scenario, il recupero tempestivo dei materiali critici tende ad entrare in competizione con la potenziale riduzione delle emissioni di CO_2eq offerta dalla second-life delle batterie dei veicoli elettrici a fine vita, rivelando un importante trade-off tra l'urgenza di rispettare gli obblighi di riciclo e l'opportunità di valorizzare il potenziale circolare delle batterie. L'analisi evidenzia la necessità di politiche ibride e integrate, insieme ad una supply chain coordinata ed efficiente in grado di bilanciare gli obiettivi ambientali con la gestione tempestiva delle risorse, così da sostenere una transizione energetica solida e coerente con gli obiettivi di decarbonizzazione dell'Unione Europea.

1 Introduzione

1.1 Sfide ambientali e transizione energetica

La comunità internazionale si trova attualmente ad affrontare la complessa questione del riscaldamento globale e della crisi climatica. La crescente consapevolezza scientifica maturata negli ultimi decenni ha spinto i governi ad adottare decisioni strategiche volte ad una drastica riduzione delle emissioni di gas serra. Tra gli accordi internazionali più importanti figura l'Accordo di Parigi, siglato nel dicembre 2015 durante la 21ª Conferenza delle Parti (COP21) nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC). Tale accordo stabilisce l'obiettivo di contenere l'aumento della temperatura globale al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, con un target ideale a 1,5 °C.

Più recentemente, nel corso della COP26 tenutasi a Glasgow, la comunità internazionale ha esaminato i progressi compiuti rispetto agli impegni assunti con l'Accordo di Parigi, ribadendo l'urgenza di raggiungere tali obiettivi e sollecitando i Paesi a presentare piani dettagliati per la riduzione delle emissioni. In questo contesto l'Unione Europea si configura come un pionere nella transizione ecologica, promuovendo il Green Deal europeo, un'iniziativa volta a rendere l'Europa il primo continente a impatto climatico zero entro il 2050.

In questo scenario di transizione energetica il settore dei trasporti riveste un ruolo cruciale, essendo responsabile di circa un quarto delle emissioni globali di CO_2 secondo le stime di Creutzig et al. (2015), quota destinata ad aumentare in assenza di misure efficaci di mitigazione. In particolare, il trasporto stradale ha un impatto negativo sia per le emissioni climalteranti sia per la diffusione di inquinanti atmosferici locali, con impatti diretti sulla salute umana. Per risolvere questo tema, una delle soluzioni più promettenti nel breve periodo è sicuramente la transizione verso una mobilità elettrica. I veicoli elettrici (EV, electric vehicles) potendo essere alimentati direttamente da energia prodotta da fonti rinnovabili, possono essere un elemento chiave per ridurre drasticamente le emissioni di gas serra e di inquinamento locale. Se da un lato, gli EV sono un'opportunità per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, dall'altro giungono delle complesse sfide relative alla produzione e alla gestione sostenibile delle batterie che alimentano tali veicoli.

1.2 Diffusione dei veicoli elettrici

Negli ultimi anni il mercato dei veicoli elettrici ha registrato una crescita significativa, trainata principalmente dalle politiche di decarbonizzazione promosse dall'Unione Europea. Secondo i dati riportati da European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) (2024), la quota di mercato media dei paesi europei per gli EV ha raggiunto il 14,6%, evidenziando un incremento di penetrazione di questa

tecnologia. L'Italia risulta in ritardo rispetto alla media europea, con un market share di circa il 5,0% come si osserva dai dati riportati in European Alternative Fuels Observatory (EAFO) (2025), però la quota di mercato di EV in Italia è stata in costante aumento nel periodo tra il 2020 e il 2023, evidenziando un trend positivo.

L'espansione del mercato degli EV è influenzata da una serie di fattori economici, tecnologici e infrastrutturali.

Dal punto di vista economico, diversi governi europei incentivano l'acquisto di veicoli elettrici attraverso sussidi diretti ed esenzioni fiscali, sebbene le politiche di incentivazione varino significativamente tra i diversi Stati membri. In Italia, secondo Powy Energy (2024), gli incentivi diretti per l'acquisto di EV cesseranno entro il 2025 per ragioni economiche e strategiche. La decisione è legata alla volontà di evitare che fondi pubblici italiani vengano impiegati per l'acquisto di veicoli prodotti all'estero, in particolare in Cina. Il governo italiano preferisce sostenere economicamente le industrie nazionali per incentivare una transizione industriale volta alla produzione di EV all'interno dei confini italiani.

Dal punto di vista tecnologico, il costo delle batterie, che rappresenta una componente significativa del prezzo complessivo di un EV, è in costante diminuzione. Dai dati forniti da Sustainable Ships (2021), il prezzo della batteria agli ioni di litio è passato da circa 1100 $/kWh nel 2010 a circa 130 $/kWh negli ultimi anni, andando così a contribuire alla crescente competitività economica dei veicoli elettrici rispetto alla tecnologia più diffusa dei motori a combustione interna (MCI). Le infrastrutture di ricarica rappresentano un elemento determinante per la diffusione su larga scala degli EV. In Italia, dai dati forniti da European Alternative Fuels Observatory (EAFO) (2024), sono installate circa 60,000 colonnine di ricarica, un numero decisamente inferiore rispetto alle 160,000 unità presenti in Francia e Germania. Questa differenza evidenzia la necessità di ulteriori investimenti per favorire un'adozione più ampia della mobilità elettrica nel panorama italiano.

Per analizzare le prospettive future del mercato dei veicoli elettrici, è utile considerare tre diversi scenari di sviluppo, come delineato da Seika, Kubli (2024).

- Business as Usual (BAU): in questo scenario, la crescita del mercato degli EV avviene in modo graduale, senza l'introduzione di normative specifiche. L'adozione dei veicoli elettrici è determinata principalmente dalla domanda di mercato, influenzata dai progressi tecnologici e dalla riduzione dei costi, ma senza un'accelerazione imposta da politiche pubbliche.
- Net Zero: questo scenario prevede un'accelerazione delle politiche di decarbonizzazione con l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. L'adozione degli EV è incentivata attraverso normative più stringenti, investimenti infrastrutturali e sussidi economici volti a favorire la transizione verso la mobilità elettrica.
- ICE Ban: questo scenario riflette le decisioni politiche adottate dall'Unione Europea, che ha stabilito il divieto di vendita di nuovi veicoli con motore a

combustione interna a partire dal 2035. In tale contesto, la transizione verso gli EV diventa obbligatoria, determinando un'accelerazione esponenziale nella loro diffusione.

Un'analisi più approfondita dell'ICE Ban evidenzia come questa strategia rappresenti una delle misure più estreme per la decarbonizzazione del settore dei trasporti, con impatti rilevanti su diversi ambiti economici e industriali. La regolamentazione approvata dal Parlamento Europeo stabilisce che, a partire dal 1° gennaio 2035, non sarà più possibile immatricolare nuovi veicoli con motore a combustione interna. Tale misura si inserisce nel quadro normativo del pacchetto Fit for 55, che si propone di ridurre le emissioni di CO_2eq del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990.

L'eliminazione progressiva dei veicoli a combustione interna comporterà una significativa riduzione delle emissioni di gas serra nel settore dei trasporti. Tuttavia, questa transizione implicherà una trasformazione profonda nell'industria automobilistica, che dovrà riconvertire le proprie linee produttive, con potenziali ripercussioni sull'occupazione e sul know-how richiesto nel settore. La necessità di adattarsi ad un nuovo paradigma produttivo sta accelerando l'innovazione tecnologica, favorendo lo sviluppo di soluzioni avanzate, come le batterie allo stato solido, caratterizzate da maggiore densità energetica e tempi di ricarica ridotti.

Secondo le stime dell'International Energy Agency (IEA) (2023b), l'implementazione dell'ICE Ban porterà ad un aumento significativo del numero di veicoli elettrici in circolazione in Europa, superando i 75 milioni entro il 2040, rispetto ai circa 15 milioni in circolazione registrati nel 2023. Questo scenario avrà un impatto diretto sulla domanda di batterie, con conseguenze rilevanti per le filiere industriali del riciclo e del riutilizzo delle batterie a fine vita, rendendo cruciale lo sviluppo di strategie sostenibili.

1.2.1 End-of-life delle batterie

Le batterie agli ioni di litio sono la tecnologia principalmente utilizzata nei EV, grazie alla loro elevata densità energetica e alla lunga durata di utilizzo. Secondo Seika, Kubli (2024), le chimiche più impiegate per le batterie sono:

- NMC (Nickel Manganese Cobalto), una tecnologia che combina ossidi di nickel, manganese e cobalto nel catodo, offrendo un ottimo equilibrio tra capacità, durata e sicurezza. Hanno un elevata densità energetica e sono le più utilizzate attualmente.

- LFP (Litio Ferro Fosfato), una tecnologia che utilizza fosfato di ferro come materiale catodico, garantendo stabilità termica ma con una densità energetica inferiore rispetto alle NMC. Esse hanno una durata e una resistenza ai cicli carica-scarica condiderevole.

Il degrado delle batterie agli ioni di litio è influenzato da fattori diversi. Un ciclo completo di carica/scarica contribuisce all'usura della batteria, riducendone la capacità complessiva nel tempo. Delle scariche profonde frequenti possono accelerare il degrado rispetto a scariche parziali. Le temperature elevate accelerano sicuramente le reazioni chimiche indesiderate nella batteria, mentre temperature troppo basse possono ridurre la capacità a disposizione temporaneamente (Lohum (2024).

Il parametro dello stato di salute (State of Health, SoH) è una misura che indica la condizione corrente della batteria rispetto alle sue specifiche originali. Viene espresso generalmente come una percentuale valutando le caratteristiche della capacità residua e la capacità di erogare potenza.

Con l'aumento della domanda di veicoli elettrici si prevede un incremento significativo del numero di batterie che raggiungeranno la fine del loro primo ciclo vita (first end-of-life, EOL). Molte di queste batterie, anche se non più idonee per un uso automobilistico a causa di una capacità ridotta, possiedono ancora una capacità residua significativa rendendole una potenziale opportunità per altre applicazioni. La gestione efficiente delle batterie a fine vita è cruciale per evitare l'accumulo di rifiuti e sfruttare al massimo le risorse in un'ottica di economia circolare. Infatti, il rilascio di metalli pesanti e sostanze chimiche nell'ambiente può contaminare il suolo e le risorse idriche, con effetti negativi su più matrici ambientali. Anticipando il capitolo 1.4, le batterie contengono materiali rari e critici, come litio, cobalto e nickel. Poter recuperare questi materiali per averli a disposizione nella fase di produzione è fondamentale. (Seika, Kubli (2024))

Anticipando brevemente ciò che verrà trattato nei capitoli successivi, è essenziale implementare pratiche sostenibili per la gestione delle batterie in first EOL, al fine di mitigare questi impatti negativi. Le batterie a fine vita possono offrire diverse opportunità, tra cui:

- Riciclo: è possibile con questo processo recuperare materiali critici dalle batterie dismesse, riducendo la necessità di estrarre nuove materie prime;
- Riutilizzo: le batterie con una buona capacità residua possono essere riutilizzate in applicazioni meno esigenti, meno dinamiche. Un esempio sono i sistemi di accumulo stazionario, come i Battery Energy Storage System (BESS).

1.3 Ruolo delle fonti rinnovabili per la decarbonizzazione

Come già discusso nel capitolo 1.1, L'Unione Europea con il Green Deal si è posta l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, riducendo le emissioni nette di gas serra a zero. Secondo le previsioni dell'International Energy Agency, la domanda globale di elettricità è destinata a raddoppiare entro il 2050. Per soddisfare questa crescente domanda e raggiungere gli obiettivi climatici, è necessaria

un'espansione rapida delle energie rinnovabili, come fotovoltaico ed eolico. Per raggiungere tali obiettivi, è incisiva una crescita notevole della capacità fotovoltaica installata. Secondo il rapporto di European Commission (2024), l'obiettivo dell'Unione Europea è di arrivare al 2030 ad una capacità installata di fotovoltaico di 600 GW (nel 2023 è stata di 260 GW).

La rapida espansione di queste tecnologie rinnovabili offre sfide e opportunità molto importanti. Tra le sfide vi è la necessità di ampliare le reti elettriche per gestire l'intermittenza delle fonti rinnovabili e garantire la stabilità del sistema. Questa transizione, offre opportunità significative per creare posti di lavoro, sviluppo tecnologico e miglioramento della resilienza energetica.

L'energia solare è caratterizzata da un concetto di variabilità intrinseca dovuta a fattori meteorologici e stagionali. Non sono fonti programmabili, come possono essere le biomasse ligno-cellulosiche con cui si può programmare il raccolto da poter utilizzare in un determinato periodo di tempo. Questa intermittenza è un problema per l'affidabilità dell'utilizzatore e del sistema elettrico, richiedendo delle soluzioni per bilanciare domanda ed offerta. L'accumulo energetico attraverso batterie diventa cruciale per garantire flessibilità e stabilità del sistema, andando ad immagazzinare l'energia prodotta in eccesso durante periodi con poca domanda e alti ritmi di produzione, rilasciandola durante i picchi di domanda in momenti con bassi ritmi di produzione.

1.3.1 Battery Energy Storage System (BESS) e comunità energetiche

La transizione verso una produzione sostenibile di energia richiede non solamente l'adozione di tecnologie a fonti rinnovabili, ma anche l'implementazione di soluzioni efficienti per l'accumulo dell'energia prodotta. I Battery Energy Storage System (BESS) consentono di immagazzinare l'energia elettrica generata da fonti intermittenti, come l'energia solare, rendendola disponibile quando serve, andando a garantire stabilità per l'utilizzatore e la rete elettrica. Dimensionare correttamente un BESS è fondamentale per bilanciare correttamente domanda e offerta dell'energia e per bilanciare la frequenza e la gestione dei carichi elettrici del sistema elettrico. Per la tesi saranno fondamentali i sistemi di accumulo stazionari elettrochimici (ovvero i BESS), che sfruttano reazioni chimiche reversibili per immagazzinare e rilasciare energia elettrica. E' importante sapere che esistono altre tecnologie per accumulare energia, come gli accumuli elettrostatici o elettromagnetici (International Energy Agency (IEA) (2023a)).

Come mostra Europe (2024) negli ultimi anni l'adozione di BESS ha registrato una crescita significativa sia in Italia che in Europa. Un trend positivo che è favorito da incentivi governativi, come sussidi per l'installazione di BESS, e dalla riduzione di costi tecnologici grazie ai progressi nella tecnologia delle batterie agli ioni di litio. Inoltre, lo sviluppo delle energie rinnovabili ha incrementato la necessità di soluzioni di accumulo, poiché l'aumento della capacità installata del fotovoltaico richiede strumenti per gestire l'intermittenza della produzione.

Le comunità energetiche rinnovabili (CER), secondo lo studio condotto da ENEA (2023), rappresentano un modello innovativo di gestione dell'energia in cui gruppi di cittadini, imprese e istituzioni si uniscono per produrre, consumare e condividere energia da fonti rinnovabili a livello locale. Le comunità hanno un ruolo fondamentale per ridurre la dipendenza dalle reti centralizzate, aumentando la resilienza energetica delle piccole comunità. In questo modo, i profitti che potrebbero derivare dalla vendita dell'energia prodotta localmente rimarrebbero all'interno della comunità, andando a stimolare l'economia della zona.

In Europa le comunità energetiche hanno guadagnato una crescente attenzione come strumenti efficaci per il raggiungimento degli obiettivi climatici, cercando di coinvolgere attivamente i cittadini nella transizione energetica. Anche in Italia, l'interesse per le CER è in aumento, ad esempio il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) del 2020 le mette in rilievo come strumenti utili da mettere in campo per portare avanti la decarbonizzazione e la decentralizzazione del sistema energetico.

Per massimizzare l'efficacia delle comunità energetiche, è fondamentale integrare dei BESS nelle infrastrutture per gestire l'intermittenza delle fonti rinnovabili, per ottimizzare l'autoconsumo (riducendo perdite energetiche per la distribuzione e la trasmissione) e per fornire servizi ancillari alla rete elettrica.

Quindi, l'integrazione dei BESS nelle comunità energetiche è una componente fondamentale per garantire una transizione energetica sostenibile e resiliente, in linea con gli obiettivi dati dall'UE.

1.4 Materiali critici e normative europee

Le batterie agli ioni di litio sono un elemento fondamentale per la transizione energetica e sono essenziali per la mobilità elettrica e per l'accumulo stazionario di energia prodotta da fonti rinnovabili.

Purtroppo la produzione di queste batterie dipende da materiali rari e critici, il cui approvvigionamento rappresenta una sfida strategica e geopolitica fondamentale. Dall'analisi condotta da StartupItalia (2024) emerge come il mercato delle materie prime critiche sia altamente concentrato in pochi Paesi che controllano la maggior parte delle riserve e della produzione.

Nelle batterie agli ioni di litio, gli elementi più critici sono:

- Litio (Li), utilizzato come componente principale dell'elettrolita e degli anodi delle batterie. E' l'elemento essenziale che garantisce delle elevate densità energetiche. Le riserve principali si trovano in Australia e nel cosiddetto "Triangolo del Litio" in Sud America (Cile, Argentina e Bolivia) e la Cina controlla circa il 60% della capacità globale di raffinazione;

- Nickel (Ni), garantisce maggiore autonomia ai veicoli elettrici ed è presente nelle batterie NMC. I principali fornitori sono Indonesia, Russia e Canada;

- Cobalto (Co), utilizzato per aumentare la stabilità chimica delle batterie. Esso è uno dei più problematici in termini di approvvigionamento, circa il 70% dell'estrazione globale proviene dalla Repubblica Democratica del Congo, dove vengono registrati problemi di sfruttamento del lavoro e impatti ambientali importanti, con un'enorme influenza delle compagnie cinesi nella lavorazione;

- Manganese (Mn), utilizzato per migliorare la stabilità delle batterie, viene estratto principalmente in SudAfrica, Cina e Australia.

L'UE dipende in modo cruciale dalle importazioni di queste materie prima da paesi esteri. Le tensioni commerciali tra Cina, Stati Uniti ed Europa hanno reso il mercato delle batterie vulnerabile a restrizioni su esportazioni di materiali critici. Qualsiasi cambiamento nelle politiche di approvvigionamento dei governi può influenzare drasticamente la disponibilità di questi materiali (e il costo).

Per affrontare le criticità legate all'approvvigionamento di materie prime critiche, l'Unione Europea ha stilato diverse normative con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dalle importazioni, garantire una maggiore sostenibilità nella filiera delle batterie e rafforzare la sicurezza delle forniture. Tra le maggiori troviamo:

- Critical Raw Materials Act (CRMA) (EU2 (2024)), introdotto nel 2023, rappresenta uno dei principali strumenti normativi in quest'ambito. Esso mira a diversificare le fonti di approvvigionamento, promuovendo nuove attività di estrazione e raffinazione all'interno dell'UE e incentivando l'aumento della capacità di riciclo. Il CRMA si pone obiettivi ambiziosi per il 2030, tra cui il raggiungimento di almeno il 10% dell'estrazione di materie prime critiche direttamente in Europa, il 40% della lavorazione industriale all'interno del territorio comunitario e il 15% del fabbisogno soddisfatto attraverso materiali riciclati. Questo regolamento è nato dalla consapevolezza che la dipendenza da pochi paesi produttori, in particolare Cina e Repubblica Democratica del Congo, rappresenta un rischio significativo per la stabilità economica e industriale dell'Europa.

- Regulation Battery UE 1542/2023 (EU2 (2023)) ha introdotto una serie di vincoli per garantire la sostenibilità della produzione e della gestione delle batterie a fine vita. A partire dal 2031, una quota minima di litio, nickel e cobalto utilizzati nelle batterie dovrà provenire dal riciclo, riducendo così la dipendenza da materie prime vergini e incentivando la creazione di un'economia circolare nel settore. Un altro elemento chiave introdotto è il passaporto digitale delle batterie, che permetterà di tracciare la composizione chimica, l'origine dei materiali e il rispetto degli standard di sostenibilità lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. Questo strumento sarà necessario per garantire maggiore trasparenza nella filiera industriale.

L'incremento della capacità di estrazione e lavorazione interna, unito a una maggiore efficienza nei processi di riciclo, consentirà di ridurre le vulnerabilità della filiera delle batterie e di sviluppare un'industria più sostenibile e competitiva a livello globale.

1.4.1 Impatti socio-ambientali nella filiera della produzione delle batterie agli ioni di litio

La produzione e lo smaltimento delle batterie presentano un impatto ambientale significativo lungo l'intero ciclo di vita, dalla fase di estrazione delle materie prime fino alla gestione delle batterie a fine vita.

La produzione delle batterie porta ad un elevato consumo di risorse naturali ed energetiche, con emissioni inquinanti a seconda della localizzazione e dell'efficienza del processo industriale. Secondo l'analisi condotta da ENEA (2020), la filiera produttiva si può suddividere in tre fasi principali:

1. estrazione e lavorazione materie prime
2. produzione industriale delle celle
3. assemblaggio delle batterie

Partendo dall'estrazione delle materie prime, si osserva un impatto significativo in questo processo per il cobalto, litio, nickel e manganese. Per esempio, il litio viene estratto o dalle miniere di roccia dura o con le salamoie dei laghi salati. Il pompaggio delle salamoie comporta un elevato consumo idrico che possono influenzare negativamente le comunità locali per quanto riguarda le riserve idriche e la biodiversità. Il cobalto, estratto nella Repubblica Democratica del Congo, porta a contaminazione del suolo e delle falde acquifere da metalli pesanti, sfruttamento di lavoro (anche minorile) con violazione dei diritti umani. Anche l'estrazione del Nickel porta a problemi ambientali e sociali, come la deforestazione e inquinamento dei corsi d'acqua. Come vedremo più avanti, anche la fase di estrazione delle materie prime è colpevole di una grande fetta di emissioni climalteranti.

La produzione industriale delle celle avviene in Asia per la maggior parte, in particolare in Cina e Corea del Sud. Sono processi fortemente energivori, i quali comportano un impatto ambientale fortemente negativo se questa energia proviene da fonti fossili.

L'assemblaggio delle batterie comporta consumi energetici e generazione di scarti industriali, come prodotti chimici e solventi usati per rivestire gli elettrodi.

Con la crescita esponenziale del mercato dei veicoli elettrici, trainato dall'ICE ban, si prevede un incremento significativo delle batterie a fine vita nei prossimi decenni. Le batterie esauste contengono materiali potenzialmente pericolosi, elettroliti infiammabili e metalli pesanti che possono contaminare il suolo o le acque, se non gestiti

correttamente. Si osserva come il riciclo delle batterie agli ioni di litio sia un elemento cardine per ridurre l'impatto ambientale del settore e diminuire la dipendenza della filiera dell'estrazione delle materie prime.

Le tecnologie di riciclo si dividono principalmente in processi pirometallurgici, che prevedono l'uso di alte temperature per il recupero dei metalli, e processo idrometallurgici che utilizzano sostanze chimiche per dissolvere e separare i metalli. La prima porta a elevate emissioni di CO_2 e perdite nel recupero del litio, la seconda è più efficiente per il recupero del litio ma è necessaria una gestione corretta degli scarti chimici (Re-Bat (2024)).

Un'altra strategia per gestire il fine vita delle batterie agli ioni di litio è il riutilizzo (repurposing), il quale consente di estendere il ciclo di vita delle batterie riducendo la necessità di costruire ex novo una BESS. Le batterie dei veicoli elettrici quando raggiungono circa l'80% della loro capacità iniziale, non sono più adatte per un uso automobilistico ma sono ancora perfettamente riutilizzabili in applicazioni stazionarie. Diverse aziende hanno implementato soluzioni per realizzare il second-life delle batterie, con impianti che convertono i pacchi batteria dei veicoli elettrici in BESS (Seika, Kubli (2024)).

Si osserva come l'impatto socio-ambientale della filiera produttiva delle batterie agli ioni di litio e relativo smaltimento sia un tema di grande rilevanza, che richiede un integrazione tra regolamentazione, innovazione tecnologica e strategie di economia circolare.

1.5 Research Questions alla base della tesi

La mobilità elettrica è una delle maggiori sfide nell'attuale transizione energetica. In pochi anni, dalle prime sperimentazioni sulle auto elettriche si è passati a un'espansione di massa su scala globale, trainata da normative stringenti relative alle emissioni di gas serra. Dietro questa crescita si cela un aspetto meno appariscente ma fondamentale per rendere vincente la transizione alla mobilità elettrica, ovvero il destino delle batterie elettriche a fine vita.

Come già discusso in precedenza, i materiali necessari per la produzione delle batterie sono litio, nickel, cobalto e manganese, ma la loro estrazione comporta impatti socio-ambientali significativamente negativi, con anche una forte dipendenza da fornitori esteri con situazioni geopolitiche instabili.

Questa ricerca si concentra sulla situazione in Italia, un Paese che sta vivendo una transizione accelerata nel settore automotive e nel panorama energetico delle rinnovabili. Il mercato dei veicoli elettrici è in crescita, trainato da normative europee sempre più stringenti. Il settore delle energie rinnovabili sta assumendo un ruolo centrale nel mix energetico nazionale.

Affrontare questa sfida richiede strumenti che siano in grado di rappresentare sce-

nari complessi e dinamici, in cui sia possibile integrare elementi eterogenei in una visione astratta e sistemica, in cui le variabili in gioco possano interagire su diverse scale temporali. Questa ricerca utilizza la modellazione System Dynamics, implementata con il software Anylogic, attraverso un approccio che permette di simulare l'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici e delle batterie a fine vita, considerando diverse strategie di gestione dell'EOL.

La tesi è incentrata su due domande di ricerca fondamentali:

- RQ1: Come evolverà il flusso delle batterie a fine vita nei prossimi decenni? Che volume di materiali critici potranno essere effettivamente riciclati? Il recupero di tali materiali sarà sufficiente a garantire il rispetto delle normative europee?
- RQ2: Il riciclo dei materiali critici nei prossimi anni contribuirà a ridurre la carbon footprint associata all'estrazione di nuove risorse? Il crescente mercato degli accumuli stazionari in Italia potrebbe influenzare le strategie di end-of-life delle batterie del settore automotive?

L'elettrificazione dei trasporti deve creare un modello circolare efficiente, in cui si cerchi di minimizzare gli sprechi e ridurre gli impatti ambientali. Con questa ricerca, si vuole contribuire ad una maggiore comprensione delle dinamiche che influenzano la gestione delle batterie a fine vita, con lo scopo di comprendere quali possano essere le mosse migliori da effettuare in questi anni. Il futuro della mobilità elettrica non dipende solamente da innovazioni tecnologiche, ma soprattutto da capacità organizzative che consentono una gestione ottimale delle batterie. Solo con un approccio sistemico e scientifico è possibile trasformare un insieme di elementi critici in un'opportunità strategica per l'ambiente e la popolazione.

2 Background

2.1 Revisione della letteratura

La gestione delle batterie agli ioni di litio a fine vita sta emergendo come una delle sfide più rilevanti per la transizione energetica e per lo sviluppo della mobilità elettrica. La letteratura scientifica ha esplorato diverse metodologie per affrontare questa problematica, tra cui l'analisi dei flussi di materiali, la valutazione degli impatti ambientali con Life Cycle Assesment e lo sviluppo di modelli di gestione del riciclo e della logistica inversa.

Uno degli approcci più utilizzati per studiare la gestione delle batterie EOL è il Material Flow Analysis (MFA), che consente di tracciare il flusso dei materiali lungo l'intero ciclo di vita delle batterie. Il MFA è stato impiegato per stimare il volume di batterie a fine vita a disposizione nei prossimi anni e per analizzare il potenziale di recupero delle materie prime critiche. Diversi studi hanno adottato l'MFA per valutare scenari futuri e stimare la quantità di materiali riciclabili presenti nelle batterie esauste, come lo studio di Bruno, Fiore (2023).

L'approccio Life Cycle Assesment (LCA) è stato utilizzato per valutare l'impatto ambientale associato al riciclo delle batterie agli ioni di litio. Questo metodo consente di confrontare diverse tecnologie di trattamento delle stesse, considerando fattori come il consumo di energia, le emissioni di gas serra e l'uso di risorse naturali. Gli studi basati sul LCA mirano a identificare le strategie di gestione più sostenibili e a supportare lo sviluppo di politiche ambientali efficaci, come evidenziato nell'analisi di Rosenberg et al. (2023b).

Un ulteriore oggetto di studio riguarda la filiera del riciclo delle batterie, che deve affrontare sfide logistiche e tecnologiche. La letteratura ha analizzato diverse tecniche di riciclo, tra cui la pirometallurgia, l'idrometallurgia e il riciclo diretto. Queste tecnologie si differenziano per l'efficienza di recupero dei materiali, i costi operativi e l'impatto ambientale. Alcuni studi, come Gonzales-Calienes et al. (2023), si sono concentrati sulla valutazione economica del riciclo delle batterie, analizzando la fattibilità economica e i potenziali benefici derivanti dal recupero di materiali critici come litio, nickel e cobalto.

E' stata analizzata la logistica inversa delle batterie in stato di first EOL, la quale comprende le operazioni di raccolta, trasporto e smistamento. La gestione efficace della logistica inversa è fondamentale per garantire un sistema di riciclo efficiente e ridurre i costi associati al trattamento delle batterie. Studi recenti, a partire da Joachimsthaler, Jarmer (2024), hanno esaminato le sfide e le opportunità legate alla reverse logistics, evidenziando la necessità di sviluppare modelli operativi più strutturati

Le politiche e le normative stanno svolgendo un ruolo sempre più centrale nella gestione delle batterie a fine vita. In Europa, sono stati introdotti regolamenti per

incentivare il recupero dei materiali e ridurre l'impatto ambientale delle batterie. In altre regioni, come gli Stati Uniti, la regolamentazione è ancora in fase di sviluppo, con un crescente interesse verso l'adozione di standard minimi di contenuto riciclato nelle nuove batterie. La mancanza di una regolamentazione uniforme a livello globale rappresenta una delle principali sfide per il settore del riciclo delle batterie. Gli studi esistenti hanno analizzato l'importanza del ruolo delle politiche ambientali nella promozione del riciclo e nella creazione di incentivi per l'industria. La regolamentazione può influenzare direttamente la fattibilità economica del riciclo e la capacità del mercato di assorbire i materiali recuperati dalle batterie esauste, come dimostra Dunn et al. (2022).

Per comprendere meglio le dinamiche della gestione delle batterie a fine vita, la ricerca ha sviluppato diversi modelli di simulazione. Alcuni studi hanno combinato MFA e LCA con approcci dinamici per analizzare l'evoluzione del sistema nel ciclo di vita delle batterie e stimare l'impatto delle politiche di gestione sui flussi di materiali e sulle emissioni ambientali, come analizzato da Gong et al. (2024).

Negli ultimi anni, la System Dynamics (SD) è emersa come una metodologia efficace per modellare il sistema del riciclo delle batterie agli ioni di litio in modo realistico. Questo approccio consente di simulare scenari futuri, valutando la disponibilità effettiva di materiali e l'applicazione delle varie normative. In alcuni studi, come presente in Bruno, Fiore (2024), la SD è stata utilizzata per analizzare l'interazione tra le diverse variabili del sistema, come la crescita del mercato dei veicoli elettrici, la capacità di trattamento degli impianti di riciclo e l'efficienza delle strategie di raccolta e smaltimento.

2.2 Motivi e confini dell'analisi

Motivi dell'analisi

La revisione della letteratura mostra come la gestione delle batterie agli ioni di litio a fine vita sia un tema di crescente interesse, con numerosi studi che affrontano il problema da diverse prospettive.

Tuttavia, una delle principali mancanze identificate riguarda l'assenza di modelli dinamici che valutino la carbon footprint generata, simulando scenari futuri in modo realistico. L'adozione della System Dynamics e l'uso di strumenti avanzati di simulazione, come AnyLogic, rappresentano un passo avanti per migliorare la comprensione del sistema e supportare decisioni strategiche nel settore del fine vita delle batterie, con particolare attenzione verso le quote di riciclo e l'impatto ambientale.

Questo studio propone un modello dinamico che mira a superare i limiti degli approcci statici esistenti e a fornire strumenti più efficaci per la gestione delle batterie a fine vita nel lungo periodo. La tesi si inserisce in questo contesto con l'obiettivo

di quantificare l'impatto ambientale delle strategie di valorizzazione del EOL delle batterie e verificare il rispetto delle quote di riciclo dei materiali critici in base alla strategia di gestione adottata. L'interesse per quest'analisi nasce dalla necessità di valutare la carbon footprint associata all'estrazione delle materie prime vergini e alla realizzazione dei sistemi di accumulo stazionario (BESS), in relazione alle diverse strategie di trattamento delle batterie a fine vita, riciclo o riutilizzo, il tutto in una simulazione dinamica attraverso SD. Inoltre, è essenziale verificare se le quote di riciclo obbligatorie saranno rispettate, valutando se la capacità di trattamento delle batterie dismesse sarà sufficiente a soddisfare gli obiettivi normativi nei prossimi decenni.

Attraverso il modello di SD costruito per rispondere alle research questions presentate al capitolo 1.5, si propone un approccio che consente di prevedere l'evoluzione delle batterie a fine vita, identificare i punti critici della filiera e valutare l'efficacia delle strategie di gestione, andando a considerare approcci di riciclo o di riutilizzo delle batterie.

Confini dell'analisi

I confini della ricerca sono di tipo temporale, geografico e sistematico.

Lo studio analizza l'evoluzione del sistema su un orizzonte temporale che copre il periodo 2010-2050, in linea con le proiezioni di crescita del mercato EV e con le normative europee che impongono obiettivi di riciclo progressivamente più stringenti. È importante sottolineare che l'analisi dei risultati guarderà anche oltre il termine della simulazione, infatti osservare oltre l'orizzonte del 2050 consente di interpretare meglio i risultati ottenuti e di valutare l'evoluzione del sistema nel lungo termine.

L'analisi è condotta nel contesto italiano, tenendo conto delle normative europee sul trattamento delle batterie a fine vita. Si potrebbero fare ulteriori studi, analizzando Paesi e normative differenti.

Il modello assume una condizione di autosufficienza, escludendo politiche di import/export di materiali per la produzione di nuove batterie. Questa ipotesi riflette l'obiettivo dell'UE di promuovere la transizione climatica, evidenziando la necessità di rispettare in modo autonomo le quote di riciclo imposte dalla normativa. Inoltre, considerando le vulnerabilità della filiera produttiva delle batterie, tale scenario rappresenta un modello molto virtuoso, in grado di aumentare la resilienza complessiva del sistema. Il modello inoltre non fa considerazioni dal punto di vista economico, come per esempio le fluttuazioni dei prezzi delle materie prime, che potrebbero influenzare la convenienza economica del riciclo, ma non essendo direttamente correlate alla carbon footprint non verranno prese in considerazione.

2.3 System Dynamics e Anylogic

La System Dynamics è una metodologia sviluppata da Jay W. Forrester negli anni '50 con l'obiettivo di analizzare e comprendere il comportamento dei sistemi complessi nel tempo. Questo approccio si basa sulla rappresentazione delle interazioni tra le variabili attraverso equazioni differenziali e sistemi di retroazione, permettendo di modellare fenomeni che evolvono nel lungo periodo.

Nel caso della gestione delle batterie, la System Dynamics si rivela particolarmente adatta poiché permette di analizzare l'intero ciclo di vita delle batterie, integrando la crescita del mercato dei veicoli elettrici, i ritardi di processo e della logistica, le politiche di gestione dell'end-of-life e le diverse normative europee. Attraverso la modellazione dinamica, è possibile rappresentare il sistema sotto forma di stock e flussi, dove gli stock rappresentano grandezze cumulate nel tempo (ad esempio, la capacità energetica delle batterie a fine vita), mentre i flussi descrivono le variazioni di tali grandezze (come il tasso di morte delle batterie).

Per implementare il modello basato sulla System Dynamics è stato utilizzato AnyLogic, un software avanzato di simulazione che consente di integrare approcci differenti, tra cui la System Dynamics, la simulazione ad eventi discreti e la modellazione basata su agenti. L'utilizzo di Anylogic è stato fondamentale, in quanto è stato possibile creare modelli dinamici basati su stock e flussi, con possibilità di personalizzare le interazioni tra le variabili per rappresentare al meglio la realtà del sistema. E' stato possibile migliorare l'accuratezza delle simulazioni importando dei dataset esterni. Inoltre, visualizzare l'evoluzione del sistema attraverso simulazioni dinamiche, ha consentito di monitorare in tempo reale gli effetti delle variazioni di input sui risultati intermedi o finali.

3 Metodologia

Questa sezione descrive il metodo scientifico adottato per lo sviluppo della tesi. Il capitolo è strutturato in due sezioni principali, in cui viene descritto in dettaglio il modello System Dynamics sviluppato tramite il software AnyLogic. In particolare, la prima sezione è dedicata alla simulazione della diversa gestione del fine vita delle batterie dei veicoli elettrici, mentre la seconda parte approfondisce il modello per la valutazione della carbon footprint generata. In entrambi i casi, viene condotta un'analisi dettagliata delle variabili e delle dinamiche di stock-and-flow, evidenziando le relazioni che governano l'evoluzione del sistema nel tempo.

Il modello sviluppato in questo studio si basa sull'approccio metodologico adottato da Seika, Kubli (2024) che ha simulato l'evoluzione dell'end-of-life (EOL) delle batterie dei veicoli elettrici in Svizzera. Lo studio di Seika, Kubli (2024) è stato sviluppato per analizzare la formazione del mercato del riciclo (recycle) e del riutilizzo (repurposing) delle batterie a fine vita dei veicoli elettrici, con particolare attenzione all'impatto della regolamentazione europea sulle batterie (Regolamento UE 2023/1542). L'obiettivo principale del loro lavoro consiste nel valutare economicamente in che modo le quote obbligatorie di riciclo introdotte dalla normativa influenzino la disponibilità di materiali critici e lo sviluppo delle infrastrutture di riciclo. Attraverso la simulazione, gli autori hanno cercato di comprendere se la regolamentazione favorisca il riciclo a scapito del riutilizzo, se le capacità di riciclo attuale sia sufficiente a gestire la crescente domanda e in che modo le decisioni degli investitori per la costruzione di nuove infrastrutture potranno influenzare il settore delle batterie a fine vita nel lungo periodo.

Nel capitolo 1.5 sono state presentate le research questions a cui la presente tesi vuole rispondere. Per affrontare questi quesiti, è stato sviluppato un modello di simulazione System Dynamics mediante il software AnyLogic, con un focus specifico sulla sostenibilità ambientale. Il modello è finalizzato a rappresentare l'evoluzione del ciclo di vita delle batterie dei veicoli elettrici in Italia, analizzando le diverse dinamiche di fine vita. Sono state introdotte modifiche e ampliamenti metodologici al lavoro di Seika, Kubli (2024) volti a includere una valutazione dettagliata della carbon footprint associata all'intero ciclo di vita delle batterie agli ioni di litio, considerando le implicazioni ambientali delle diverse strategie di gestione, ovvero riciclo e riutilizzo. L'obiettivo è fornire un'analisi più completa dal punto di vista normativo e dell'impatto ambientale, contribuendo ad una maggiore comprensione delle sfide e delle opportunità legate alla gestione sostenibile delle batterie dismesse dai veicoli elettrici. L'analisi copre il periodo 2010-2050, una scelta motivata dalla necessità di osservare le dinamiche delle batterie nel periodo in cui sono in atto le principali normative europee. L'adozione dei veicoli elettrici sta crescendo rapidamente e si prevede un forte aumento del numero di batterie a fine vita già dal 2030. Inoltre, la lunga durata del ciclo di vita delle batterie agli ioni di litio, che può crescere con l'innovazione tecnologica, rende fondamentale un'analisi di lungo termine.

3.1 Modello SD End-of-Life

In questa sezione vengono descritti i passaggi necessari per la costruzione del modello di SD sviluppato per analizzare il fine vita delle batterie dei veicoli elettrici. L'obiettivo è valutare le diverse fasi di riciclo e riutilizzo attraverso differenti configurazioni di gestione del fine vita delle batterie. L'analisi viene condotta tenendo come indicatori principali la capacità di energia disponibile per applicazioni stazionarie, espressa in kWh, e la quantità di materiali critici recuperati, espressa in kg, derivanti dai processi di riciclo. In particolare, si considerano due strategie alternative di gestione del fine vita delle batterie dei veicoli elettrici:

- Strategia "***one-loop***", in cui le batterie dismesse vengono inviate direttamente al processo di riciclo, massimizzando il recupero immediato dei materiali critici.
- Strategia "***two-loop***", in cui le batterie di alta qualità vengono prima riutilizzate in applicazioni stazionarie come le BESS, per poi essere successivamente riciclate. Questo approccio consente di prolungare la vita utile delle batterie e ottenere benefici ambientali ed economici. Tuttavia, introduce un ritardo nel processo di riciclo, posticipando il recupero dei materiali critici.

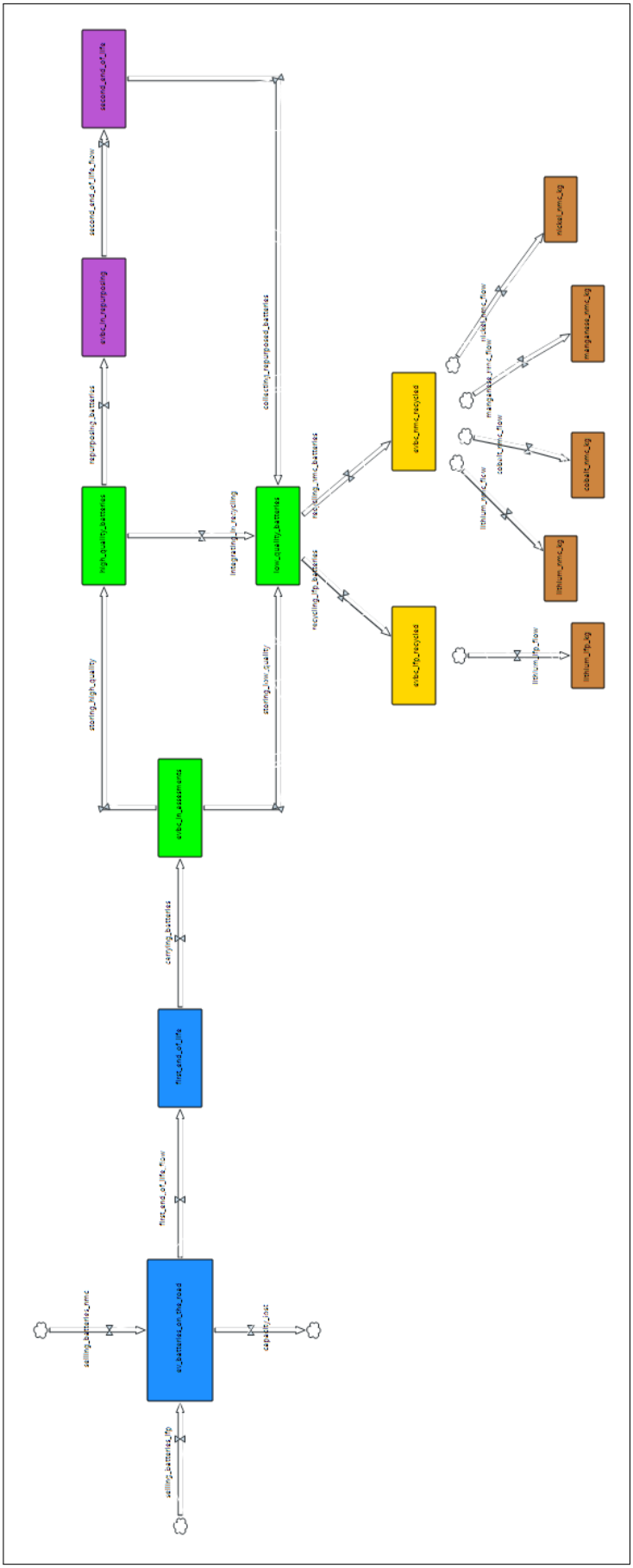


Figura 1: Modello end-of-life

Il modello di simulazione è strutturato in quattro fasi distinte, ognuna delle quali rappresenta un passaggio fondamentale nel ciclo di vita delle batterie degli EV.

1. ***First Use***: Questa fase rappresenta il primo ciclo di vita delle batterie all'interno dei veicoli elettrici, dalla loro immissione sul mercato fino al momento in cui, avendo raggiunto la condizione di End-of-Life, vengono disassemblate dai veicoli per essere destinate alle successive fasi. Il deterioramento progressivo o un guasto/malfunzionamento porta le batterie a un livello di degrado tale da renderle non più idonee per l'uso nei veicoli elettrici, determinando la necessità di disassemblarle dai veicoli per avere a disposizione le batterie per le successive operazioni di recupero.

2. ***Assessment***: In questa fase viene valutato lo stato di salute (State of Health, SoH) delle batterie, al fine di determinarne la destinazione successiva. Le batterie con un SoH ancora elevato vengono destinate al repurposing, ovvero al riutilizzo in applicazioni stazionarie, mentre quelle con un livello di degrado più avanzato vengono direttamente avviate al processo di riciclo. Questa distinzione è essenziale per massimizzare il riciclo immediato dei materiali o prolungare il più possibile la vita utile delle batterie.

3. ***Repurposing***: Le batterie che hanno raggiunto il First End-of-Life ma conservano ancora un'elevata capacità residua vengono riutilizzate in applicazioni stazionarie, come i sistemi di accumulo di energia (Battery Energy Storage Systems, BESS). Durante questa fase, le batterie continuano a essere impiegate per diversi anni, fino a raggiungere la condizione di Second End-of-Life, momento in cui non risultano più idonee nemmeno per applicazioni stazionarie e vengono destinate alla fase finale di riciclo.

4. ***Recycle***: Questa fase rappresenta l'ultimo stadio del ciclo di vita delle batterie, in cui si procede al recupero dei materiali critici contenuti all'interno delle celle, come litio, nickel, cobalto e manganese. L'obiettivo è chiudere il ciclo di utilizzo, minimizzando la dipendenza da materie prime vergini e favorendo la produzione di nuove batterie mediante l'impiego di materiali riciclati, in un'ottica di economia circolare.

Si assume che il sistema sia chiuso, ovvero che tutte le batterie immesse nel mercato nazionale siano gestite internamente lungo i vari cicli di vita, senza esportazione verso altri paesi. Questa ipotesi implica che il sistema debba farsi carico di tutte le batterie che raggiungono il primo EOL, gestendole attraverso strategie di riciclo e/o repurposing al fine di massimizzare il recupero di risorse e i benefici ambientali. L'adozione di un sistema chiuso consente di valutare in maniera diretta le dinamiche di accumulo e smaltimento delle batterie nel tempo e di monitorare l'efficacia delle strategie di economia circolare, grazie al recupero di materiali critici che contribuiscono a ridurre la domanda di materie prime vergini. Tuttavia, l'esportazione di batterie a fine vita potrebbe rappresentare una variabile significativa. Molti paesi potrebbero esportare batterie dismesse verso mercati esteri per processi di riutilizzo in applicazioni stazionarie. Un'analisi futura potrebbe estendere lo studio

considerando scenari di flussi esterni di batterie, valutando l'impatto di politiche di esportazione o importazione sulle dinamiche di riciclo e recupero.

Per una corretta rappresentazione del modello EOL nella sua interezza, è fondamentale definire con precisione le funzionalità degli stock, dei flussi e delle variabili che ne caratterizzano la struttura. La comprensione di questi elementi è essenziale per garantire un'analisi accurata delle dinamiche del sistema e delle interazioni tra i diversi processi coinvolti. Si commenta che in questo modello gli stock rappresenteranno delle capacità di batterie elettriche in kWh (quindi ogni calcolo eseguito porterà all'unità di misura della capacità in kWh), a meno degli stock dei materiali riciclati che saranno quantità espressa in kg. Inoltre, nelle formule saranno definite variabili dinamiche, che evolvono nel corso della simulazione, e che quindi saranno variabili che evolvono in funzione del tempo, e parametri statici, che rimarranno costanti. Per brevità, ciò che sarà definito come una variabile, sarà da intendere sempre come dipendente dal tempo della simulazione.

3.1.1 First use

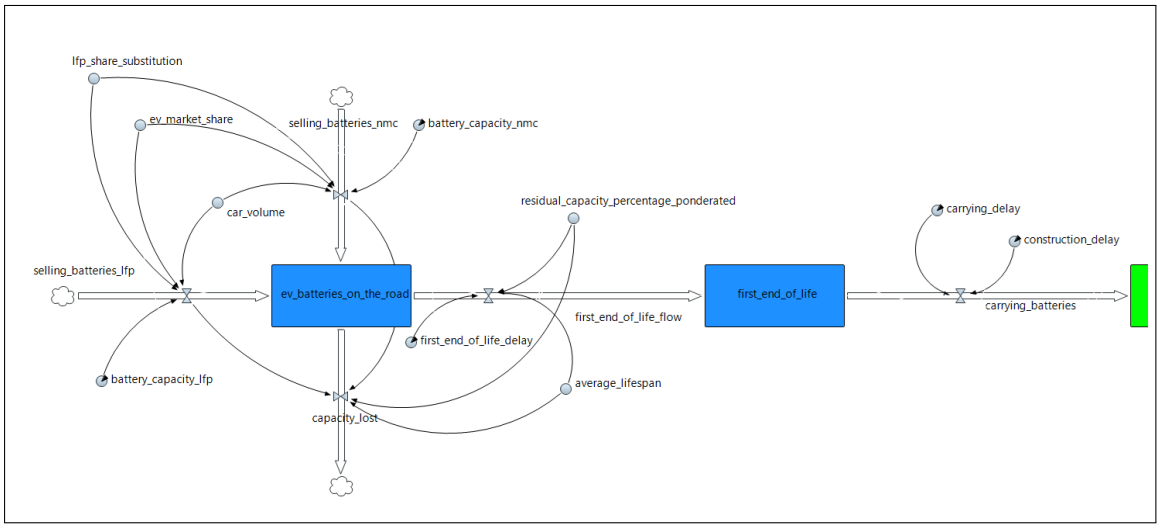


Figura 2: Stock della fase "First use" con inflow e outflow

In figura 2 si osserva la parte iniziale del modello. In questa prima parte, l'input è rappresentato dalla capacità complessiva delle batterie dei veicoli elettrici venduti annualmente sul territorio italiano, espressa in kWh. Poiché ogni veicolo elettrico è equipaggiato con una corrispettiva batteria, lo stock accumula nel tempo la capacità totale di queste batterie, riflettendo la crescita dell'utilizzo di veicoli elettrici. L'output della prima parte corrisponde alla capacità in kWh delle batterie che hanno raggiunto il first end-of-life e sono state disassemblate dai veicoli elettrici, pronte per andare nelle successive fasi del modello.

EV Batteries on the road

Input (EV Batteries on the road)

In ingresso allo stock, ci sono due flussi diversi che rappresentano la capacità delle batterie dei veicoli elettrici che entrano annualmente sulle nostre strade. Infatti, come già citato nel capitolo 1.2.1, le batterie agli ioni di litio analizzate nel modello possono essere suddivise in due principali categorie: NMC e LFP, ciascuna con caratteristiche chimiche e di mercato che influenzano le strategie di fine vita.

Le batterie NMC (811) hanno dominato il mercato per diversi anni, tuttavia, secondo le proiezioni di Bianchetti et al. (2023), questa quota è destinata a diminuire progressivamente fino al 65% entro il 2030. La presenza di materiali critici (nickel, manganese, cobalto, litio) rende il riciclo delle batterie NMC 811 economicamente vantaggioso, poiché permette il recupero di elementi ad alto valore di mercato e permette di recuperare materiali che vengono estratti in posizioni geografiche a rischio. Esse hanno una densità energetica di circa 200 Wh/kg, con una capacità media di 62 kWh/EV. (Bianchetti et al. (2023))

Le batterie LFP stanno acquisendo una quota crescente nel mercato delle batterie per veicoli elettrici, con una previsione di crescita dal 7% nel 2020 al 35% nel 2030. Questo tipo di batteria non contiene i materiali della NMC, ma è costituito prevalentemente da ferro e litio. Grazie a questa composizione, le batterie LFP risultano più economiche e meno dipendenti da materiali critici. Esse hanno una densità energetica di circa 160 Wh/kg, con una capacità media di 49.6 kWh/EV. (Bianchetti et al. (2023))

Le equazioni 1 e 2 rappresentano i due flussi di input del modello, rispettivamente $SellingBatteriesNMC$ e $SellingBatteriesLFP$, relativi all'introduzione di batterie NMC e LFP nel sistema. Per comprendere la loro struttura, è necessario analizzarne il contenuto e le variabili coinvolte.

$$CarVolume \cdot EVMarketShare \cdot BatteryCapacityNMC \cdot (1 - LFPShareSubstitution) \tag{1}$$

$$CarVolume \cdot EVMarketShare \cdot BatteryCapacityLFP \cdot LFPShareSubstitution \tag{2}$$

La variabile **CarVolume** indica il numero di automobili vendute annualmente in Italia ed è associata temporalmente ad un dataset mediante una table function di Anylogic, la quale definisce la relazione tra il tempo e i dati storici di vendita attraverso una serie di assegnazioni discrete. Questa funzione permette di modellare l'andamento del mercato automobilistico italiano in maniera dinamica, aggiornando il valore della variabile anno per anno. Anylogic interpola i dati per restituire un valore da assegnare in modo discreto in ogni istante di tempo. I dati utilizzati per

costruire questa table function sono stati ottenuti mediante una crescita lineare, basata sui dati di vendita di automobili in Italia nel periodo 2010-2024 (Statista (2023)), e successivamente proiettati fino al 2050. In questo caso, in assenza di studi sulla proiezione del mercato italiano dell'automobile fino al 2050, si è ipotizzato che il numero di auto vendute in Italia resti sugli stessi ordini di grandezza. Di seguito la tabella che mostra i valori anno per anno delle macchine vendute in Italia dal 2010 al 2050.

Tabella 1: Auto vendute annualmente in Italia

Anno	**Auto**
2010	1,960,282
2011	1,748,143
2012	1,402,089
2013	1,303,534
2014	1,359,616
2015	1,567,000
2016	1,804,000
2017	1,944,000
2018	1,941,000
2019	1,901,000
2020	1,382,000
2021	1,495,000
2022	1,129,000
2023	1,562,000
2024	1,845,000
2025	1,896,000
2026	1,820,000
2027	1,725,000
2028	1,756,000
2029	1,813,000
2030	1,744,019

Anno	**Auto**
2031	1,751,289
2032	1,758,559
2033	1,765,829
2034	1,773,099
2035	1,780,369
2036	1,787,639
2037	1,794,909
2038	1,802,179
2039	1,809,449
2040	1,816,719
2041	1,823,989
2042	1,831,259
2043	1,838,529
2044	1,845,799
2045	1,853,069
2046	1,860,339
2047	1,867,609
2048	1,874,879
2049	1,882,149
2050	1,889,419

La variabile **EVMarketShare** rappresenta la quota percentuale di EV che saranno venduti in correlazione al mercato italiano delle auto. Essa è associata temporalmente a una table Function di Anylogic, permettendo anno per anno di aggiornare la quota di veicoli elettrici venduti. Nel modello di simulazione sono stati definiti tre scenari principali per analizzare l'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici e il conseguente impatto sulla gestione del fine vita delle batterie: Business As Usual (BAU), Net Zero e ICE Ban (BFS & ASTRA (2023).

1. Lo scenario ***BAU*** (Business As Usual) rappresenta un'evoluzione del mercato automobilistico basata sulle politiche attuali, senza ulteriori interventi normativi volti ad accelerare la transizione elettrica. In questo contesto, la quota di mercato dei veicoli elettrici cresce gradualmente, ma senza raggiungere livelli sufficienti a garantire una rapida decarbonizzazione del settore dei trasporti;

2. Lo scenario **Net Zero** è modellato in linea con gli obiettivi di neutralità climatica, prevedendo una penetrazione più significativa dei veicoli elettrici grazie a un rafforzamento delle misure di incentivo e a una progressiva riduzione della produzione di veicoli con motore a combustione interna;

3. Lo scenario **ICE ban** simula l'introduzione di una normativa più stringente che vieta la vendita di veicoli con motore a combustione interna entro il 2035. Questa politica determina un'accelerazione significativa della transizione verso la mobilità elettrica, con un conseguente aumento della domanda di batterie e una crescita esponenziale del volume di batterie esauste da gestire nei decenni successivi.

Tabella 2: Quota di veicoli elettrici nei diversi scenari

Anno	**BAU Scenario**	**ZERO Scenario**	**ICE BAN Scenario**
2010	0.068%	0.068%	0.068%
2011	0.138%	0.138%	0.138%
2012	0.277%	0.277%	0.277%
2013	0.449%	0.449%	0.449%
2014	0.641%	0.641%	0.641%
2015	1.187%	1.187%	1.187%
2016	1.104%	1.104%	1.104%
2017	1.565%	1.565%	1.565%
2018	1.798%	1.798%	1.798%
2019	4.218%	4.218%	4.218%
2020	8.283%	8.283%	8.283%
2021	13.229%	13.229%	13.229%
2022	17.658%	17.658%	17.658%
2030	21.000%	35.000%	35.000%
2035	30.000%	60.000%	100.000%
2040	38.000%	80.000%	100.000%
2045	46.000%	85.000%	100.000%
2050	55.000%	90.000%	100.000%

Come illustrato nella tabella 2, i tre scenari analizzati presentano quote di mercato dei veicoli elettrici significativamente differenti, determinando esiti diversi nel modello di simulazione. In particolare, nello scenario ICE BAN, a partire dal 2035, anno in cui entrerà in vigore il divieto di produzione di veicoli con motore a combustione interna, lo studio di BFS & ASTRA (2023) ipotizza che la totalità dei nuovi acquirenti opterà per un veicolo elettrico. Questa assunzione implica l'esclusione di qualsiasi variabile legata ai fattori psicologici e comportamentali del consumatore, quali la percezione del costo, preoccupazioni relative all'affidabilità tecnica dei veicoli elettrici o legate alle stazioni di ricarica, che potrebbero influenzare la scelta d'acquisto in un contesto reale.

I parametri **BatteryCapacityNMC** e **BatteryCapacityLFP** rappresentano la capacità di una batteria di un EV, espressa in kWh. La capacità indica la quantità di energia elettrica immagazzinata che può essere erogata per alimentare il motore del veicolo. Questo parametro è un indicatore fondamentale delle prestazioni della batteria, in quanto determina l'autonomia del veicolo, ovvero la distanza massima percorribile con una singola carica. La batteria NMC ha un valore di 62 kWh e l'analisi di Baars et al. (2020) ipotizza che per innovazione tecnologica possa raggiungere i 75 kWh nel 2030. Allo stesso modo, la batteria LFP ha un valore di partenza di 49.6 kWh e per innovazione tecnologica può raggiungere i 60 kWh nel 2030. Su Anylogic, per far variare la capacità delle batterie in uno specifico anno è stato inserito il seguente codice rispettivamente per le capacità delle batterie NMC e LFP:

$$time() < 2030?62 : 75$$
$$time() < 2030?49.6 : 60$$

La variabile **LFPShareSubstitution** indica la quota di sostituzione delle batterie NMC con le batterie LFP. Il modello ipotizza una progressiva sostituzione delle batterie NMC 811 con batterie LFP (Bianchetti et al., 2023). Questa proiezione si basa su diversi fattori tecnologici ed economici che rendono le batterie LFP una scelta sempre più competitiva nel settore dei veicoli elettrici. Le batterie LFP presentano vantaggi significativi rispetto alle NMC 811, tra cui una maggiore stabilità termica, un minor costo di produzione e una durata del ciclo di vita più elevata. A differenza delle NMC 811, le LFP non contengono nickel, cobalto e manganese, tra i materiali critici più rilevanti per l'industria delle batterie, ma sono invece composte principalmente da ferro, fosfato e litio. Questa caratteristica riduce la dipendenza da materie prime strategiche e ne favorisce l'adozione su larga scala. Anche in questo caso, la variabile è associata temporalmente a una tableFunction di Anylogic, che permette di associare anno per anno il valore di percentuale di sostituzione.

Output (EV Batteries on the road)

Sono presenti due output dallo stock **EV Batteries on the road**. **FirstEndOfLifeFlow** rappresenta la capacità complessiva delle batterie dei veicoli elettrici che, su base annua, raggiungono il fine vita a seguito del progressivo degrado delle loro prestazioni. Questo valore indica la quantità di energia che esce dal sistema della mobilità elettrica a causa del guasto o del raggiungimento della soglia minima di SoH, oltre la quale la batteria non è più idonea per l'uso nei veicoli.

L'equazione 3 rappresenta il contenuto del flusso ($FirstEndOfLifeFlow$) in uscita dallo stock utilizzato sul modello Anylogic, a cui viene applicata la funzione $Delay3$ con parametro $AverageLifespan + FirstEndOfLifeDelay$

$$(ResidualCapacityPercentagePonderated \cdot (SellingBatteriesLFP + SellingBatteriesNMC)) \cdot \tag{3}$$
$$\cdot (1 - 0.004)$$

Nella simulazione su Anylogic, è stata implementata la funzione ***delay3*** per modellare il ritardo temporale con cui le capacità delle batterie agli ioni di litio, introdotte sul mercato italiano, giungono al termine della loro vita utile. Nel capitolo dell'appendice A.1 verrà approfondita la funzione delay di AnyLogic, illustrandone il ruolo all'interno del modello e il suo impatto sulla simulazione.

In questa configurazione, l'input della funzione delay3 è rappresentato dalla capacità delle batterie nuove che entrano nel mercato, mentre l'output corrisponde alle batterie che terminano il loro ciclo di vita a seguito del naturale processo di degrado. Il ritardo temporale introdotto dalla funzione è determinato dalla vita media delle batterie, stimata sulla base della distribuzione di Weibull.

Si analizzano di seguito i parametri di ritardo. La variabile ***firstEndOfLifeDelay*** rappresenta il tempo medio impiegato dagli utenti di veicoli elettrici per valutare le opzioni di end-of-life e conferire le batterie esauste ai centri di stoccaggio, secondo Seika, Kubli (2024) è circa un mese. La variabile ***averageLifespan***, invece, definisce la vita media delle batterie dei veicoli elettrici, assumendo che, nel periodo considerato dalla simulazione, le tecnologie NMC e LFP seguano la medesima curva di miglioramento tecnologico. Quest'ultima è associata temporalmente a una tableFunction che aggiorna dinamicamente anno per anno la vita media delle batterie. Per stimare la vita utile delle batterie dei veicoli elettrici e modellarne il processo di degradazione fino al raggiungimento dello stato di end-of-life (EOL), è stata adottata la distribuzione di Weibull, in linea con l'approccio utilizzato da Seika, Kubli (2024).

L'implementazione della distribuzione di Weibull nel modello consente di stimare con maggiore precisione la vita media delle batterie e la loro dismissione nel corso degli anni. Tale metodologia è particolarmente utile per determinare il tasso di uscita delle batterie dal sistema della mobilità elettrica e per fornire una previsione accurata sulla disponibilità futura di batterie fuori servizio. Nel capitolo A.2 è presente una sezione dedicata a questa distribuzione, per comprendere come sia stata utilizzata nel modello di simulazione.

La variabile ***ResidualCapacityPercentagePonderated*** rappresenta lo stato di salute medio delle batterie a fine vita, tenendo conto del loro degrado. È noto che le batterie dei veicoli elettrici raggiungono l'End-of-Life (EOL) con un livello di State of Health (SoH) ancora elevato. Secondo gli studi di Gu et al. (2018) e Zhu et al. (2021), circa l'80% delle batterie in EOL conservano una capacità residua dell'80%, mentre il restante 20% presenta una capacità residua del 50%. La variabile ResidualCapacityPercentagePonderated calcola la capacità residua con una media ponderata sulla base della distribuzione effettiva delle batterie giunte a fine vita. Quest'ultimo parametro determinerà la percentuale di capacità con cui usciranno, una volta raggiunta la fine della prima vita, i flussi SellingBatteriesNMC e SellingBatteriesLFP, tenendo conto di un ulteriore fattore correttivo. Secondo Bianchetti et al. (2023), il 0,4% del materiale rimane agli utilizzatori, che lo trattengono per uso personale.

È presente un ulteriore flusso in uscita, ***CapacityLost***, che rappresenta la capacità

non più disponibile nelle batterie, ovvero quella già consumata nel corso del loro ciclo di vita operativo. Questo flusso quantifica l'energia effettivamente utilizzata dagli utenti prima che le batterie raggiungano il loro stato di EOL, risultando quindi non più recuperabile per processi di riutilizzo o riciclaggio. Dal punto di vista modellistico, la formula di questo flusso è identica a quella di FirstEndOfLifeFlow, ma con la differenza che il valore di capacità in uscita corrisponde al complemento a 1 di ResidualCapacityPercentagePonderated (e senza fattore correttivo). Riassumendo, mentre FirstEndOfLifeFlow rappresenta la capacità residua ancora presente nelle batterie a fine vita, CapacityLost descrive invece la quantità di capacità che è stata progressivamente consumata nel corso della loro vita utile.

Stock (EV Batteries on the road)

Nella modellazione System Dynamics, gli stock rappresentano variabili di stato che accumulano o perdono valore nel tempo, influenzate da flussi in entrata (*inflows*) e in uscita (*outflows*). La loro evoluzione è descritta da equazioni differenziali del primo ordine, integrate nel tempo per determinare il valore aggiornato dello stock in ogni istante t.

Matematicamente, uno stock S è definito come:

$$\frac{dS}{dt} = \sum \text{inflows} - \sum \text{outflows} \tag{4}$$

dove $\frac{dS}{dt}$ rappresenta la variazione dello stock rispetto al tempo, determinata dalla differenza tra i flussi in ingresso e quelli in uscita.

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie presenti attualmente, indicato come $EVBatteriesOnTheRoad$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie immesse nel sistema tramite la vendita di veicoli elettrici con batterie NMC e LFP, rappresentate rispettivamente da $SellingBatteriesNMC$ e $SellingBatteriesLFP$.
- **Outflows**: batterie che raggiungono la fine del primo ciclo di vita e capacità non più recuperabile, rappresentate da $FirstEndOfLifeFlow$ e $CapacityLost$.

Secondo Prognos TEP Energy Infras Ecoplan (2021), il numero iniziale di veicoli elettrici in circolazione nel 2010 è stato ipotizzato nell'ordine di centinaia di unità. Tuttavia, considerando la crescita esponenziale del mercato dei veicoli elettrici nel corso dei 40 anni di simulazione, questo valore risulta trascurabile rispetto alla dinamica complessiva del sistema. Pertanto, nel presente studio, non è stato incluso.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(EVBatteriesOnTheRoad)}{dt}$) è quindi definita come:

$SellingBatteriesNMC + SellingBatteriesLFP - FirstEndOfLifeFlow - CapacityLost$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($EVBatteriesOnTheRoad(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$EVBatteriesOnTheRoad(t) + (SellingBatteriesNMC + SellingBatteriesLFP + \\ - FirstEndOfLifeFlow - CapacityLost) \cdot dt$$

First End-of-Life

Input (First End-of-Life)

In ingresso allo stock si trova l'output di EV Batteries on the Road, che rappresenta la capacità delle batterie che, a causa di guasti o degrado, hanno raggiunto il loro EOL, che è stato analizzato in precedenza.

Output (First End-of-Life)

Il flusso ***CarryingBatteries*** in uscita dallo stock rappresenta, in termini di capacità, le batterie disassemblate dai veicoli elettrici giunti a fine vita. Il processo di disassemblaggio è una fase necessaria poiché le batterie, integrate nei veicoli durante il loro utilizzo primario, devono essere estratte e separate dagli altri componenti per poter essere destinate alle successive fasi di valutazione, riutilizzo e/o riciclo.

L'equazione 5 rappresenta l'output dello stock First End-of-Life, ovvero $CarryingBatteries$. Per comprendere la sua struttura è necessario analizzarne il contenuto, le variabili e i parametri coinvolti.

$$delay3(FirstEndOfLifeFlow, CarryingDelay + ConstructionDelay) \quad (5)$$

E' stata impiegata la funzione delay3 per modellare il ritardo temporale con cui le capacità delle batterie che hanno raggiunto il first End-of-Life riescono ad essere disassemblate e inviate alle successive fasi di valutazione, prendendo quindi in input FirstEndOfLifeFlow.

Il parametro di ritardo ***CarryingDelay*** rappresenta il tempo medio di lavorazione per disassemblare una batteria da un veicolo elettrico e trasportarla nei successivi centri di valutazione dello stato di salute. Secondo Rosenberg et al. (2023a), è un ritardo di 7 giorni.

Il secondo parametro di ritardo, ***ConstructionDelay*** necessita di alcune ipotesi. Come precedentemente discusso, prima di rendere disponibili le batterie per le

operazioni di recupero, è necessario procedere con il corretto disassemblaggio dei veicoli elettrici. In un'analisi ulteriore, sarebbe opportuno considerare la capacità operativa degli impianti di disassemblaggio, ma tale aspetto esula dagli obiettivi di questo studio. Per semplificare il modello, si assume una capacità illimitata per il disassemblaggio dei veicoli, eliminando potenziali colli di bottiglia prima della fase di Assessment. Tuttavia, si introduce un ritardo che tiene conto del tempo necessario per effettuare investimenti adeguati negli impianti di disassemblaggio e anche di riciclo, ipotizzando una supply chain efficiente e ben integrata o la presenza di un'unica entità responsabile della gestione dell'End-of-Life delle batterie. Secondo Rosenberg et al. (2023a), il tempo stimato per l'investimento e la costruzione delle infrastrutture è di circa 6 anni. Tuttavia i vincoli di capacità iniziano a manifestarsi con l'incremento significativo delle quote di veicoli elettrici, previsto intorno al 2030-2035 negli scenari ICE Ban e Net Zero. Pertanto, per assunzione personale, si adotta un ritardo medio di 3 anni per l'intero periodo di simulazione, riflettendo una crescita progressiva delle infrastrutture in linea con l'aumento della domanda di disassemblaggio e riciclo delle batterie.

Stock (First End-of-Life)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie giunte al primo end-of-life, indicato come $FirstEndOfLife$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie che raggiungono la fine del loro primo ciclo di vita, rappresentate da $FirstEndOfLifeFlow$.
- **Outflows**: batterie disassemblate dai veicoli e trasferite alla fase successiva di valutazione, rappresentata da $CarryingBatteries$.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(FirstEndOfLife)}{dt}$) è quindi definita come:

$$FirstEndOfLifeFlow - CarryingBatteries$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($FirstEndOfLife(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$FirstEndOfLife(t) + (FirstEndOfLifeFlow - CarryingBatteries) \cdot dt$$

3.1.2 Assessments

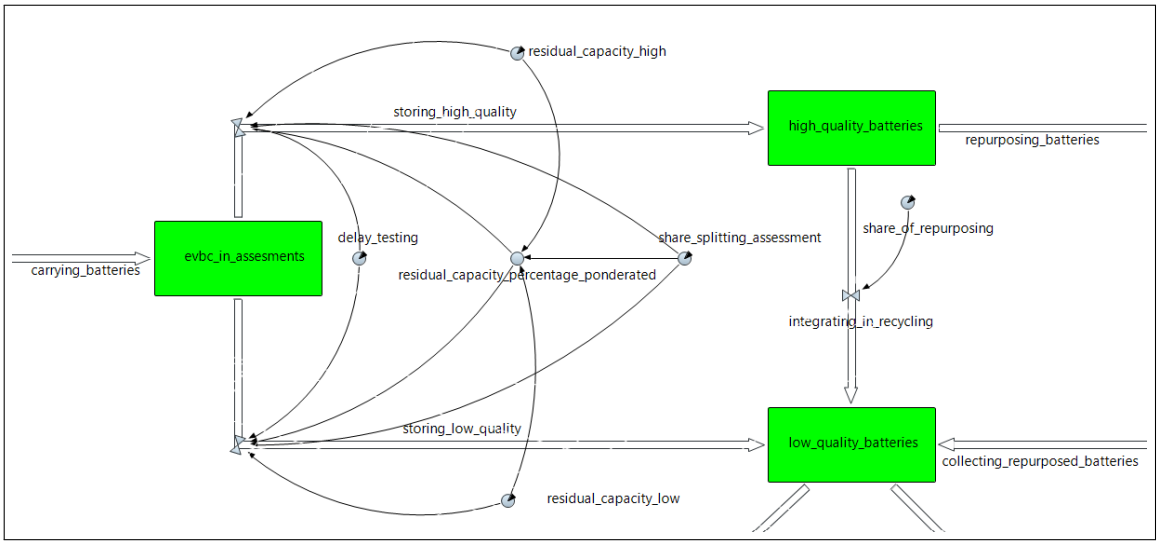


Figura 3: Stock della fase "Assessments" con inflow e outflow

In Figura 3 è rappresentata la seconda fase del modello, relativa al processo di assessments delle batterie agli ioni di litio giunte a fine vita. In questa fase, l'input è costituito dalla capacità totale delle batterie disassemblate dai veicoli elettrici, le quali vengono successivamente valutate in base al loro stato di salute. L'output della fase di assessments è rappresentato dalla capacità delle batterie che vengono destinate al repurposing e da quelle avviate al riciclo. Le batterie con un livello di SoH ancora adeguato possono essere reimpiegate in applicazioni stazionarie, estendendo la loro vita utile prima di essere definitivamente riciclate. Al contrario, le batterie con un degrado avanzato, non idonee al riutilizzo, vengono direttamente inviate ai processi di riciclo dei materiali critici.

EVBC in assessments

Input (EVBC in assessments)

L'ingresso dello stock Electric Vehicle Battery Capacity (EVBC) in assessments corrisponde all'output della fase First End-of-Life (EOL), ovvero la capacità complessiva delle batterie agli ioni di litio che hanno raggiunto la fine della loro vita utile nei veicoli elettrici e sono state disassemblate.

Output

In output dallo stock EVBC in assessments si originano due flussi distinti, corrispondenti alle capacità delle batterie classificate come alta qualità e bassa qualità, a seguito di un processo di valutazione dello stato di salute.

Per comprendere i flussi 6 e 7, ovvero rispettivamente $StoringHighQuality$ e $StoringLowQuality$ a cui è stata applicata una funzione delay con parametro $DelayTesting$, è necessario analizzarne il contenuto, le variabili e i parametri coinvolti nel processo di valutazione.

$$\frac{CarryingBatteries}{ResidualCapacityPercentagePonderated} \cdot ResidualCapacityH \cdot ShareSplittingAssessment \tag{6}$$

$$\frac{CarryingBatteries}{ResidualCapacityPercentagePonderated} \cdot ResidualCapacityL \cdot (1 - ShareSplittingAssessment) \tag{7}$$

Nel modello, è stata implementata la funzione delay per introdurre un ritardo nell'uscita dallo stock, regolato dal parametro ***DelayTesting***. Questo ritardo rappresenta il tempo necessario per effettuare la valutazione dello stato di salute delle batterie elettriche prima di determinarne la destinazione finale. Secondo Seika, Kubli (2024), il valore medio di questo ritardo è pari a 1 giorno, riflettendo il tempo tipicamente richiesto per i test diagnostici e le procedure di classificazione delle batterie giunte a fine vita.

Questi due flussi rappresentano capacità di batterie giunte a fine vita con caratteristiche diverse in termini di capacità residua. Le batterie di alta qualità presentano una capacità residua pari a circa 80% (***ResidualCapacityH***), mentre quelle di bassa qualità possiedono una capacità residua circa del 50% (***ResidualCapacityL***). La distribuzione di queste due categorie è regolata da una probabilità di accadimento. Secondo i dati forniti da Gu et al. (2018), le batterie di alta qualità costituiscono l'80% del totale (***ShareSplittingAssessment***), mentre quelle di bassa qualità rappresentano il 20% (1 - ***ShareSplittingAssessment***).

Prima di separare i due flussi in base alle rispettive capacità e probabilità di accadimento, dopo la valutazione dello stato di salute, è necessario riportare l'input ***CarryingBatteries*** alla capacità vergine prima del raggiungimento delle batterie nello stato di first EOL. Nel modello, inizialmente, la capacità residua delle batterie era stata ponderata per ottenere un flusso unico in FirstEndOfLifeFlow, calcolando che la capacità media residua alla fine del primo ciclo di vita fosse del 74% (***ResidualCapacityPercentagePonderated***). Tuttavia, questa era una semplificazione modellistica e nel momento in cui le batterie devono essere smistate in base alla valutazione dello stato di salute, è necessario ripristinare il valore iniziale della capacità completa. Solo successivamente si potrà assegnare a ciascun flusso il corretto livello di capacità residua a fine vita, tenendo conto della rispettiva probabilità di accadimento.

Stock (EVBCinAssessments)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie in fase di valutazione, indicato come $EVBCinAssessments$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie a fine vita trasferite alla fase di valutazione dopo essere state disassemblate dai veicoli, rappresentate da $CarryingBatteries$.
- **Outflows**: batterie valutate e successivamente destinate a diverse fasi in base alla loro capacità residua, rappresentate da $StoringHighQuality$ e $StoringLowQuality$.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(EVBCinAssessments)}{dt}$) è quindi definita come:

$$CarryingBatteries - (StoringHighQuality + StoringLowQuality)$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($EVBCinAssessments(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$EVBCinAssessments(t)+(CarryingBatteries-(StoringHQuality+StoringLQuality))\cdot dt \quad (8)$$

High Quality Batteries

Input (High Quality Batteries)

L'input dello stock è il flusso StoringHighQuality analizzato in precedenza, che rappresenta la capacità delle batterie a fine vita di alta qualità.

Output

I flussi in uscita da questo stock sono due, ciascuno rappresentativo di una diversa destinazione per le batterie di alta qualità. Il primo flusso, ***RepurposingBatteries***, verrà analizzato in seguito perchè costituisce l'input per la successiva fase di repurposing, in cui le batterie con una capacità residua alta vengono reimpiegate in applicazioni stazionarie.

Il secondo flusso, denominato **IntegratingInRecycling**, rappresenta invece la capacità di batterie di alta qualità che, nonostante possano essere destinate al riutilizzo, vengono direttamente inviate ai processi di riciclo a seguito delle politiche europee discusse nel capitolo 1.4. Questo scenario implica che queste batterie non seguano un percorso two-loop, in cui sarebbero impiegate in una fase intermedia di repurposing prima del riciclo finale, ma vengano invece processate secondo un approccio

one-loop, chiudendo immediatamente il ciclo attraverso il recupero dei materiali critici.

L'integrazione di questo flusso all'interno del modello consente di rappresentare in modo realistico l'impatto delle regolamentazioni europee sulle strategie di gestione del fine vita delle batterie e di quantificare la riduzione del potenziale ambientale del repurposing a fronte di vincoli normativi che incentivano il riciclo diretto, come si osserverà nella discussione dei risultati.

L'equazione 9 rappresenta il flusso IntegratingInRecycling in uscita dallo stock. Per comprenderne il funzionamento, si procede con l'analisi del contenuto e dei parametri.

$$(1 - ShareOfRepurposing) \cdot HighQualityBatteries \tag{9}$$

In questo flusso si distinguono le capacità delle batterie di alta qualità destinate al repurposing da quelle che, per effetto delle politiche europee, devono essere direttamente avviate al one-loop del riciclo. Il parametro ***ShareOfRepurposing*** regola questa suddivisione, indicando la percentuale di batterie di alta qualità che possono essere impiegate in applicazioni stazionarie, mentre la restante capacità viene immessa nel flusso IntegratingInRecycling.

Stock (HighQualityBatteries)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie di alta qualità, indicato come $HighQualityBatteries$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie valutate come di alta qualità e pronte per le fasi successive, rappresentate da $StoringHighQuality$.
- **Outflows**: batterie destinate al riutilizzo o al riciclo in base alla politica europea, rappresentate da $RepurposingBatteries$ e $IntegratingInRecycling$.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(HighQualityBatteries)}{dt}$) è quindi definita come:

$$StoringHighQuality - (RepurposingBatteries + IntegratingInRecycling)$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($HighQualityBatteries(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$HighQualityBatteries(t) + (StoringHighQuality - (RepurposingBatteries + \\ + IntegratingInRecycling)) \cdot dt$$

L'analisi dello stock, inflow e outflow di ***Low Quality Batteries*** verrà condotta nella fase di Recycle, poiché rappresenta il punto di partenza per i processi di riciclo, sia delle batterie giunte a fine prima vita sia di quelle che hanno completato il loro secondo ciclo di utilizzo.

3.1.3 Repurposing

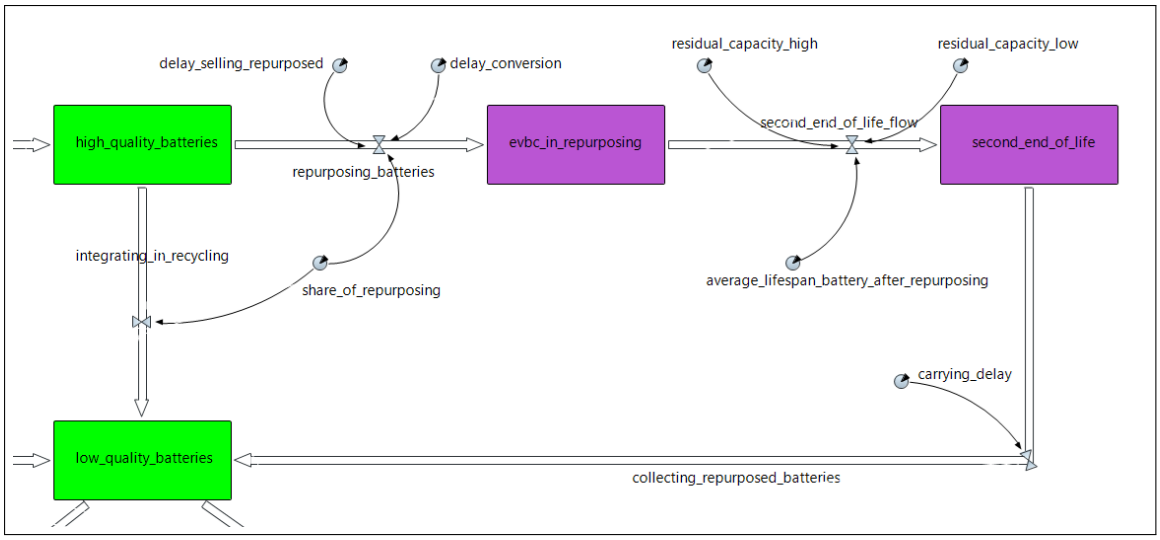


Figura 4: Stock della fase "Repurposing" con inflow e outflow

In Figura 4 è rappresentata la terza fase del modello, relativa al processo di repurposing delle batterie agli ioni di litio classificate come di alta qualità. In input alla fase abbiamo le batterie di alta qualità che sono destinate al riutilizzo in applicazioni stazionarie, come le BESS. L'output della fase è rappresentato dalle batterie che, una volta raggiunto il loro secondo fine vita (Second EOL), non sono più idonee per un ulteriore riutilizzo e vengono quindi destinate alla fase successiva di riciclo.

EVBC in Repurposing

Input (EVBC in Repurposing)

L'input dello stock EVBC in Repurposing è il flusso **RepurposingBatteries**, che rappresenta la capacità di batterie ad alta qualità che sono destinate al riutilizzo per applicazioni stazionarie, a cui viene applicato una funzione delay con parametro $DelayConversion + DelaySellingRepurposed$. Per comprendere la formula 10 che rappresenta RepurposingBatteries, è necessario analizzarne il contenuto, le variabili e i parametri coinvolti.

$$StoringHighQuality \cdot ShareOfRepurposing \tag{10}$$

Nel flusso è stato implementata la funzione delay, per ritardare l'uscita di queste batterie a fronte di due parametri di ritardo. **DelayConversion** è il tempo necessario affinchè le batterie selezionate per il riutilizzo siano convertite per essere adatte a tali scopi. Questo ritardo può dipendere da motivi decisionali, problemi logistici e passaggi tecnici, e secondo Kamath et al. (2023) il ritardo è di circa un giorno.

DelaySellingRepurposed rappresenta il periodo necessario affinché le batterie rigenerate trovino un acquirente e vengano immesse nel mercato per la loro seconda vita. Questo valore include i tempi di commercializzazione, la ricerca di clienti e le eventuali procedure logistiche e amministrative per il trasferimento delle batterie verso il loro nuovo utilizzo. Secondo Seika, Kubli (2024) è di circa un mese.

In ingresso allo stock, è presente la capacità di batterie di alta qualità (Soh= 80%) che può essere convertita per usi stazionari e sta subendo il processo di conversione. La quota di batterie a disposizione per questi usi è governata dal parametro **ShareOfRepurposing**, di cui abbiamo già parlato in merito alle politiche europee.

Output (EVBC in Repurposing)

L'output dello stock, ovvero ***SecondEndOfLifeFlow*** che viene rappresentato dalla formula 11, rappresenta la capacità di batterie che dopo essere state utilizzate per usi stazionari, come per esempio i BESS, raggiungono la fine della loro seconda vita utile per guasti o ulteriore degradamento che non ne consente più l'uso stazionario. Ad essa viene applicata una funzione delay3 con parametro $AverageLifespanBatteryAfterRepurposing$.

$$\frac{RepurposingBatteries}{ResidualCapacityHigh} \cdot ResidualCapacityLow \tag{11}$$

Per comprendere l'equazione 11 è necessario analizzarne il contenuto, le variabili e i parametri coinvolti.

Al flusso in uscita dallo stock di batterie riutilizzate in applicazioni stazionarie è stata applicata la funzione delay3, al fine di modellare in modo più realistico il ritardo con cui le batterie raggiungono il fine vita nella loro seconda fase di utilizzo. Il parametro di ritardo utilizzato è **AverageLifespanBatteryAfterRepurposing**, che rappresenta la vita media utile delle batterie impiegate in applicazioni stazionarie. Secondo Nurdiawati, Agrawal (2022), tale valore è pari a 10 anni.

Si assume che la capacità residua delle batterie al termine della loro seconda vita sia equivalente a quella delle batterie classificate come bassa qualità al termine del primo ciclo di vita. Questa ipotesi si basa sul fatto che, durante la fase di valutazione iniziale, le batterie classificate come di bassa qualità non erano idonee per applicazioni stazionarie a causa di una capacità residua bassa. Di conseguenza, si ipotizza che le batterie che hanno raggiunto il secondo fine vita, al termine della loro seconda vita, raggiungano uno SoH pari al 50%. Prima di applicare questa riduzione della capacità residua, è necessario riportare il valore attuale al valore di riferimento della capacità iniziale della batteria. Questo passaggio viene eseguito dividendo la capacità residua attuale per la quota della capacità iniziale che era stata considerata come "alta qualità" al termine del primo ciclo di vita.

Stock (EVBC in Repurposing)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie in fase di riutilizzo, indicato come

$EVBCinRepurposing$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie destinate al riutilizzo dopo la valutazione della loro qualità, rappresentate da $RepurposingBatteries$.
- **Outflows**: batterie che raggiungono la fine del loro secondo ciclo di vita, rappresentate da $SecondEndOfLifeFlow$.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(EVBCinRepurposing)}{dt}$) è quindi definita come:

$$RepurposingBatteries - SecondEndOfLifeFlow$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($EVBCinRepurposing(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$EVBCinRepurposing(t) + \big(RepurposingBatteries - SecondEndOfLifeFlow\big) \cdot dt$$

Second End-of-Life

Input (Second End-of-Life)

L'input in ingresso a questo stock corrisponde all'output dello stock EVBCinRepurposing, analizzato in precedenza. SecondEndOfLifeFlow rappresenta la capacità delle batterie che, dopo essere state impiegate in applicazioni stazionarie, giungono al termine della loro seconda vita utile.

Output (Second End-of-Life)

Il flusso in uscita dallo stock, ovvero $CollectingRepurposedBatteries$ rappresenta la capacità delle batterie che, avendo raggiunto il secondo fine vita dopo l'utilizzo in applicazioni stazionarie, devono essere trasferite nei centri di stoccaggio per avviare il processo di riciclo. Questa fase consente il recupero dei materiali critici delle batterie riutilizzate per andare a chiudere il two-loop. $CollectingRepurposedBatteries$ è rappresentato con la formula 12, a cui viene applicata una funzione delay con parametro $CarryingDelay$.

$$SecondEndOfLifeFlow \tag{12}$$

Al flusso in uscita dallo stock è stata implementata la funzione delay, al fine di modellare in modo realistico il tempo necessario per il trasporto delle batterie giunte

al secondo fine vita (**SecondEndOfLifeFlow**) verso i centri di stoccaggio per l'avvio del processo di riciclo. Il parametro di ritardo utilizzato è **CarryingDelay**, che rappresenta il tempo medio richiesto per la logistica e il trasferimento delle batterie. Secondo Rosenberg et al. (2023a), tale valore è pari a circa 7 giorni.

Stock (SecondEndOfLife)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie giunte al secondo fine vita, indicato come $SecondEndOfLife$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie che hanno completato il loro secondo ciclo di vita, rappresentate da $SecondEndOfLifeFlow$.
- **Outflows**: batterie raccolte dopo il secondo fine vita per essere successivamente riciclate, rappresentate da $CollectingRepurposedBatteries$.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(SecondEndOfLife)}{dt}$) è quindi definita come:

$$SecondEndOfLifeFlow - CollectingRepurposedBatteries$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($SecondEndOfLife(t+dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$SecondEndOfLife(t)+(SecondEndOfLifeFlow-CollectingRepurposedBatteries)\cdot dt$$

3.1.4 Recycling

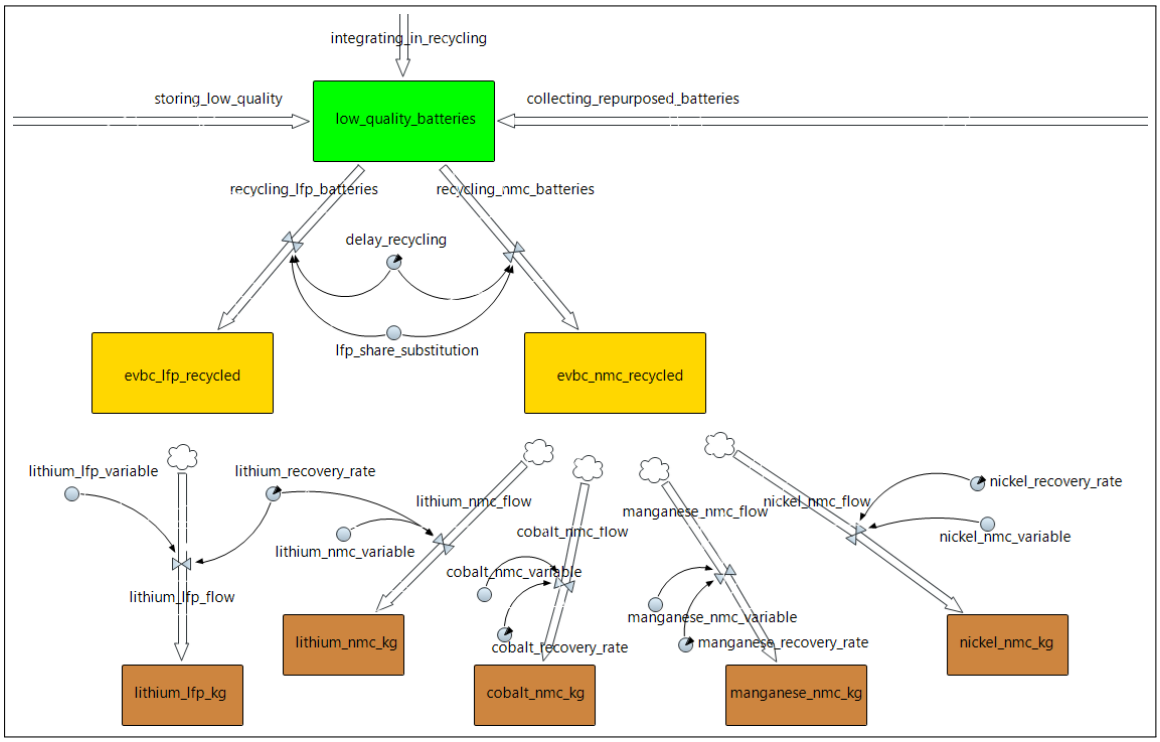


Figura 5: Stock della fase "Recycling" con inflow e outflow

La figura 5 rappresenta la quarta e ultima fase del modello dell'End-of-Life delle batterie dei veicoli elettrici. L'input della fase sono le capacità di batterie agli ioni di litio che sono destinate alla fase di riciclo. L'output dello stock rappresenta la quantità di kg di materiali critici recuperabili attraverso il processo di riciclo, fondamentali per la produzione di nuove batterie utilizzando materiali riciclati. Questa fase assume un ruolo chiave nell'ottica dell'economia circolare, poiché permette di ridurre la dipendenza dalle attività di estrazione dei materiali, abbassando l'impatto ambientale associato alla filiera produttiva delle batterie elettriche agli ioni di litio e rendendola meno vulnerabile a decisioni estere.

Low quality batteries

Input (Low quality batteries)

In input allo stock, abbiamo tre flussi diversi che abbiamo già analizzato. StoringLowQuality e CollectingRepurposedBatteries sono batterie con capacità residua al 50%, IntegratinginRecycling sono batterie con capacità residua all'80%.

Output (Low quality batteries)

In output allo stock ci sono due flussi, ovvero rispettivamente ***RecyclingLFPBatteries*** (13) e ***RecyclingNMCBatteries*** (14) a cui viene applicata la funzione delay con parametro *DelayRecycling*. Essi rappresentano le capacità di batterie LFP e NMC che vengono riciclate.

$$(StoringLowQuality + IntegratingInRecycling + CollectingRepurposedBatteries) \cdot \\ \cdot LfpShareSubstitution \tag{13}$$

$$(StoringLowQuality + IntegratingInRecycling + CollectingRepurposedBatteries) \cdot \\ \cdot (1 - LfpShareSubstitution) \tag{14}$$

Per comprendere le equazioni 13 e 14 è necessario analizzarne il contenuto, le variabili e i parametri.

A entrambi i flussi è stata applicata la funzione delay, al fine di modellare il tempo necessario per completare il processo di riciclo delle batterie. Questo ritardo (**DelayRecycling**) consente di rappresentare in modo più realistico la dinamica temporale delle operazioni di recupero dei materiali critici. Secondo Kamath et al. (2023), il tempo medio richiesto per il riciclo delle batterie è di circa un giorno, valore che riflette il tempo operativo necessario per le attività di separazione dei componenti, trattamento chimico e recupero dei materiali all'interno degli impianti di riciclo.

Entrambe le funzioni delay ricevono in input la quantità totale di capacità disponibile per il riciclo, rappresentata dai flussi in ingresso allo stock LowQualityBatteries. Per distinguere i due flussi di capacità delle batterie LFP e NMC all'interno della fase di riciclo, si utilizza il parametro LFPShareSubstitution, che rappresenta la quota di batterie LFP presenti nel sistema in un dato anno. Nel caso del flusso **RecyclingLFPBatteries**, il parametro LFPShareSubstitution viene applicato per isolare e considerare esclusivamente la capacità delle batterie LFP che si avviano alla fase di riciclo. Per il flusso **RecyclingNMCBatteries**, invece, si utilizza il complemento a 1 del parametro (1 - LFPShareSubstitution), in modo da determinare la capacità di batterie NMC effettivamente presenti nel sistema e destinate al riciclo.

Stock (Low quality batteries)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie di bassa qualità, indicato come *LowQualityBatteries*, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: batterie di bassa qualità che entrano nello stock, rappresentate da *StoringLowQuality*, *CollectingRepurposedBatteries* e batterie di alta qualità che vengono direttamente riciclate, rappresentate da $IntegratingInRecycling$.
- **Outflows**: batterie avviate al processo di riciclo, suddivise in $RecyclingNMCBatteries$ e $RecyclingLFPBatteries$.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(LowQualityBatteries)}{dt}$) è quindi definita come:

$$(StoringLowQuality + CollectingRepurposedBatteries + IntegratingInRecycling) + \\ - (RecyclingNMCBatteries + RecyclingLFPBatteries)$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($LowQualityBatteries(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$LowQualityBatteries(t) + (StoringLowQuality + CollectingRepurposedBatteries + \\ + IntegratingInRecycling - (RecyclingNMCBatteries + RecyclingLFPBatteries)) \cdot dt$$

EVBC LFP/NMC Recycled

Input (EVBC LFP/NMC Recycled)

Gli input dei due stock corrispondono agli outflow dello stock LowQualityBatteries analizzato in precedenza, ricevendo in ingresso le capacità di batterie rispettivamente LFP e NMC che si riescono a riciclare.

Stock (EVBC LFP/NMC Recycled)

Nel modello sviluppato, lo stock di batterie che sono state riciclate, indicato come $EVBCXYZRecycled$, in cui XYZ rappresenta o le LFP o le NMC, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: capacità di batterie nel processo di riciclo, ovvero $RecyclingXYZBatteries$.
- **Outflows**: non è presente nessun flusso in uscita, in quanto questo stock rappresenta la capacità cumulata di batterie LFP o NMC che si riciclano.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(EVBCXYZRecycled)}{dt}$) è quindi definita come:

$$RecyclingXYZBatteries$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($EVBCXYZRecycled(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$EVBCXYZRecycled(t) + (RecyclingXYZBatteries) \cdot dt$$

MaterialXYZkg

Gli stock finali rappresentano l'accumulo progressivo dei kg di materiali critici recuperati attraverso il processo di riciclo, fornendo direttamente la quantità di risorse disponibili per la produzione di nuove batterie. L'integrazione di questi materiali nel ciclo produttivo consente di ridurre la dipendenza dall'estrazione di materie prime vergini, che avviene spesso in aree geografiche caratterizzate da elevata instabilità geopolitica e condizioni socio-economiche critiche, permettendo lo sviluppo di un'economia circolare dei materiali.

Input (MaterialXYZkg)

Durante il processo di riciclo, le batterie vengono sottoposte a un trattamento in cui moduli e celle vengono triturati e separati dai loro componenti strutturali (involucro, collettori di corrente, plastica, ecc.), ottenendo una polvere di lavorazione denominata black mass. Questa fase consente di isolare i materiali attivi della batteria, fondamentali per il recupero di elementi critici. L'obiettivo è quantificare la quantità di materiali critici (litio, manganese, nickel, cobalto) che possono essere recuperati dal processo di riciclo. Secondo Kamath et al. (2023), Olivetti et al. (2017) e Richa et al. (2014), la frazione dei metalli recuperabili è fornita in kg/kWh, indicando la quantità di ciascun elemento contenuta nelle batterie per unità di capacità nominale (kWh). Questo parametro consente di calcolare il potenziale recupero dei materiali critici a partire dalla capacità totale delle batterie processate. Recupero che deve tenere conto di un fattore di efficienza durante le operazioni di riciclo, che possono variare da metallo a metallo.

Poiché l'analisi della strategia di riciclo si concentra esclusivamente sul recupero di materiali critici, nella modellazione delle batterie LFP verrà considerato soltanto il litio, escludendo ferro e fosfato, in quanto non classificati come materiali critici. Per le batterie NMC, invece, verranno presi in considerazione i materiali critici recuperabili, ovvero nickel, manganese, cobalto e litio, in quanto elementi fondamentali per la produzione di nuove batterie e strategici nell'ottica dell'economia circolare (anche se nella battery regulation 1542/2023, il manganese non viene preso in considerazione per le quote obbligatorie).

Di seguito viene riportata la formula generale che si può applicare a tutti gli inflow degli stock che si stanno analizzando ($MaterialXYZFlow$).

$$MaterialRecoveryRate \cdot RecyclingXYZBatteries \cdot MaterialXYZVariable \quad (15)$$

L'equazione 15 rappresenta la formula generale da applicare al flusso in ingresso agli stock, in cui: Material= materiale da recuperare, XYZ= tipologia di batteria che si ricicla (LFP/NMC).

Il parametro ***MaterialRecoveryRate*** indica l'efficienza del processo di recupero del materiale durante tutte le lavorazioni di riciclo e quindi la percentuale della massa del materiale che si riesce effettivamente a recuperare (Bianchetti et al., 2023), Kamath et al. (2023). Si osserva che i valori di recupero dei materiali critici dipendono dalle tecnologie di riciclo adottate, le cui efficienze possono variare nel tempo

in funzione dei progressi tecnologici. Si nota infatti un incremento dell'efficienza del recupero dei materiali critici negli ultimi vent'anni di simulazione.

Materiale	**Recovery Rate 2010-2030**	**Recovery Rate 2030-2050**
Nickel (Ni)	0.90	0.95
Litio (Li)	0.50	0.80
Cobalto (Co)	0.90	0.95
Manganese (Mn)	0.95	0.95

Tabella 3: Efficienza di recupero dei materiali nelle diverse finestre temporali

I valori di quantità di materiale contenuti nella batteria analizzata per kWh di capacità energetica (kg/kWh) riflettono l'evoluzione temporale della composizione chimica delle batterie nel periodo considerato dalla simulazione. Questi valori sono rappresentati con delle variabili (***MaterialXYZVariable***) che sono associate temporalmente a delle table function di anylogic, che permettono di aggiornare anno per anno la composizione chimica. Nello specifico:

- Il manganese mantiene un valore costante di 0.75 kg/kWh per l'intera durata della simulazione.
- Il nickel rimane stabile a 0.392 kg/kWh fino al 2025 e segue una tendenza crescente lineare a 0.732 kg/kWh nel 2050.
- Il litio nelle batterie NMC parte da un valore di 0.139 kg/kWh e segue una tendenza decrescente lineare fino a 0.113 kg/kWh nel 2050.
- Il cobalto mantiene un valore costante di 0.394 kg/kWh fino al 2025, dopodiché segue una decrescita lineare, raggiungendo 0.114 kg/kWh nel 2050.
- Il litio nelle batterie LFP rimane costante a 0.112 kg/kWh per l'intera simulazione.

Stock (MaterialXYZKg)

Nel modello sviluppato, lo stock di kg di materiali critici recuperati, indicato come $MaterialXYZKg$, è governato dai seguenti flussi:

- **Inflows**: quantità espressa in kg di materiale critico effettivamente riciclata, rappresentata da $MaterialXYZFlow$.
- **Outflows**: non è presente nessun flusso in uscita, in quanto questo stock rappresenta la quantità cumulata di materiale riciclato in kg.

L'equazione differenziale che regola l'evoluzione dello stock ($\frac{d(MaterialXYZKg)}{dt}$) è quindi definita come:

$$RecyclingXYZFlow$$

Questa equazione viene risolta numericamente in AnyLogic, aggiornando lo stock ad ogni intervallo dt ($MaterialXYZKg(t + dt)$) con la seguente espressione discretizzata:

$$MaterialXYZKg(t) + (RecyclingXYZFlow) \cdot dt$$

Oltre agli aspetti strategici legati alla sicurezza dell'approvvigionamento, il recupero dei materiali critici tramite il riciclo comporta benefici ambientali significativi, in quanto le attività minerarie per l'estrazione di elementi come litio, cobalto, nickel e manganese sono associate a elevate emissioni di CO_2 equivalente. La progressiva sostituzione delle materie prime estratte con materiali riciclati rappresentano quindi un passo essenziale verso una maggiore sostenibilità e una riduzione dell'impronta ambientale dell'intera filiera produttiva delle batterie.

Calcolo delle quote di materiali riciclati

Per favorire un'economia circolare e ridurre la dipendenza da materie prime critiche vergini, la normativa ***Regulation 1542/2023*** dell'Unione Europea ha introdotto quote obbligatorie di materiali riciclati da impiegare nella produzione di nuove batterie agli ioni di litio. Queste quote impongono ai produttori di utilizzare una percentuale minima di nickel, cobalto e litio proveniente da processi di riciclo, con obiettivi progressivamente più stringenti nel tempo.

Per valutare come il modello EOL si comporti con le quote di riciclo stabilite dall'Unione Europea, è stato utilizzato un dataset in AnyLogic denominato ***ShareRecyclingMaterial***. Questo dataset calcola anno per anno il rapporto tra la quantità di materiale riciclato, riutilizzabile per la produzione di nuove batterie, e la quantità di materiale che dovrebbe essere estratto nello stesso anno per soddisfare la domanda di batterie per veicoli elettrici. Tale analisi permette di verificare il contributo del riciclo nel ridurre la dipendenza dall'estrazione di materie prime, fornendo un confronto diretto con gli obiettivi normativi imposti a livello europeo. Di seguito il contenuto del dataset ($ShareRecyclingMaterial$) inserito su Anylogic:

$$\frac{MaterialXYZFlow}{MaterialKgExNovoWithoutRecyclingFlow} \tag{16}$$

Il denominatore sarà oggetto di studio nel capitolo 3.2.3. In questo modo è possibile monitorare se la strategia di riciclo adottata sia sostenibile nel contesto di autosufficienza che stiamo analizzando, ovvero senza importazioni o esportazioni di materiali critici, monitorando se il sistema riesce a soddisfare la domanda di materie prime riciclate per la produzione di nuove batterie, rispettando i requisiti fissati dall'Unione Europea.

La carbon footprint è il focus della prossima sezione, in cui si analizza l'impatto ambientale associato alla produzione di batterie agli ioni di litio (per il settore auto-

motive e per il settore degli usi stazionari) a seconda delle diverse strategie di riciclo e repurposing. L'obiettivo è comprendere in che modo la combinazione di queste politiche possa mitigare le emissioni di CO_2eq, riducendo la necessità di estrazione di materie prime vergini e le produzione di nuove batterie.

3.2 Carbon footprint assessments

Questa sezione è dedicata alla metodologia di sviluppo della seconda parte del modello di System Dynamics, incentrata sull'analisi ambientale, con l'obiettivo di quantificare gli impatti ambientali associati alle diverse strategie di gestione del fine vita delle batterie, esaminate nel Capitolo 3.1. Il principale indicatore di prestazione (Key Performance Indicator, KPI) adottato è la carbon footprint. L'analisi della carbon footprint riguarderà due mercati distinti, ponendo particolare attenzione al potenziale risparmio di emissioni di CO_2eq derivante sia dalla riduzione dell'estrazione di materiali critici per le batterie nel settore automotive, sia dalla diminuzione della produzione di batterie *ex novo* nel mercato degli usi stazionari.

Le batterie agli ioni di litio impiegate nel settore automobilistico che giungono a EOL possono prolungare il proprio ciclo di vita ed essere reimpiegate in applicazioni stazionarie, a seguito di un'adeguata valutazione dello SoH. In queste applicazioni, le batterie vengono utilizzate per l'accumulo energetico, una funzione essenziale per la gestione delle reti elettriche. Come discusso nel Capitolo 1.3.1, i Battery Energy Storage Systems (BESS) rappresentano una tecnologia chiave per la transizione energetica, in quanto consentono di mitigare l'intermittenza delle fonti rinnovabili e di migliorare la stabilità della rete. La crescente diffusione di energie rinnovabili, in particolare solare ed eolica, ha reso imprescindibile lo sviluppo di sistemi di accumulo efficienti, capaci di immagazzinare l'energia in eccesso nei periodi di sovrapproduzione e rilasciarla quando la domanda supera l'offerta.

L'analisi della carbon footprint del repurposing si focalizza sul riutilizzo delle batterie EV in applicazioni stazionarie, riducendo la necessità di produrre nuove batterie. Questo processo consente di evitare le emissioni di CO_2eq associate all'intero ciclo produttivo, dall'estrazione delle materie prime fino alla fabbricazione della batteria. Per quanto riguarda il riciclo, come evidenziato nel capitolo 3.1.4, il nostro modello EOL di SD consente di quantificare i materiali critici che si riescono a recuperare, successivamente riutilizzabili per la produzione di nuove batterie. Il riciclo permette di ridurre la dipendenza da queste attività estrattive, fornendo direttamente i materiali necessari per la produzione di nuove batterie agli ioni di litio, con una conseguente riduzione dell'impatto ambientale.

3.2.1 GHG Protocol e ISO14064

Il calcolo della carbon footprint è un passaggio fondamentale per la valutazione dell'impatto ambientale della gestione dell'EOL delle batterie dei EV. Questo calcolo si basa tipicamente su metodologie definite da standard internazionali, come la norma ISO 14064 e il GHG Protocol, che forniscono le linee guida per la quantificazione e la gestione delle emissioni di gas serra.

La norma ***ISO 14064*** è un insieme di standard internazionali per la quantificazione e la segnalazione delle emissioni e delle rimozioni di gas serra. E' suddivisa in:

- ISO 14064-1, fornisce le specifiche e le linee guida per le organizzazioni per quantificare e segnalare le emissioni e le rimozioni di gas serra. È utilizzato da aziende e organizzazioni che desiderano misurare e gestire le loro emissioni di gas serra in maniera responsabile e conforme alle normative internazionali;
- ISO 14064-2, tratta della quantificazione, del monitoraggio e della segnalazione di progetti specifici per la riduzione delle emissioni di gas serra. Si focalizza sull'individuazione delle linee di base, sul monitoraggio e quantificazione delle emissioni in progetti specifici;
- ISO 14064-3, stabilisce i requisiti per la verifica e la validazione delle dichiarazioni sui gas serra. Assicura che le dichiarazioni sui gas serra siano affidabili, credibili e conformi alle normative internazionali, facilitando così una maggiore trasparenza nelle pratiche ambientali delle organizzazioni.

Il ***GHG Protocol*** (Greenhouse Gas Protocol) è uno standard ampiamente accettato a livello internazionale per la contabilità e la rendicontazione delle emissioni di gas serra delle imprese. Fornisce strumenti e linee guida per aziende e governi che mirano a comprendere, quantificare e gestire le emissioni di gas serra. Il GHG Protocol definisce tre *scope* (ambiti) per la categorizzazione delle emissioni:

- Scope 1, include tutte le emissioni dirette, è fondamentale per comprendere l'impatto immediato delle attività aziendali;
- Scope 2, copre le emissioni indirette dall'acquisto di energia, che riflette l'efficienza energetica e l'impegno verso fonti energetiche sostenibili;
- Scope 3, copre tutte le altre emissioni indirette che si verificano nella catena del valore dell'azienda che non sono coperte da Scope 2. Queste possono includere viaggi d'affari, trasporto e distribuzione, gestione dei rifiuti, acquisti di beni e servizi, e il fine vita dei prodotti venduti.

Nel presente studio, i fattori di emissione di CO_2eq necessari per stimare l'impronta di carbonio sono stati ottenuti da fonti di letteratura scientifica. L'utilizzo di questi dati è stato guidato principalmente dalla necessità di effettuare stime affidabili in modo efficiente. Nel contesto del nostro studio, focalizzato su un'analisi ad alto livello di astrazione delle emissioni di gas serra nei processi di EOL delle batterie, questa scelta ha garantito un equilibrio ottimale tra accuratezza e praticità.

Si riconosce l'importanza dell'applicazione diretta di metodologie standardizzate come ISO 14064 e il GHG Protocol, soprattutto per studi che richiedono un livello di dettaglio e precisione superiore. Tuttavia, data la natura relativamente teorica del nostro calcolo delle emissioni, l'approccio basato sui dati forniti dalla letteratura scientifica si è rivelato adeguato.

Per studi futuri che intendono approfondire gli impatti diretti e indiretti del processo di EOL delle batterie, è possibile condurre un'analisi Life Cycle Assessment che

permetterebbe di valutare in modo più dettagliato gli effetti ambientali associati alle diverse fasi del fine vita.

3.2.2 Carbon footprint con riutilizzo

Questa sottosezione descrive la metodologia utilizzata per l'analisi del mercato italiano dei BESS e per la quantificazione della relativa carbon footprint, considerando scenari con e senza il repurposing delle batterie provenienti dai veicoli elettrici.

Di seguito il modello SD utilizzato per l'analisi:

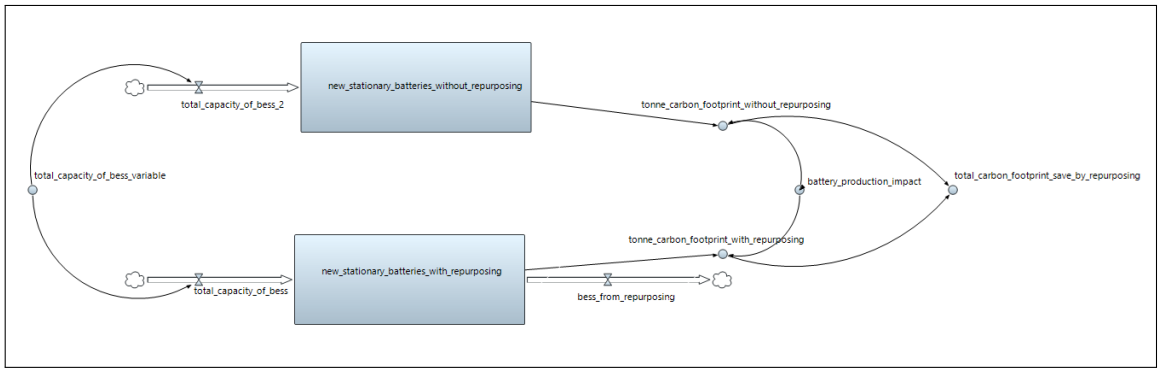


Figura 6: Calcolo Carbon Footprint per produzione BESS con o senza il repurposing

Nel modello sono definiti due stock, ***NewStationaryBatteriesWithoutRepurposing*** e ***NewStationaryBatteriesWithRepurposing***, che rappresentano rispettivamente l'accumulo della capacità energetica, espressa in GWh, delle batterie agli ioni di litio destinate ad applicazioni stazionarie nei casi in cui il repurposing non venga considerato e in cui, invece, sia adottato.

Input

Entrambi gli stock ricevono in ingresso il medesimo flusso, ***TotalCapacityofBESS***, il cui valore è determinato dalla variabile ***TotalCapacityofBESSVariable***. Quest'ultima è definita in funzione di una table function in AnyLogic, che assegna dinamicamente anno per anno la domanda di batterie di accumulo per usi stazionari in Italia, consentendo una modellazione temporale discreta della domanda di capacità di stoccaggio.

In Italia, il settore dei *BESS* sta registrando una crescita significativa sia in ambito industriale/commerciale, sia nel settore residenziale. In particolare, quest'ultimo ha beneficiato di un forte impulso grazie agli incentivi governativi, come il *Superbonus 110%*, che ha reso economicamente vantaggiosa l'installazione di sistemi di accumulo integrati con impianti fotovoltaici nelle abitazioni. Questa misura ha consentito ai cittadini di ridurre la dipendenza dalla rete elettrica, diminuire i costi energetici e favorire l'autoconsumo, incrementando l'indipendenza energetica. Nel

settore commerciale e industriale, i sistemi BESS offrono vantaggi rilevanti, tra cui l'ottimizzazione della gestione della domanda energetica e l'arbitraggio dei prezzi dell'energia. L'adozione di tali tecnologie è incentivata non solo dalla possibilità di ridurre i costi operativi, ma anche dall'opportunità di contribuire attivamente alla transizione energetica verso un modello più sostenibile.

Europe (2024) fornisce i dati di mercato italiani delle installazioni di batterie di accumulo per usi stazionari di impianti fotovoltaici, espressi in GWh, per il periodo 2021-2023, mentre Terna S.p.A. (2025) riporta i valori della capacità installata per il 2024. Inoltre, sulla base di stime di Europe (2024), vengono fornite proiezioni sul mercato delle installazioni di BESS italiano per il periodo 2025-2028.

In assenza di dati per il 2010 (inizio della simulazione), le installazioni di BESS sono state stimate intorno a 0.1 GWh, riflettendo il carattere sperimentale e nascente di questa tecnologia, allora impiegata prevalentemente in progetti pilota.

Anno	**BESS [GWh]**
2021	0.8
2022	2.8
2023	6.5
2024	12.4
2025	17
2026	24.6
2027	35.1
2028	48.8

Tabella 4: Dati storici e previsioni disponibili della capacità energetica di BESS

Il dato iniziale del 2010, caratterizzato da un valore molto basso e derivante da stime storiche, è stato perequato mediante il principio della regressione della perequazione, al fine di garantire che la previsione risultasse coerente con l'andamento osservato nei periodi successivi. Utilizzando questi dati e le proiezioni disponibili, la presente analisi ha stimato l'evoluzione della capacità energetica di accumuli stazionari richiesta in Italia fino al 2050, mentre i valori dal 2010 al 2020 sono stati interpolati direttamente in modo lineare dal software Anylogic.

Uno degli aspetti fondamentali nella previsione della diffusione delle BESS è la scelta del modello di crescita più adeguato, capace di rappresentare sia l'andamento storico del settore sia le prospettive future, considerando eventuali vincoli strutturali. L'espansione del fotovoltaico, secondo ACCA Software (2024) è influenzata da diversi vincoli spaziali, soprattutto nel settore residenziale. La disponibilità di superficie sui tetti rappresenta un fattore limitante, poiché non tutti gli edifici dispongono di spazio idoneo a causa di ombreggiamenti, orientamento sfavorevole oppure ostacoli strutturali. Nelle aree urbane ad alta densità, la carenza di spazio a terra riduce ulteriormente le possibilità di installazione, mentre regolamentazioni edilizie e vincoli paesaggistici possono imporre restrizioni aggiuntive. Anche gli impianti a terra competono con altri usi del suolo, come l'agricoltura, sebbene soluzioni come l'agrivoltaico possano offrire un compromesso. Questi limiti possono determinare un

tetto massimo alla diffusione del fotovoltaico, con ripercussioni diretta sulla crescita delle BESS.

Per questi motivi, l'analisi ha preso in considerazione tre diverse categorie di previsioni: la regressione lineare, la regressione logaritmica e il fitting di una funzione logistica.

Regressione lineare

In questo caso, la regressione lineare presuppone una crescita costante nel tempo, senza limiti superiori, e può essere espressa nella forma:

$$y(x) = \alpha + \beta \cdot x$$

dove y rappresenta la capacità installata delle BESS, x il tempo della simulazione e α e β sono i parametri della retta da stimare.

Questo forecasting si basa sull'ipotesi che la diffusione dei sistemi di accumulo segua direttamente la crescita delle fonti rinnovabili, che dovranno rispondere al 2050 alla maggior parte della domanda energetica italiana. Tuttavia, non tiene conto dei possibili effetti di saturazione. In questo modo, si suppone che la crescita continui ignorando ipotetici vincoli legati alla disponibilità di spazio e alle limitazioni infrastrutturali che potrebbero rallentare la diffusione nel lungo periodo.

Tramite l'ausilio di Excel e dello strumento "Analisi dati - Regressione", l'inserimento dei dati disponibili nei vari anni ha fornito i parametri α e β che definiscono l'equazione della retta di regressione $y(x) = -84.2 + 6.62 \cdot x$. Essa è stata utilizzata per prevedere l'andamento dei valori nel tempo, sostituendo la variabile x con gli anni della simulazione. Questo ha permesso di stimare l'evoluzione lineare della capacità installata delle BESS nel periodo analizzato.

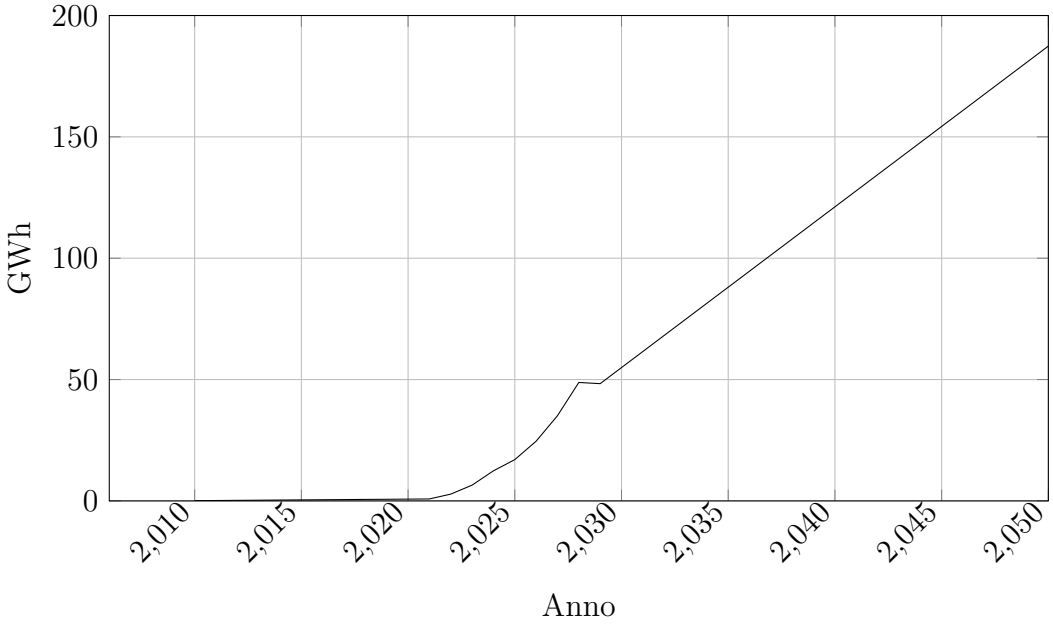


Figura 7: Evoluzione della capacità di BESS in GWh secondo regressione lineare

Regressione logaritmica

Una versione di forecasting che tiene conto dei vincoli di spazio è la regressione logaritmica, che introduce un rallentamento della crescita man mano che il mercato si sviluppa. La sua forma è:

$$y(x) = \gamma + \delta \cdot \ln(x)$$

dove y rappresenta la capacità di BESS, x il tempo della simulazione, γ e δ sono parametri da stimare. Questo modello di regressione riconosce che nelle prime fasi la crescita di BESS è rapida, ma successivamente il tasso di espansione si riduce.

L'applicazione della regressione logaritmica è particolarmente realistica in questi mercati in cui l'adozione iniziale è incentivata da fattori favorevoli, come incentivi economici e innovazioni tecnologiche, ma che nel tempo possono incontrare limitazioni, ad esempio nel settore residenziale, dove la disponibilità di spazio diventa un fattore critico. Tuttavia, questo modello non prevede un limite massimo, pur rallentando progressivamente. La capacità installata continua a crescere, ma potrebbe risultare poco realistico in presenza di forti vincoli strutturali dati da regolamentazioni edilizie.

Tramite l'ausilio di Excel e l'analisi grafica con la funzione "Linea di tendenza", è stata identificata l'equazione della crescita logaritmica più adatta ai dati disponibili. Questo processo ha permesso di ottenere i valori dei parametri γ e δ che definiscono la funzione logaritmica $y(x) = -253 + 99.2 \cdot ln(x)$ fornendo una rappresentazione

del trend di crescita con un rallentamento progressivo nel tempo. Una volta ottenuti i parametri γ e δ, è stata utilizzata l'equazione della funzione logaritmica per prevedere l'andamento dei valori nel tempo, sostituendo la variabile x con gli anni della simulazione. Questo ha permesso di stimare la crescita della capacità installata delle BESS, tenendo conto del rallentamento progressivo caratteristico di questa regressione.

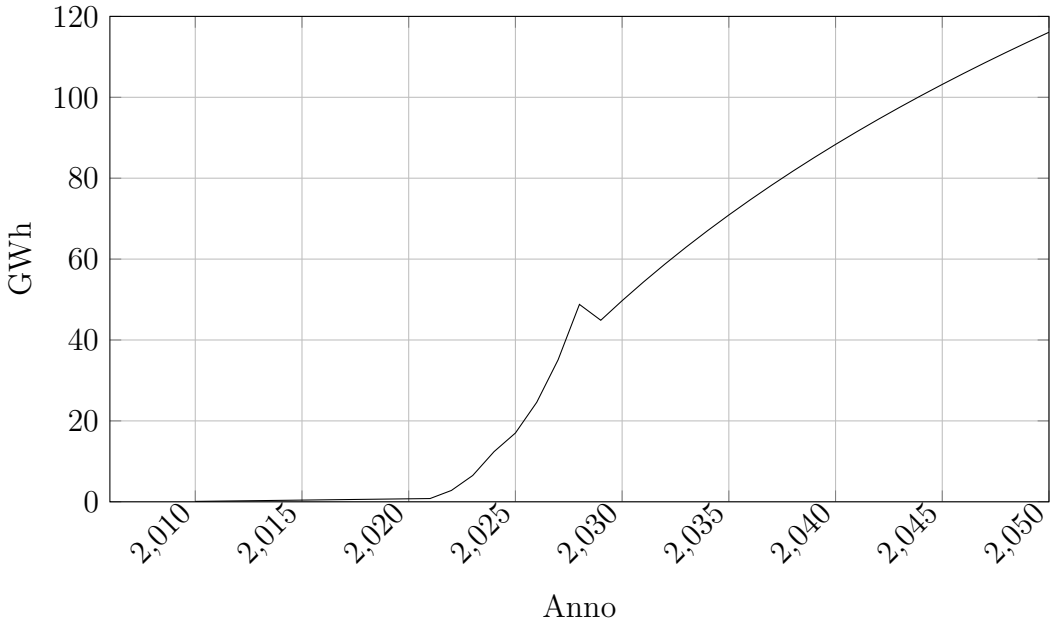


Figura 8: Evoluzione della capacità di BESS in GWh secondo regressione logaritmica

Fitting di una funzione logistica

Per rappresentare con maggiore accuratezza una crescita inizialmente rapida seguita da una progressiva saturazione del mercato, tenendo conto di normative stringenti sull'edilizia, densità urbana e vincoli paesaggistici, è stata considerata la funzione logistica, espressa come:

$$y(x) = \frac{K}{1 + e^{-\alpha(x - x_0)}} \tag{17}$$

dove K rappresenta il valore massimo asintotico, ovvero la capacità energetica installabile massima determinata da vincoli di spazio e regolamentazioni edilizie, α determina la rapidità di crescita, x_o è il punto di flesso, in cui il tasso di crescita è massimo.

Questo modello consente di rappresentare scenari in cui l'adozione tecnologica cresce rapidamente nelle prime fasi, grazie alla riduzione dei costi e agli incentivi, ma incontra successivamente barriere fisiche e normative che ne limitano la diffusione.

Tramite l'ausilio di Excel, si è ipotizzato un valore dei parametri iniziale verosimile basandosi sui risultati della regressione logaritmica, ovvero K=110, α=0.7, x_0=2035. Successivamente, si sono calcolati i valori della funzione logistica fino all'anno 2028, utilizzando i parametri ipotizzati come riferimento. In seguito, per cercare di fittare al meglio la funzione logistica con i dati a disposizione, è stato calcolato l'errore quadratico tra i dati osservati e i valori previsti dalla funzione, trovando poi come indicatore chiave l'errore quadratico medio (Mean Squared Error, MSE). L'obiettivo era minimizzare questo indicatore, riducendo così la discrepanza tra il modello e i dati reali. A tal fine, è stato utilizzato lo strumento Risolutore di Excel, impostando un'ottimizzazione con il metodo GRG Non Lineare. La funzione obiettivo era la minimizzazione del MSE, mentre le variabili di ottimizzazione erano i parametri della funzione logistica.

$$\begin{aligned} &\min \quad \frac{\sum_{i=1}^{n}(\text{CapacitàReale}_i - \text{CapacitàPrevista}_i)^2}{n} \\ &\text{s.t.} \\ &K \geq 0, \quad \alpha \geq 0, \quad x_0 \geq 0 \end{aligned}$$

L'ottimizzazione ha portato a un MSE di 1.08, migliorando significativamente il fitting della curva con i dati a disposizione (che con i parametri ipotizzati inizialmente era ad un valore di 570).

Ottenuti i parametri ottimizzati che definiscono la funzione logaritmica $y(x) = \frac{93.63}{1+e^{-0.533(x-2027.89)}}$, è stata estesa la previsione della funzione logistica fino al 2050. L'analisi ha evidenziato la presenza di un valore asintotico orizzontale a 93.63 GWh, indicando un tetto massimo oltre il quale la capacità installata delle BESS tende a stabilizzarsi nel lungo periodo.

Il flusso TotalCapacityofBESS anno per anno farà accumulare nello stock la capacità installata in Italia, a seconda del tipo di modello di forecasting che si vuole utilizzare. Si assume che il flusso ***TotalCapacityofBESS*** incorpori già i tassi di guasto delle batterie stazionarie, includendo sia la capacità richiesta per nuove installazioni sia quella necessaria per la sostituzione delle unità guaste. In questo modo, il modello considera direttamente il fabbisogno complessivo di capacità, evitando di dover distinguere tra batterie di nuova produzione e quelle destinate a sostituire dispositivi guasti.

Si assume che la durata operativa di una batteria di un EV di seconda vita in applicazioni stazionarie possa essere approssimabile a quella di una batteria nuova progettata per l'uso stazionario. Questo perché, pur partendo con un SoH dell'80%, la capacità installata complessiva dell'EVBattery è maggiore, rendendo trascurabile

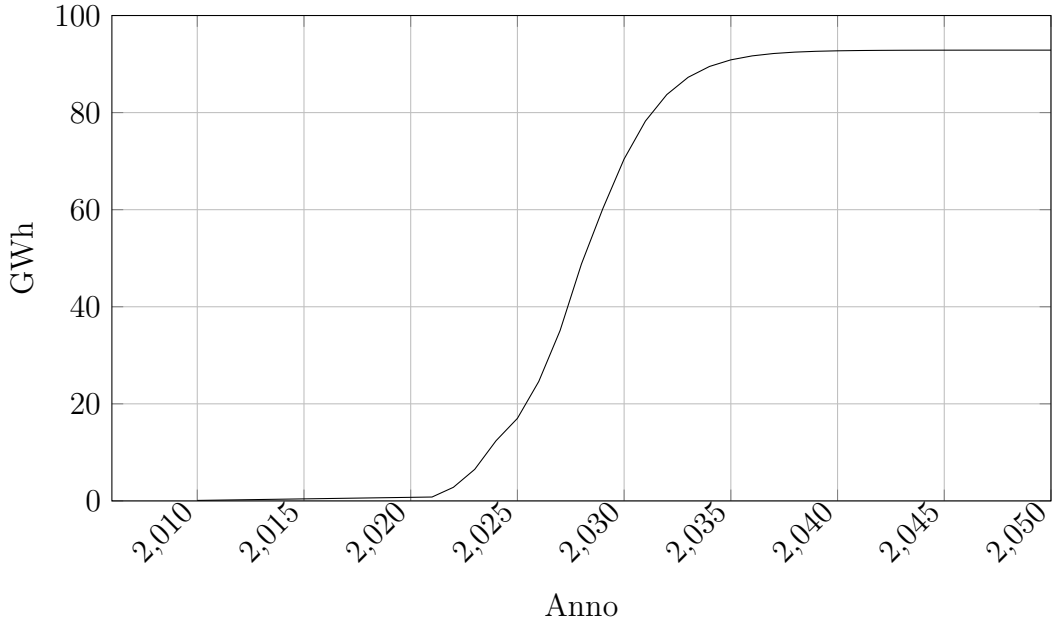


Figura 9: Evoluzione della capacità di BESS in GWh secondo il modello logistico

il degrado iniziale. Inoltre, l'uso stazionario sottopone la batteria a minori sollecitazioni rispetto all'impiego in un veicolo elettrico, con cicli di carica e scarica più regolari e meno profondi.

Output

Solamente lo stock ***NewStationaryBatteriesWithRepurposing*** presenta un flusso in uscita, rappresentato da ***BESSFromRepurposing***. Questo flusso indica la capacità delle batterie EV destinate al repurposing e riutilizzabili per applicazioni stazionarie. Di conseguenza, contribuisce a ridurre la capacità cumulativa di nuove BESS da installare annualmente in Italia dello stock (***NewStationaryBatteriesWithRepurposing***), perchè queste unità derivanti dal repurposing sostituiscono una parte della domanda, evitando così la necessità di produrre nuove batterie. Infatti il flusso *BESSFromRepurposing* è direttamente determinato dal flusso *RepurposingBatteries* del modello EOL, che rappresenta la quantità di batterie destinate al repurposing.

Carbon Footprint per la produzione di BESS con/senza repurposing

Dato che nei due stock di figura 6 è rappresentata la capacità cumulata delle batterie per applicazioni stazionarie da installare in Italia entro il 2050, è possibile calcolare il relativo impatto di carbon footprint per ciascuno di essi. Questo consentirà di quantificare la differenza nelle emissioni di CO_2eq tra lo scenario in cui vengono adottate politiche di repurposing delle batterie EV e quello in cui tali politiche non vengono implementate, valutando così il potenziale beneficio ambientale derivante

dal riutilizzo delle batterie.

Le batterie agli ioni di litio rappresentano una soluzione essenziale per la transizione energetica, ma la loro produzione comporta un'impronta di carbonio non trascurabile. Secondo lo studio di Gutsch, Leker (2024) l'impronta di carbonio associata alla produzione di celle NMC811 è di 64.5 $kgCO_2eq/kWh$, mentre per le batterie LFP il valore è leggermente inferiore, ovvero 60 $kgCO_2eq/kWh$. Le batterie LFP, essendo prive di cobalto e nickel, presentano un'impronta ambientale lievemente inferiore, ma il loro minore contenuto energetico riduce il vantaggio in termini di GWP. Nel calcolo dell'impronta di carbonio, si assume un valore unificato di 64.5 $kgCO_2eq/kWh$ (associandolo al parametro ***BatteryProductionImpact***), trascurando eventuali leggere differenze tra le diverse tipologie di batterie. Anche nel caso di una sostituzione delle batterie LFP con le NMC, la differenza in termini di impatto ambientale risulta trascurabile rispetto al totale delle emissioni considerate.

La variabile ***TonneCarbonFootprintWithoutRepurposing*** e ***TonneCarbonFootprintWithRepurposing***, rappresentati rispettivamente dalle formule 18 e 19, rappresentano il valore di tonnellate di emissioni di CO_2eq associate alla produzione di batterie stazionarie. Il calcolo avviene moltiplicando il valore dello stock (che rappresenta la capacità energetica di batterie stazionarie) per il fattore di emissione di carbonio (diviso per 1000 per ottenere il risultato in tCO_2eq/kWh), rispettivamente secondo le seguenti formule:

$$NewStationaryBatteriesWithoutRepurposing \cdot \frac{BatteryProductionImpact}{1000} \quad (18)$$

$$NewStationaryBatteriesWithRepurposing \cdot \frac{BatteryProductionImpact}{1000} \quad (19)$$

La variabile ***TotalCarbonFootprintSaveByRepurposing***, rappresentata dalla formula 20, rappresenta la differenza tra le due impronte di carbonio, quantificando il risparmio di emissioni di tCO_2eq ottenibile attraverso politiche che incentivano il riutilizzo delle batterie dei veicoli elettrici per applicazioni stazionarie. Questo valore evidenzia l'impatto positivo del repurposing in termini di riduzione delle emissioni, evitando l'impatto negativo dell'intera filiera produttiva di nuove BESS, a partire dall'estrazione/raffinatura di materie prime fino all'assemblaggio.

$$TonneCarbonFootprintWithoutRepurposing - TonneCarbonFootprintWithRepurposing \quad (20)$$

3.2.3 Carbon footprint con riciclo

Questa sottosezione illustra la metodologia adottata per quantificare l'impronta di carbonio associata all'estrazione di materiali critici, tra cui nickel, litio, cobalto

e manganese, necessari per soddisfare la domanda di batterie per veicoli elettrici. L'analisi considera i due scenari con e senza il riciclo dei materiali, al fine di valutare l'impatto ambientale derivante dalla riduzione della necessità di estrazione grazie al riciclo delle materie prime.

Domanda di materiali critici in assenza di riciclo

Si calcola la quantità di materiali necessari per soddisfare la domanda di batterie NMC e LFP per i veicoli elettrici attraverso uno stock che accumula, fino al 2050, i kg di materiali critici richiesti. Questo approccio permette di quantificare il fabbisogno complessivo di nickel, litio, cobalto e manganese nel tempo. Successivamente, si quantifica l'impatto ambientale associato all'estrazione dei materiali critici calcolando le emissioni di CO_2eq corrispondenti. Questo viene ottenuto moltiplicando la quantità cumulata di materiali estratti per il rispettivo fattore di emissione specifico di ciascun materiale. In questo modo, è possibile stimare il contributo ambientale negativo dell'estrazione di nickel, litio, cobalto e manganese.

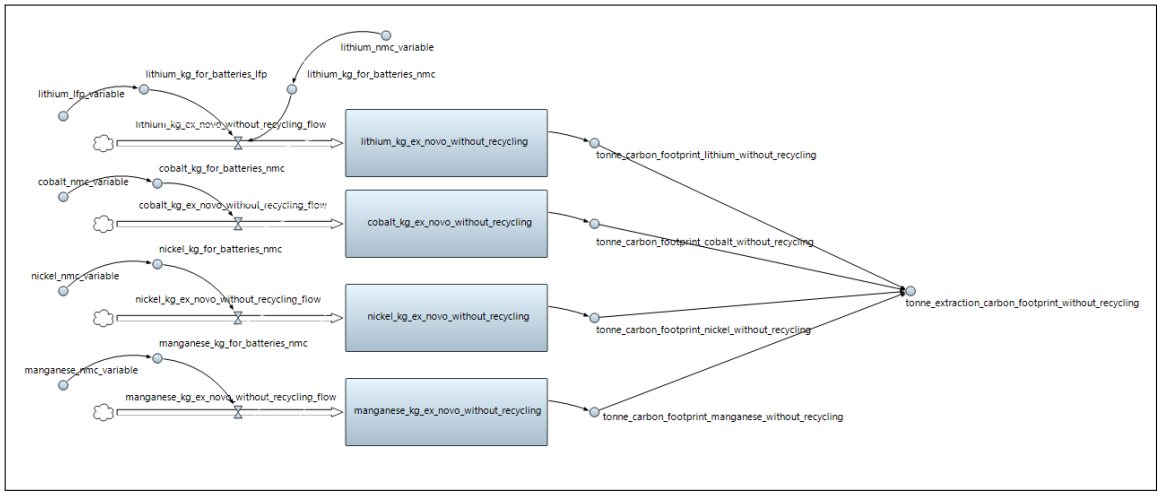


Figura 10: Carbon Footprint per l'estrazione di materiali critici senza riciclo

Ogni stock presenta un flusso in ingresso, ***MaterialKgExNovoWithoutRecyclingFlow***, che indica la domanda annuale del materiale in questione necessaria per soddisfare il mercato delle batterie per veicoli elettrici. Questo flusso è rappresentato dalla variabile ***MaterialKgforBatteriesXYZ***, che calcola la quantità di materiali richiesti annualmente in funzione della domanda annua di capacità della batteria di tipo XYZ e della rispettiva densità energetica specifica del materiale considerato nella batteria, espressa come kg/kWh, come rappresentato con la formula 21.

$$SellingBatteriesXYZ \cdot MaterialXYZVariable \tag{21}$$

In seguito, con la variabile ***TonneCarbonFootprintMaterialWithoutRecycling*** (con Material che indica lo specifico materiale che si considera), si calcolano le emis-

sioni derivanti dall'estrazione di materiali critici. Il calcolo avviene moltiplicando il valore dello stock cumulato di kg di materiali necessari per il mercato per un fattore di emissione, ovvero il parametro***MaterialCarbonFootprintImpact***, espresso in $kgCO_2eq/kg$ (diviso per 1000 per ottenere le tonnellate di carbonio) che rappresenta l'impronta di carbonio associata ai processi di estrazione e raffinazione, come rappresentato dalla formula 22.

$$MaterialKgExNovoWithoutRecycling \cdot \frac{MaterialCarbonFootprintImpact}{1000} \quad (22)$$

Nuss, Eckelman (2014) fornisce una valutazione quantitativa delle emissioni di CO_2eq associate alle fasi di estrazione e raffinazione di diversi metalli, tra cui litio, nickel, cobalto e manganese. L'analisi, condotta attraverso un approccio di Life Cycle Assessment, stima il Global Warming Potential per chilogrammo di materiale estratto, evidenziando l'impatto ambientale delle operazioni minerarie e dei processi di purificazione.

Materiale	**Global Carbon Footprint** $[kgCO_2eq/kg]$
Nickel	6.5
Manganese	1.0
Litio	7.1
Cobalto	8.3

Tabella 5: Valore parametri MaterialCarbonFootprintImpact

Infine, la variabile ***TonneExtractionCarbonFootprintWithoutRecycling*** rappresenta il totale delle emissioni di carbon footprint, in tonnellate di CO_2eq, associate all'estrazione di tutti i materiali critici analizzati necessari per soddisfare la domanda di batterie nel settore dei veicoli elettrici, nello scenario senza riciclo. Questo valore è ottenuto sommando le emissioni calcolate per ciascun materiale, fornite dalle variabili precedentemente descritte, consentendo così di quantificare l'impatto complessivo dell'estrazione delle risorse primarie.

Domanda di materiali critici con politiche di riciclo

Si analizza il caso in cui, sulla base dei risultati del modello EOL, il recupero di materiali critici attraverso il riciclo possa ridurre la domanda di nuova estrazione e raffinazione. Questo scenario presuppone un'ottimizzazione della filiera del fine vita delle batterie, in cui i materiali recuperati vengono reintrodotti direttamente nei processi produttivi, evitando così le fasi più impattanti dell'estrazione e della raffinazione. L'utilizzo di materiali riciclati offre vantaggi sia ambientali che economici. Da un lato, l'utilizzo di materiali riciclati consente di mitigare l'impatto dell'estrazione mineraria, un processo ad alta intensità energetica che contribuisce in modo significativo alle emissioni di CO_2eq e comporta rischi ecologici come la degradazione del

suolo e la contaminazione delle acque. Dall'altro, riduce la dipendenza dalle materie prime vergini, la cui disponibilità è influenzata da dinamiche geopolitiche e dalla volatilità dei mercati. La variabile ***MaterialKgNetOfRecycling*** rappresenta la

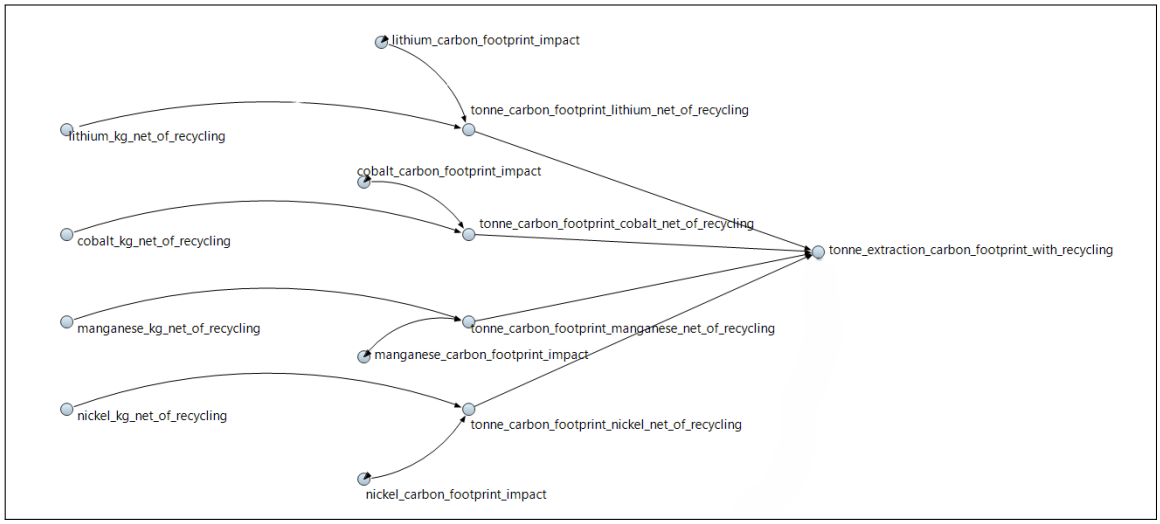


Figura 11: Carbon footprint per l'estrazione di materiali critici con il riciclo

quantità di materiali critici necessari per soddisfare la domanda, al netto della quota di materiale recuperato attraverso il riciclo nel modello EOL, come rappresentato dalla formula 23. Questo valore consente di stimare il fabbisogno effettivo di nuove materie prime, evidenziando il contributo del riciclo nella riduzione della dipendenza dall'estrazione di risorse vergini.

$$MaterialKgExNovoWithoutRecycling - MaterialXYZKg \tag{23}$$

Le variabili ***TonneCarbonFootprintMaterialNetofRecycling***, utilizzando i parametri ***MaterialCarbonFootprintImpact*** riportati nella tabella 5, calcolano le tonnellate di CO_2eq emesse in relazione alla quantità di materiali critici necessari, considerando la riduzione della domanda di estrazione dovuta al riciclo, come rappresentato in formula 24. Questo valore permette di quantificare l'impatto ambientale effettivo legato all'estrazione del materiale, tenendo conto del contributo del riciclo nel diminuire le emissioni complessive.

$$MaterialCarbonFootprintImpact \cdot MaterialKgNetOfRecycling \tag{24}$$

La variabile ***TonneExtractionCarbonFootprintWithRecycling***, come rappresentato in formula 25, quantifica l'impronta di carbonio legata all'estrazione di tutti i materiali critici necessari per soddisfare la domanda di batterie di veicoli elettrici, tenendo conto della riduzione della quantità di materiali da estrarre grazie al recupero di materiali riciclati, che vengono reintrodotti nel ciclo produttivo in un'ottica di economia circolare.

$$\sum_{i=1}^{4} TonneCarbonFootprintMaterial_i NetOfRecycling \tag{25}$$

Nel modello è presente la variabile ***TotalTonneExtractionCarbonFootprintSaveByRecycling*** che registra la quota di carbon footprint che si evita andando ad effetturare le operazioni di riciclo, come rappresentato in formula 26.

$$TonneExtractionCarbonFootprintWithoutRecycling + \\ - TonneExtractionCarbonFootprintWithRecycling \tag{26}$$

3.2.4 Calcolo carbon footprint complessiva

In questa sottosezione, si procede con il calcolo totale dell'impronta di carbonio, considerando la produzione di batterie per usi stazionari e l'estrazione di materie prime critiche vergini per le EV batteries.

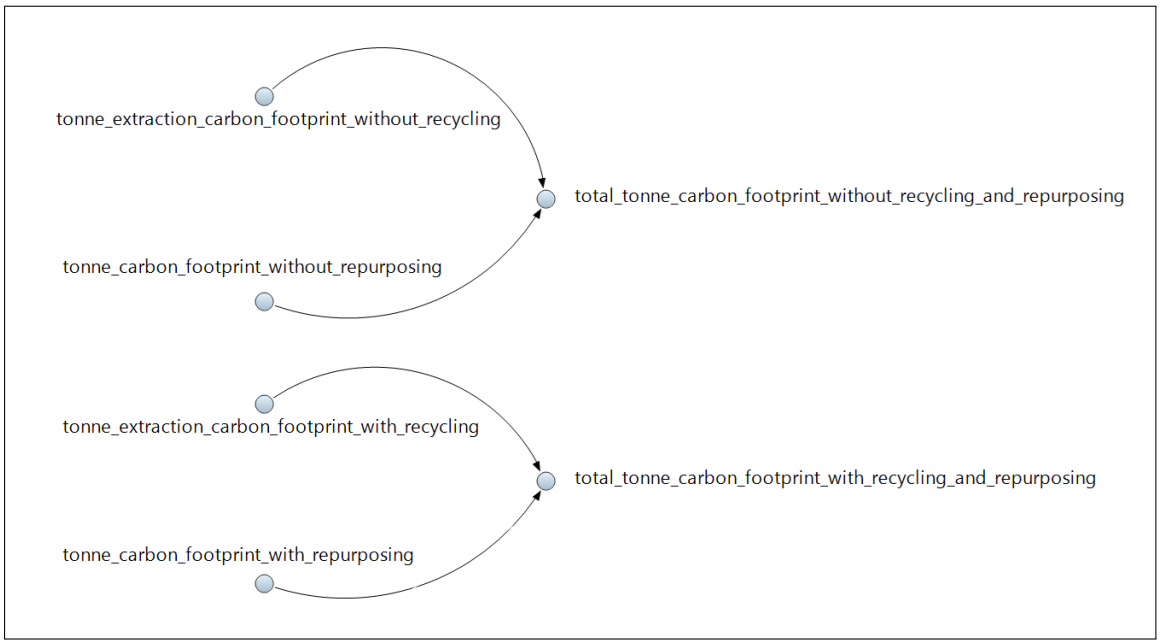


Figura 12: Calcolo carbon footprint con e senza riciclo e repurposing

Sono presenti due variabili fondamentali, che rappresentano l'impronta di carbonio di entrambi i settori nel caso si faccia sia riciclo che repurposing e quella in cui si decide di non farli.

La variabile ***TotalTonneCarbonFootprintWithoutRecyclingandRepurposing***, rappresentata in formula 27, va a considerare le tonnellate di carbonio che si generano senza il repurposing (**TonneCarbonFootprintWithoutRepurposing**), e quelle che si generano senza riciclo (**TonneExtractionCarbonFootprintWithoutRecycling**).

$$TonneExtractionCarbonFootprintWithoutRecycling+ \\ +TonneCarbonFootprintWithoutRepurposing \quad (27)$$

La variabile ***TotalTonneCarbonFootprintWithRecyclingandRepurposing***, rappresentata con la formula 28, va a considerare le tonnellate di carbonio che si generano con le politiche di repurposing (**TonneCarbonFootprintWithRepurposing**) e quelle che si generano con il riciclo (**TonneExtractionCarbonFootprintWithRecycling**).

$$TonneExtractionCarbonFootprintWithRecycling+ \\ +TonneCarbonFootprintWithRepurposing \quad (28)$$

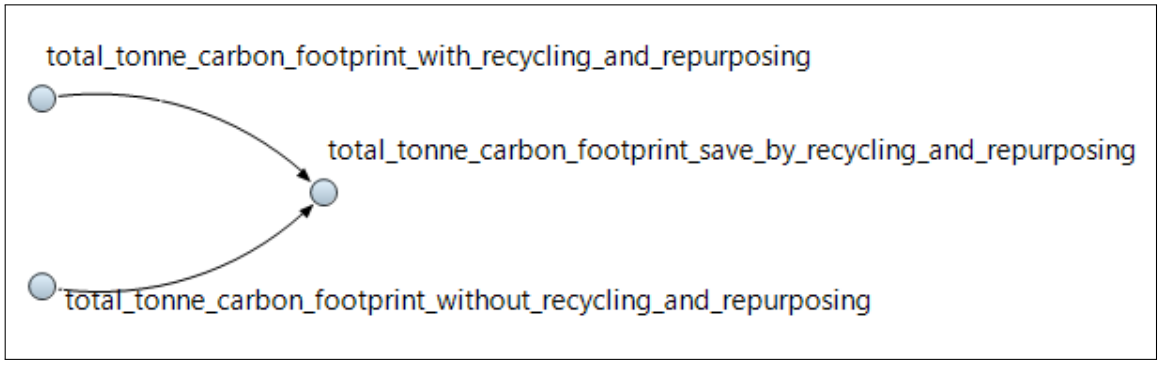


Figura 13: Calcolo risparmio complessivo carbon footprint

Con la variabile ***TotalTonneCarbonFootprintSaveByRecyclingAndRepurposing*** è possibile calcolare il risparmio complessivo di CO_2eq che si genera effettuando le operazioni di riciclo e reporposing, sottreando a TotalTonneCarbonFootprintWithoutRecyclingandRepurposing la variabile TotalTonneCarbonFootprintWithRecyclingandRepurposing.

4 Risultati

La simulazione permette di quantificare il trade-off tra le due principali strategie circolari adottabili: il one-loop, che privilegia il riciclo immediato per massimizzare il recupero di materiali critici, e il two-loop, che prevede una fase intermedia di riutilizzo in applicazioni stazionarie prima del riciclo finale.

L'esposizione dei risultati è articolata in due sezioni principali. La prima parte è dedicata all'analisi degli scenari principali, ottenuti combinando due variabili fondamentali, ovvero la crescia della quota di mercato dei veicoli elettrici e la strategia di gestione dell'EOL. I tre scenari di mercato considerati sono Business As Usual (BAU), Net Zero e ICE Ban, mentre per la gestione del fine vita sono analizzate le alternative one-loop e two-loop. I risultati si focalizzano su alcuni indicatori chiave, tra cui l'impronta di carbonio che si ottiene nella strategia di gestione adottata, la quantità di materiali critici recuperati e le quote di materiali riciclati che si possono utilizzare per produrre nuove batterie.

La seconda parte è dedicata ad un'analisi di sensitività, attraverso la variazione controllata di alcuni parametri rilevanti. Per quest'analisi, si utilizza lo scenario BAU, poiché rappresenta una crescita moderata del mercato e offre un riferimento stabile per isolare gli effetti delle variabili testate. A partire da questo scenario di riferimento, vengono valutate le variazioni di tre variabili chiave:

- L'incidenza dei ritardi logistici e di processo, analizzando il caso ideale di assenza di delay rispetto a uno scenario più realistico che considera i tempi di disassemblaggio, testing e costruzione di nuovi impianti di riciclo. Si utilizza lo scenario one-loop, permettendo di concentrarsi sugli effetti delle tempistiche operative senza considerare ulteriori ritardi dovuti alle vite medie delle batterie in seconda vita introdotta dal repurposing. Infatti, la vita media delle batterie nel First Use sarà l'unico delay considerato, non essendo un ritardo logistico o di processo. L'analisi dei ritardi aiuta a comprendere quanto sia cruciale l'ottimizzazione della logistica per migliorare il recupero dei materiali critici.

- L'impatto della progressiva sostituzione delle batterie NMC con LFP si ipotizza nulla, poichè si vuole cercare di massimizzare la quantità di materiali critici da riciclare. L'analisi si concentra sulla capacità del sistema di superare le quote minime di materiali riciclati, con lo scenario one-loop che viene utilizzato per isolare l'effetto di sostituzione, consentendo una valutazione diretta delle variazioni nei flussi di materiali senza interferenze dovute al riutilizzo.

- L'incidenza della qualità delle batterie a fine vita, espressa in termini di SoH e relativa probabilità di accadimento. Per comprendere come la percentuale di batterie con un alto SoH possa influenzare la strategia di seconda vita, si analizza un worst case scenario utilizzando la strategia two-loop. Questo aiuta a capire come si comporta il repurposing anche in condizioni meno favorevoli,

in cui nel sistema arriva un numero significativamente inferiore di batterie con un alto SoH.

In tutti gli scenari analizzati, la crescita della domanda di batterie di accumulo stazionario sarà rappresentata attraverso il fitting di una funzione logistica, ottenuta minimizzando l'errore quadratico medio (MSE). Questo approccio è stato scelto in quanto fornisce una rappresentazione più realistica dell'evoluzione del mercato, considerando non solo la crescita iniziale favorita da incentivi e riduzione dei costi, ma anche la successiva fase di saturazione dovuta a vincoli infrastrutturali e normativi. A differenza di una crescita lineare o logaritmica, che rispettivamente non prevede limiti superiori o non tiene conto di un valore massimo asintotico, la funzione logistica permette di modellare in modo più accurato i fattori di rallentamento del mercato, legati alla disponibilità di spazio, alle regolamentazioni edilizie e alle limitazioni strutturali.

I risultati vengono esposti tramite una rappresentazione grafica e con delle tabelle che riassumono i risultati principali ogni 5 anni. In ogni scenario vengono trattati, in ordine: la carbon footprint relativa al riciclo, al repurposing e ad entrambe le strategie di gestione; la quantità di materiali critici riciclati insieme alle quote di riciclo raggiunte per ciascun materiale; il numero di batterie in repurposing (solo per il two-loop) ed infine le capacità energetiche del modello End-of-Life. L'approccio adottato permette di fornire un quadro chiaro e strutturato dell'impatto delle strategie di gestione dell'End-of-Life delle EV batteries, evidenziando come le scelte di politiche europee possano incidere sulle prestazioni ambientali nel lungo periodo.

4.1 Scenario 1: BAU + one-loop

Lo scenario BAU + one-loop prevede un'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici caratterizzata da una crescita moderata, in assenza di interventi normativi accelerati. Questo scenario si basa su proiezioni di crescita del mercato in linea con tendenze storiche e previsioni conservative. Nella gestione del fine vita, lo scenario one-loop prevede che tutte le batterie EV giunte a fine vita vengano direttamente riciclate, senza passare per una fase di riutilizzo. Questa configurazione mira a massimizzare il recupero di materiali critici, come litio, cobalto e nickel, attraverso processi di riciclo avanzati, seguendo un modello di economia circolare chiusa.

Il focus di questo scenario è valutare l'impatto di una crescita moderata dei EV, combinata con una strategia di riciclo diretto. L'assenza di una fase di riutilizzo permette di analizzare la velocità di reimmissione dei materiali delle batterie nella filiera produttiva, evidenziando i vantaggi e le limitazioni di un modello completamente orientato al riciclo.

Grafici Carbon Footprint

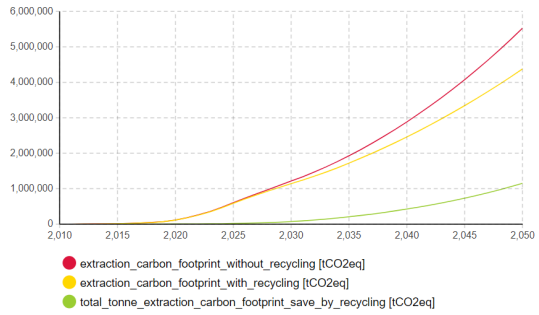


Figura 14: Scenario 1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

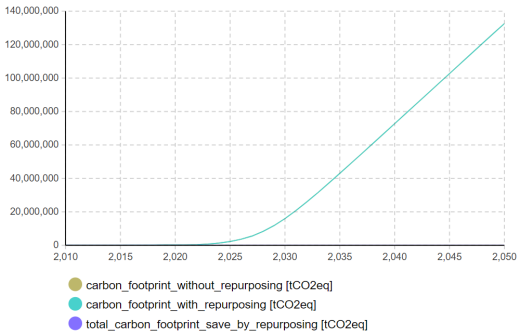


Figura 15: Scenario 1: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2

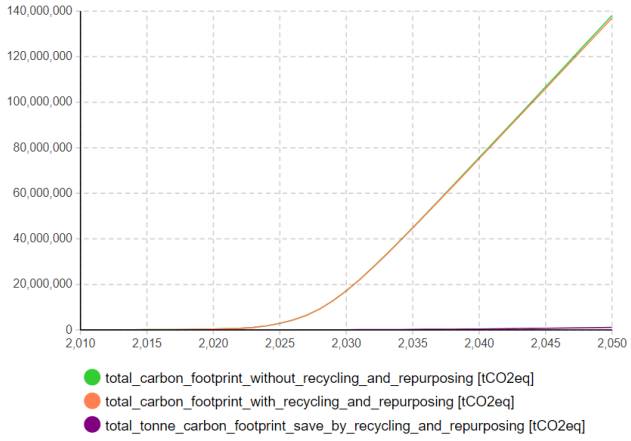


Figura 16: Scenario 1: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	12,461.30	1,625.21
2020	118,490.11	113,589.38	4,900.73
2025	605,743.92	587,886.01	17,857.90
2030	1,215,058.14	1,142,466.28	72,591.86
2035	1,927,210.65	1,720,009.20	207,201.45
2040	2,883,949.40	2,458,821.06	425,128.34
2045	4,075,979.69	3,343,897.44	732,082.25
2050	5,527,965.08	4,378,030.56	1,149,934.52

Tabella 6: Scenario 1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORepurposing [tCO_2eq]	CFW/Repurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRepurposing [tCO_2eq]
2010	0	0	0
2015	83,546.56	83,546.56	0
2020	269,706.75	269,706.75	0
2025	2,292,429.98	2,292,429.98	0
2030	15,992,429.98	15,992,429.98	0
2035	43,040,262.54	43,040,262.54	0
2040	72,763,558.08	72,763,558.08	0
2045	102,694,786.83	102,694,786.83	0
2050	132,644,737.92	132,644,737.92	0

Tabella 7: Scenario 1: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	96,007.86	1,625.21
2020	388,196.86	383,296.13	4,900.73
2025	2,898,173.89	2,880,315.99	17,857.90
2030	17,206,171.15	17,133,579.29	72,591.86
2035	44,969,615.61	44,762,414.15	207,201.45
2040	75,644,482.08	75,219,353.74	425,128.34
2045	106,771,085.44	106,039,003.19	732,082.25
2050	138,172,819.37	137,022,884.85	1,149,934.52

Tabella 8: Scenario 1: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità materiali critici, quote di riciclo

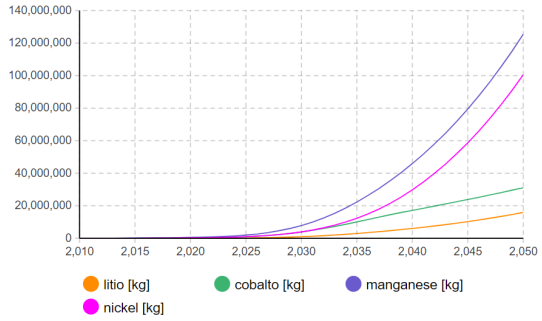


Figura 17: Scenario 1: Kg di materiali critici

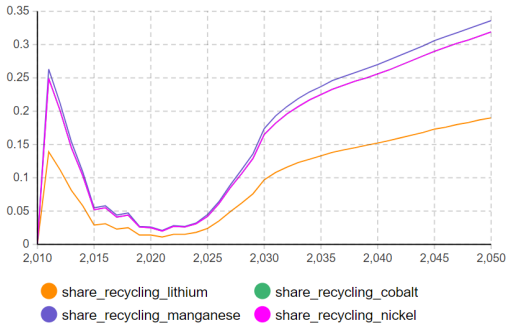


Figura 18: Scenario 1: Quote di riciclo

Anno	Litio [kg]	Manganese [kg]	Cobalto [kg]	Nickel [kg]
2010	0	0	0	0
2015	17,797.87	179,517.47	89,343.01	88,889.49
2020	54,678.86	540,465.51	268,981.15	267,615.77
2025	219,339.54	1,952,000.00	971,643.11	966,710.91
2030	996,865.54	7,843,000.00	3,864,000.00	3,939,000.00
2035	3,508,000.00	26,320,000.00	11,550,000.00	14,980,000.00
2040	6,048,000.00	45,930,000.00	17,180,000.00	29,790,000.00
2045	10,240,000.00	79,500,000.00	23,850,000.00	58,750,000.00
2050	15,890,000.00	125,500,000.00	31,090,000.00	100,600,000.00

Tabella 9: Scenario 1: Kg di materiali critici, ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	Nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	2.90	5.20	5.50	5.20
2020	1.40	2.50	2.60	2.50
2025	2.40	4.20	4.50	4.20
2031	10.80	18.20	19.30	18.20
2036	13.80	23.30	24.60	23.30
2040	15.20	25.60	27.00	25.60
2045	17.30	29.00	30.60	29.00
2050	19.00	31.90	33.60	31.90

Tabella 10: Scenario 1: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

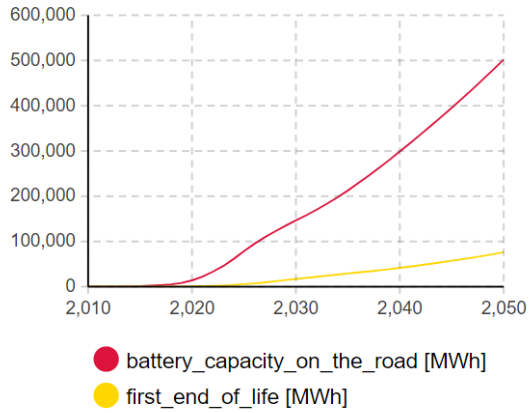


Figura 19: Scenario 1: EVBC in First use

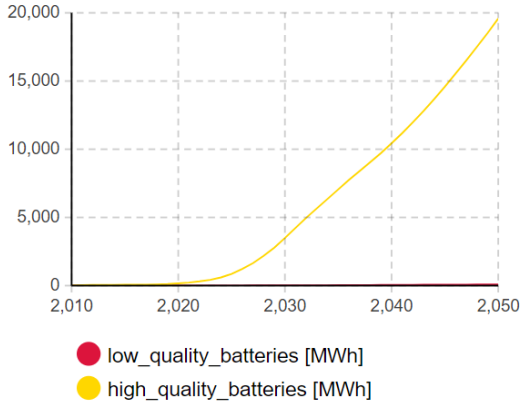


Figura 20: Scenario 1: EVBC High and Low quality

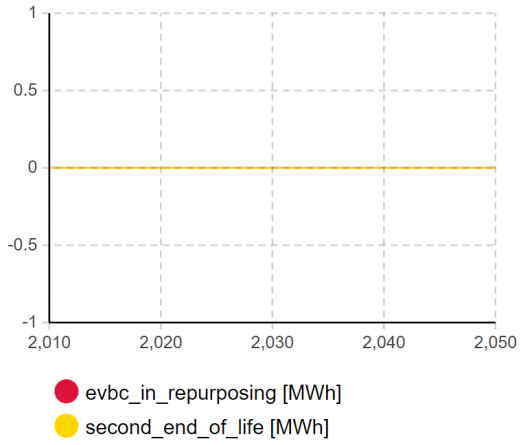


Figura 21: Scenario 1: EVBC in Repurposing

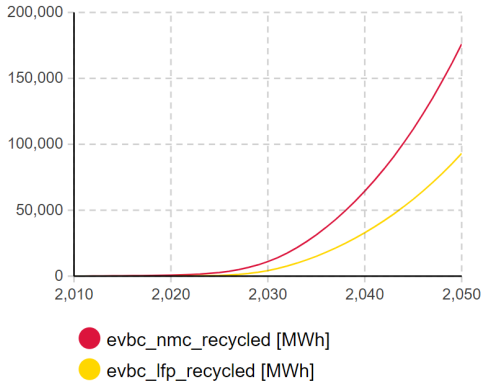


Figura 22: Scenario 1: EVBC in Recycling

4.2 Scenario 2: BAU + two-loop

Lo scenario BAU + two-loop prevede un'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici caratterizzata da una crescita moderata, in assenza di interventi normativi accelerati. Questo scenario si basa su proiezioni di crescita del mercato in linea con tendenze storiche e previsioni conservative. Nella gestione del fine vita, lo scenario two-loop prevede che le batterie EV vengano inizialmente riutilizzate in applicazioni stazionarie prima di essere riciclate. Questo approccio consente di estendere la vita utile delle batterie, riducendo temporaneamente l'offerta di materiali vergini riciclati. Il riciclo avviene solo dopo il termine della seconda vita delle batterie, garantendo comunque il recupero dei materiali critici, come litio, cobalto e nickel.

Lo scopo di questo scenario è valutare l'impatto di una strategia combinata di riutilizzo e riciclo. L'analisi si concentra su come l'allungamento della vita utile delle batterie influisca sull'impronta di carbonio e sulla disponibilità di materiali riciclati nel breve e lungo termine, consentendo un confronto dei benefici ambientali e strategici con il modello one-loop. In questo modo, emerge chiaramente il trade-off tra la disponibilità immediata di materie prime provenienti da riciclo e la riduzione della domanda di nuove BESS ottenibile attraverso il riutilizzo.

Carbon footprint

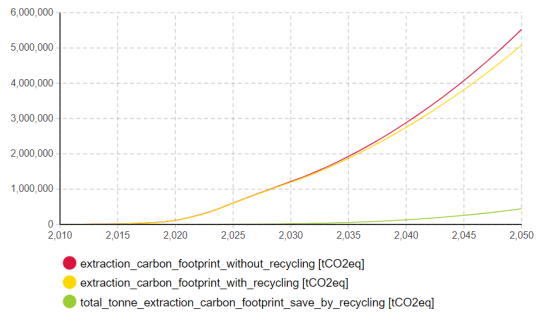


Figura 23: Scenario 2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

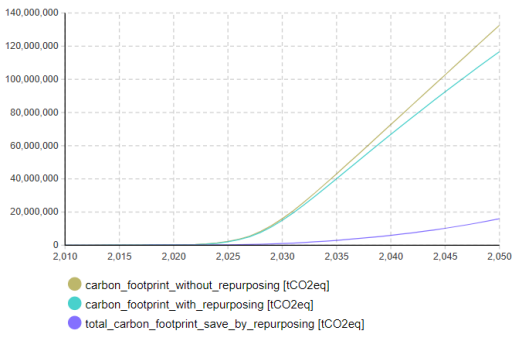


Figura 24: Scenario 2: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2

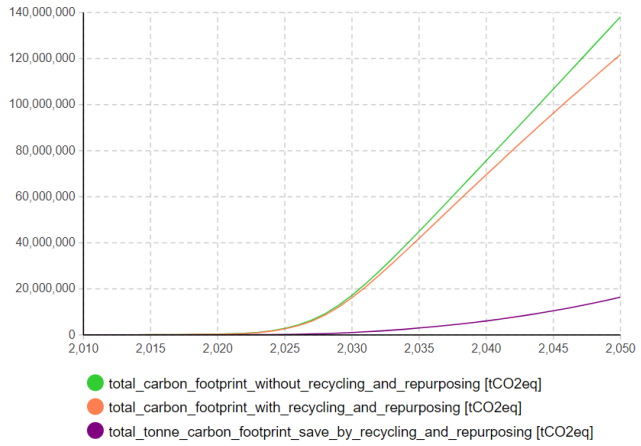


Figura 25: Scenario 2: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	13,759.83	326.68
2020	118,490.11	117,220.25	1,269.86
2025	605,743.92	601,085.60	4,658.32
2030	1,215,058.14	1,197,021.96	18,036.18
2035	1,927,210.65	1,871,941.43	55,269.22
2040	2,883,949.40	2,752,607.84	131,341.56
2045	4,075,979.69	3,818,410.44	257,569.25
2050	5,527,965.08	5,084,410.98	443,554.10

Tabella 11: Scenario 2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORepurposing [tCO_2eq]	CFW/Repurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRepurposing [tCO_2eq]
2010	0	0	0
2015	83,546.56	66,341.64	17,204.91
2020	269,706.75	217,493.89	52,212.86
2025	2,292,429.98	2,069,094.49	223,335.48
2030	15,991,113.01	14,972,655.42	1,018,457.60
2035	43,042,404.96	40,102,565.82	2,939,839.14
2040	72,760,532.68	66,805,348.82	5,955,183.85
2045	102,695,105.75	92,487,882.47	10,207,223.28
2050	132,644,854.29	116,651,907.58	15,992,946.71

Tabella 12: Scenario 2: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	80,101.48	17,531.59
2020	388,196.86	334,714.17	53,482.69
2025	2,898,173.89	2,670,180.27	227,993.62
2030	17,206,171.15	16,169,678.10	1,036,493.05
2035	44,969,615.61	41,974,508.67	2,995,106.94
2040	75,644,482.08	69,557,958.74	6,086,523.34
2045	106,771,085.44	96,306,295.98	10,464,789.46
2050	138,172,819.37	121,736,327.51	16,436,491.86

Tabella 13: Scenario 2: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità materiali critici, quote di riciclo e numero di batterie in repurposing

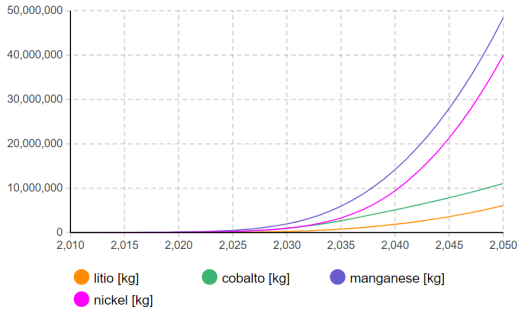


Figura 26: Scenario 2: Kg di materiali critici

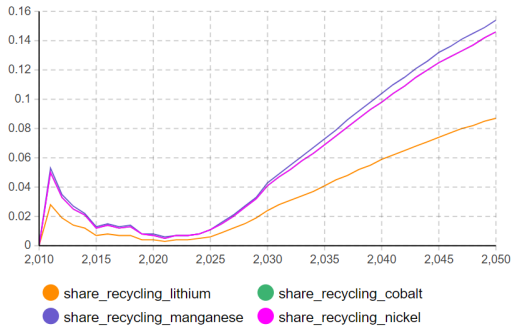


Figura 27: Scenario 2: Quote di riciclo

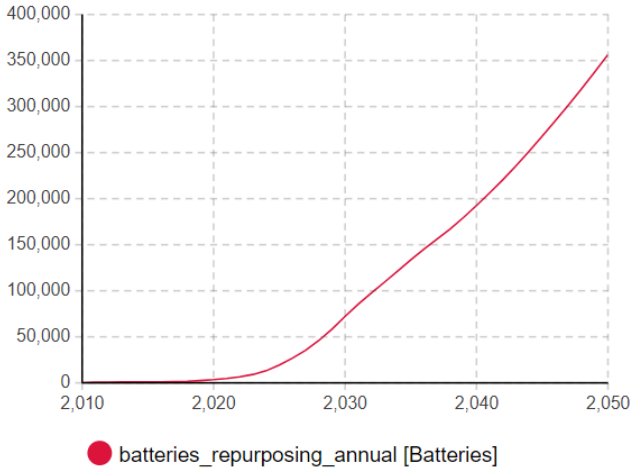


Figura 28: Scenario 2: Batterie in uso stazionario annualmente

Anno	Litio [kg]	Manganese [kg]	Cobalto [kg]	Nickel [kg]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	3,576.40	36,085.11	17,958.99	17,867.83
2020	14,200.15	140,016.59	69,684.05	69,330.32
2025	57,217.24	509,272.62	253,456.94	252,170.36
2030	247,291.05	1,949,000.00	960,258.01	978,640.90
2035	793,246.92	5,948,000.00	2,671,000.00	3,311,000.00
2040	1,866,000.00	14,200,000.00	5,129,000.00	9,434,000.00
2045	3,592,000.00	28,000,000.00	7,865,000.00	21,350,000.00
2050	6,103,000.00	48,460,000.00	11,080,000.00	39,970,000.00

Tabella 14: Scenario 2: Kg di materiali critici, ogni 5 anni

Anno	**Litio [%]**	**Cobalto [%]**	**Manganese [%]**	**Nickel [%]**
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.70	1.20	1.30	1.20
2020	0.40	0.70	0.80	0.70
2025	0.60	1.10	1.10	1.10
2031	2.80	4.70	4.90	4.70
2036	4.50	7.50	7.90	7.50
2040	5.90	9.80	10.40	9.80
2045	7.40	12.50	13.20	12.50
2050	8.70	14.60	15.40	14.60

Tabella 15: Scenario 2: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni

Anno	Batterie in repurposing
2010	0.00
2015	1,011.07
2020	3,482.98
2025	19,340.02
2030	72,263.73
2035	133,614.30
2040	192,543.43
2045	267,894.84
2050	356,463.02

Tabella 16: Scenario 2: Numero di EV batteries convertite in applicazioni stazionarie annualmente, ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

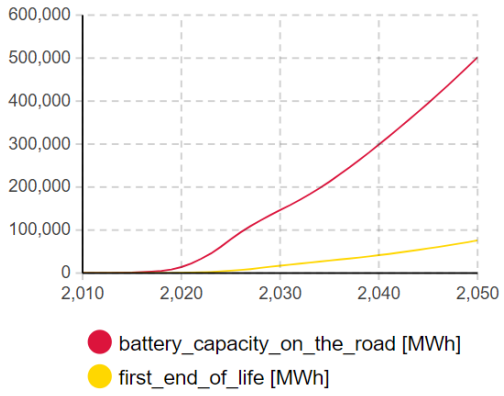


Figura 29: Scenario 2: EVBC in First use

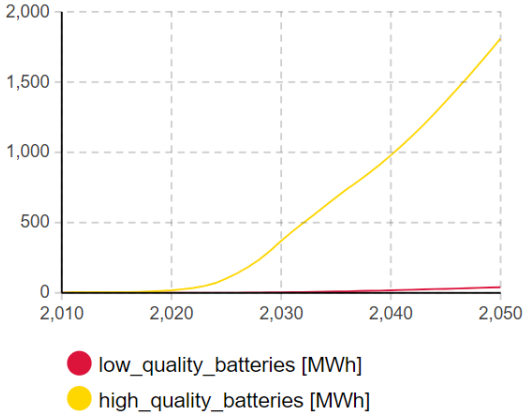


Figura 30: Scenario 2: EVBC High and Low quality

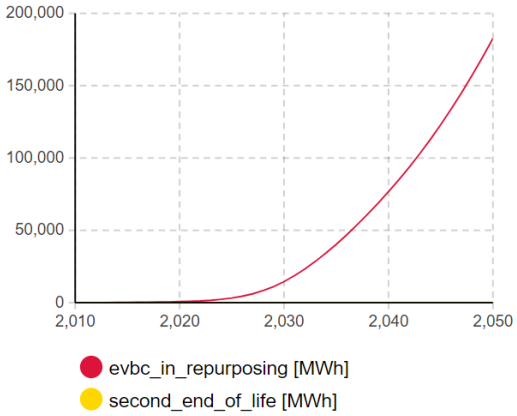


Figura 31: Scenario 2: EVBC in Repurposing

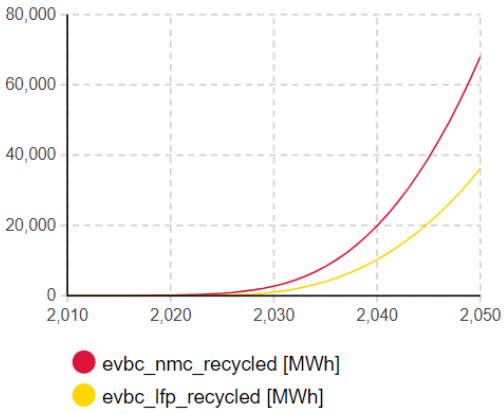


Figura 32: Scenario 2: EVBC in Recyclying

4.3 Scenario 3: NET ZERO + one-loop

Lo scenario Net Zero + one-loop prevede un'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici in cui la transizione verso l'elettrificazione è accelerata per rispettare gli obiettivi di decarbonizzazione. L'adozione degli EV cresce rapidamente, sostenuta da politiche di incentivo e da una progressiva riduzione delle vendite di veicoli a combustione interna. Nella gestione del fine vita, lo scenario one-loop prevede che tutte le batterie EV giunte a fine vita vengano direttamente riciclate senza passare per una fase di riutilizzo. L'obiettivo è massimizzare il recupero di materiali critici come litio, cobalto e nickel attraverso processi di riciclo, garantendo un flusso costante di materie prime secondarie per la produzione di nuove batterie.

Questo scenario consente di valutare l'impatto di una rapida crescita del mercato EV combinata con una strategia di riciclo diretto. L'assenza di una fase di riutilizzo accelera il rientro dei materiali nel ciclo produttivo, ma riduce la possibilità di prolungare la vita utile delle batterie. L'analisi evidenzia i vantaggi e le limitazioni di un modello completamente orientato al riciclo in un contesto di forte aumento della domanda di batterie.

Carbon footprint

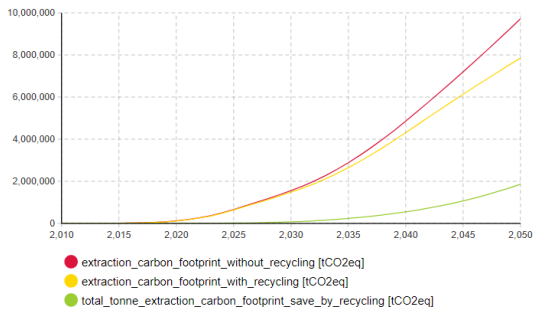


Figura 33: Scenario 3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

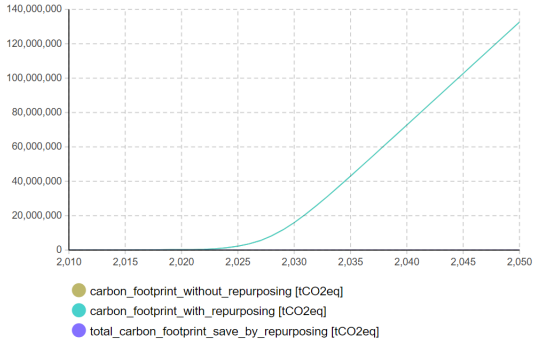


Figura 34: Scenario 3: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2

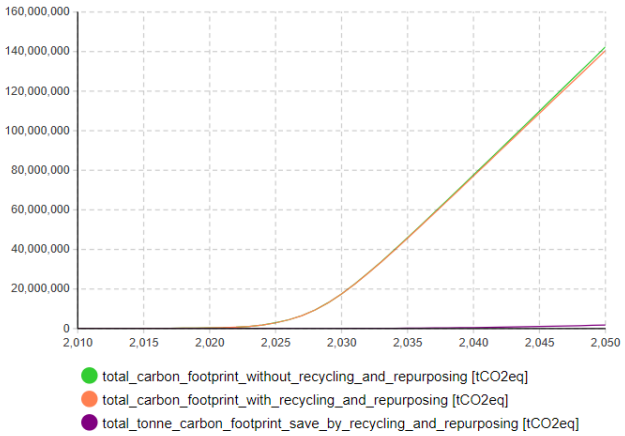


Figura 35: Scenario 3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	12,461.30	1,625.21
2020	118,490.11	113,589.38	4,900.73
2025	658,005.58	640,143.55	17,862.03
2030	1,557,551.84	1,482,561.56	74,990.28
2035	2,884,305.40	2,648,121.04	236,184.36
2040	4,854,086.48	4,307,124.98	546,961.50
2045	7,195,282.54	6,127,699.20	1,067,583.35
2050	9,710,793.62	7,853,136.94	1,857,656.68

Tabella 17: Scenario 3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, saving di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/Orepurposing [tCO_2eq]	CFW/repurposing [tCO_2eq]	CFsavebyRepurposing [tCO_2eq]
2010	0	0	0
2015	83,546.56	83,546.56	0
2020	269,706.75	269,706.75	0
2025	2,292,252.43	2,292,252.43	0
2030	15,989,252.43	15,989,252.43	0
2035	43,039,252.43	43,039,252.43	0
2040	72,760,532.68	72,760,532.68	0
2045	102,690,532.68	102,690,532.68	0
2050	132,644,737.92	132,644,737.92	0

Tabella 18: Scenario 3: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	96,007.86	1,625.21
2020	388,196.86	383,296.13	4,900.73
2025	2,950,435.55	2,932,573.52	17,862.03
2030	17,548,664.86	17,473,674.57	74,990.28
2035	45,926,710.35	45,690,525.99	236,184.36
2040	77,614,619.16	77,067,657.66	546,961.50
2045	109,890,388.30	108,822,804.95	1,067,583.35
2050	142,355,647.91	140,497,991.23	1,857,656.68

Tabella 19: Scenario 3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità materiali critici, quote di riciclo

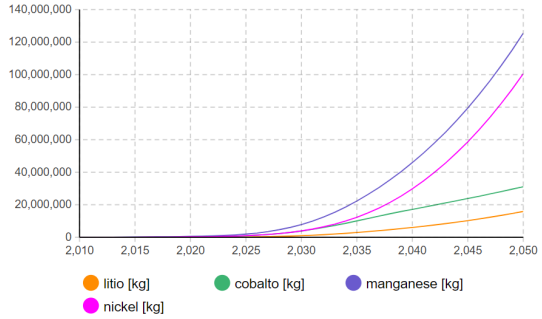


Figura 36: Scenario 3: Kg di materiali critici

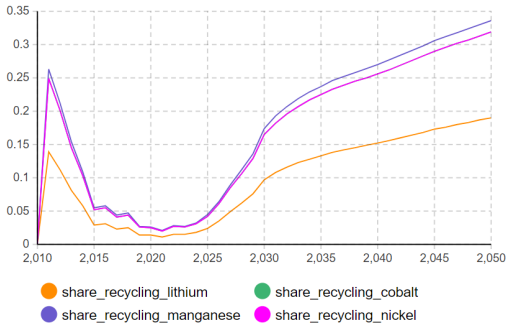


Figura 37: Scenario 3: Quote di riciclo

Anno	Lithium [kg]	Manganese [kg]	Cobalt [kg]	Nickel [kg]
2010	0	0	0	0
2015	17,797.87	179,517.47	89,343.01	88,889.49
2020	54,678.89	540,465.78	268,981.29	267,615.90
2025	219,394.28	1,953,000.00	971,867.97	966,934.63
2030	1,032,000.00	8,101,000.00	3,990,000.00	4,070,000.00
2035	3,396,000.00	25,410,000.00	11,400,000.00	14,160,000.00
2040	7,779,000.00	59,110,000.00	21,460,000.00	39,150,000.00
2045	14,900,000.00	116,100,000.00	32,740,000.00	88,310,000.00
2050	25,560,000.00	202,900,000.00	46,410,000.00	167,400,000.00

Tabella 20: Scenario 3: Kg di materiali critici, ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	Nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	2.90	5.20	5.50	5.20
2020	1.40	2.50	2.60	2.50
2025	1.90	3.30	3.50	3.30
2031	6.90	11.70	12.40	11.70
2036	9.10	15.40	16.30	15.40
2040	11.30	18.90	20.00	18.90
2045	16.90	28.40	30.00	28.40
2050	22.50	37.60	39.70	37.60

Tabella 21: Scenario 3: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

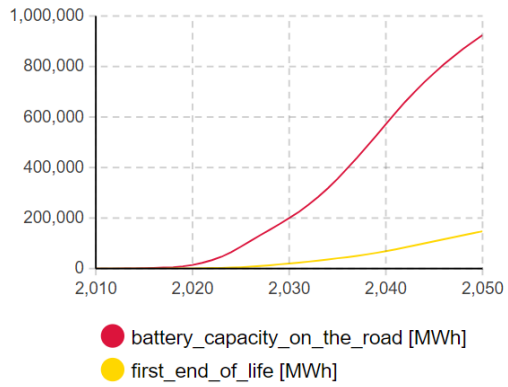


Figura 38: Scenario 3: EVBC in First use

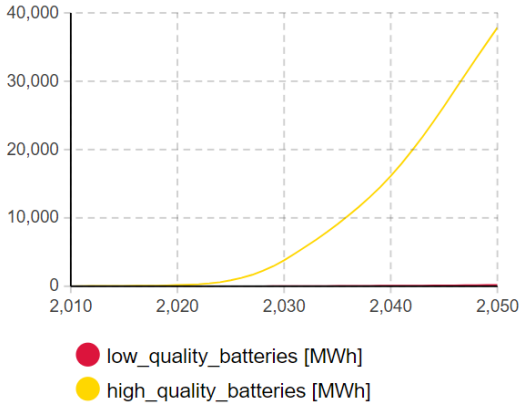


Figura 39: Scenario 3: EVBC High and Low quality

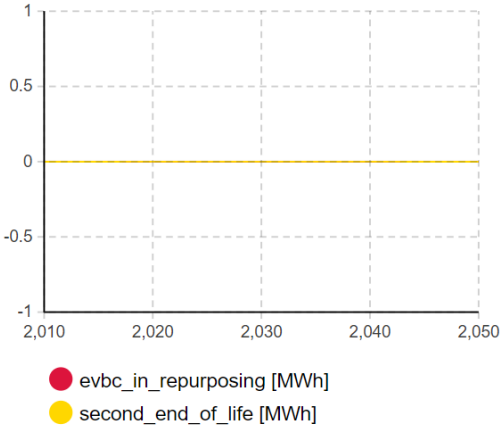


Figura 40: Scenario 3: EVBC in Repurposing

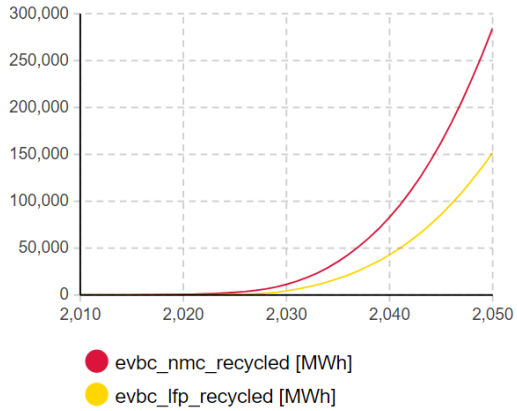


Figura 41: Scenario 3: EVBC in Recyclying

4.4 Scenario 4: NET ZERO + two-loop

Lo scenario Net Zero + two-loop prevede un'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici caratterizzata da una transizione accelerata per rispettare gli obiettivi di decarbonizzazione. L'adozione degli EV cresce rapidamente, sostenuta da politiche di incentivo e da una progressiva riduzione delle vendite di veicoli a combustione interna. Nella gestione del fine vita, lo scenario two-loop prevede che le batterie EV vengano inizialmente riutilizzate in applicazioni stazionarie prima di essere riciclate. Questo approccio consente di estendere la vita utile delle batterie, riducendo temporaneamente l'offerta di materiali vergini riciclati. Il riciclo avviene solo dopo il termine della seconda vita delle batterie, garantendo comunque il recupero di materiali critici come litio, cobalto e nickel.

Questo scenario permette di analizzare gli effetti combinati di una crescita accelerata del mercato EV e di una strategia che privilegia il riutilizzo prima del riciclo. L'analisi si concentra su come l'allungamento della vita utile delle batterie influisca sull'impronta di carbonio e sulla disponibilità di materiali riciclati nel breve e lungo termine, consentendo un confronto dei benefici ambientali e strategici con il modello one-loop. In questo modo, emerge chiaramente il trade-off tra la disponibilità immediata di materie prime provenienti da riciclo e la riduzione della domanda di nuove BESS ottenibile attraverso il riutilizzo.

Carbon footprint

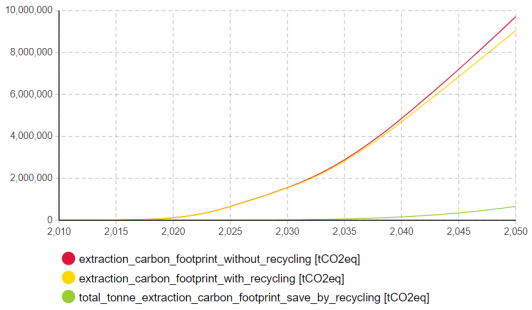


Figura 42: Scenario 4: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

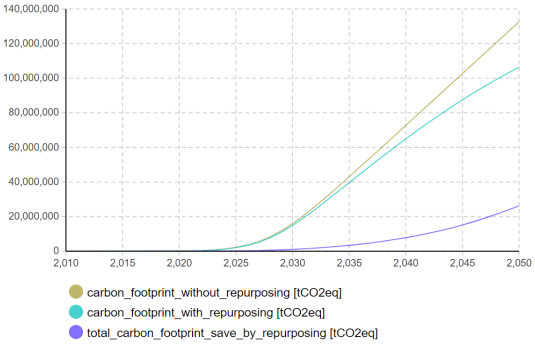


Figura 43: Scenario 4: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2

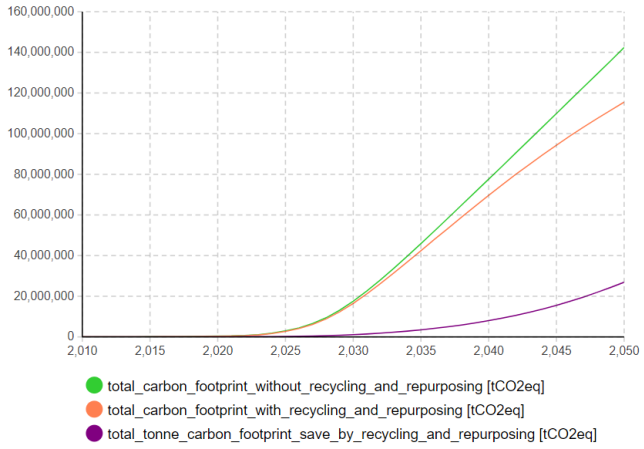


Figura 44: Scenario 4: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	13,759.83	326.68
2020	118,490.11	117,220.25	1,269.86
2025	658,005.58	653,345.77	4,659.81
2030	1,557,551.84	1,538,972.42	18,579.43
2035	2,884,305.40	2,822,768.80	61,536.60
2040	4,854,086.48	4,693,244.09	160,842.39
2045	7,195,282.54	6,845,399.67	349,882.87
2050	9,710,793.62	9,046,534.91	664,258.72

Tabella 22: Scenario 4: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/Orepurposing [tCO_2eq]	CFW/repurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRepurposing [tCO_2eq]
2010	0	0	0
2015	83,546.56	66,341.64	17,204.91
2020	269,706.75	217,493.89	52,212.86
2025	2,292,429.98	2,068,994.46	223,435.52
2030	15,991,113.01	14,927,922.62	1,063,190.40
2035	43,042,404.96	39,630,013.08	3,412,391.88
2040	72,760,532.68	64,936,064.98	7,824,467.69
2045	102,695,105.75	87,500,421.47	15,194,684.28
2050	132,644,854.29	106,404,437.95	26,240,416.34

Tabella 23: Scenario 4: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	80,101.48	17,531.59
2020	388,196.86	334,714.14	53,482.72
2025	2,950,435.55	2,722,340.23	228,095.33
2030	17,548,664.86	16,466,895.04	1,081,769.82
2035	45,926,710.35	42,452,781.87	3,473,928.48
2040	77,614,619.16	69,629,309.07	7,985,310.08
2045	109,890,388.30	94,345,821.14	15,544,567.16
2050	142,355,647.91	115,450,972.86	26,904,675.06

Tabella 24: Scenario 4: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità materiali critici, quote di riciclo e numero di batterie in repurposing

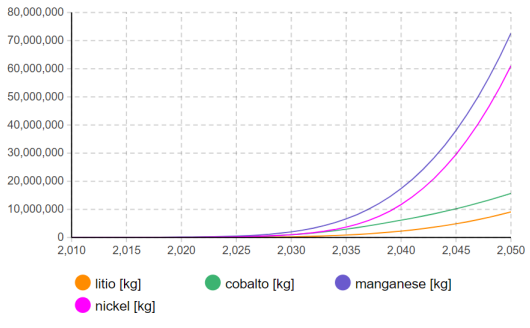


Figura 45: Scenario 4: Kg di materiali critici

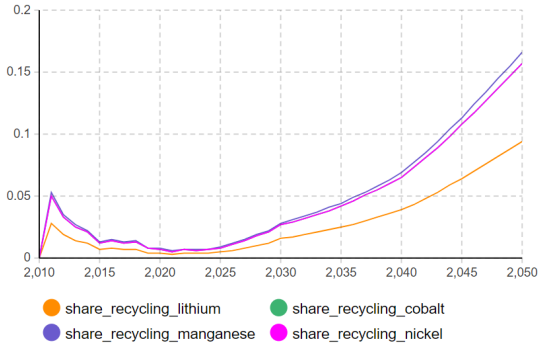


Figura 46: Scenario 4: Quote di riciclo

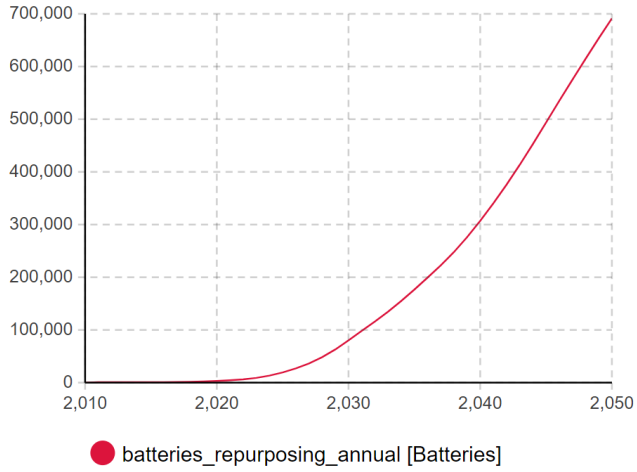


Figura 47: Scenario 4: Batterie in uso stazionario annualmente

Anno	Litio [kg]	Manganese [kg]	Cobalto [kg]	Nickel [kg]
2010	0	0	0	0
2015	3,576.40	36,085.12	17,958.99	17,867.83
2020	14,200.16	140,016.67	69,684.09	69,330.36
2025	57,236.90	509,434.98	253,537.75	252,250.75
2030	255,153.70	2,007,000.00	988,790.61	1,008,000.00
2035	884,869.97	6,621,000.00	2,958,000.00	3,705,000.00
2040	2,690,000.00	20,600,000.00	6,863,000.00	14,400,000.00
2045	5,571,000.00	43,760,000.00	11,200,000.00	34,680,000.00
2050	9,112,000.00	72,650,000.00	15,670,000.00	61,060,000.00

Tabella 25: Scenario 4: Kg di materiali critici, ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	Nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.70	1.20	1.30	1.20
2020	0.40	0.70	0.80	0.70
2025	0.50	0.80	0.90	0.80
2031	1.70	2.90	3.10	2.90
2036	2.70	4.60	4.90	4.60
2040	3.90	6.00	6.50	6.00
2045	7.00	11.70	12.40	11.70
2050	9.40	15.70	16.60	15.70

Tabella 26: Scenario 4: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni

Anno	Batterie in repurposing [unità]
2010	0
2015	1,011.07
2020	3,482.98
2025	19,402.55
2030	80,480.03
2035	176,756.42
2040	307,090.31
2045	493,655.80
2050	691,373.01

Tabella 27: Scenario 4: Numero di EV batteries convertite in applicazioni stazionarie annualmente, ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

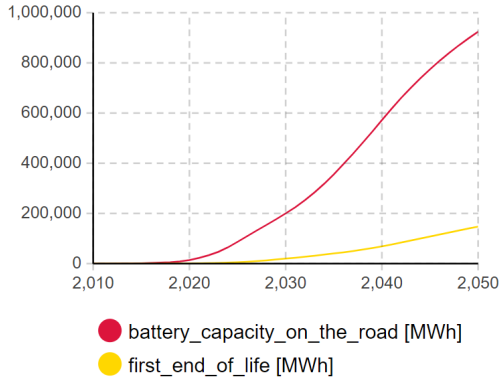


Figura 48: Scenario 4: EVBC in First use

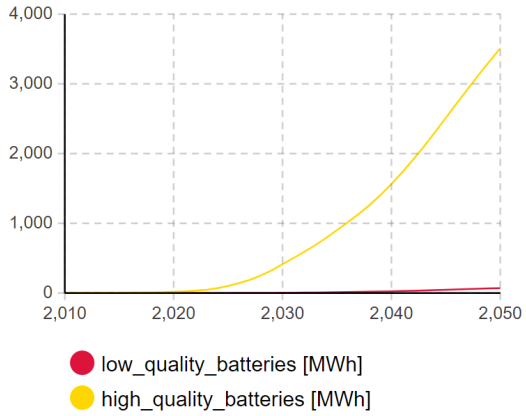


Figura 49: Scenario 4: EVBC High and Low quality

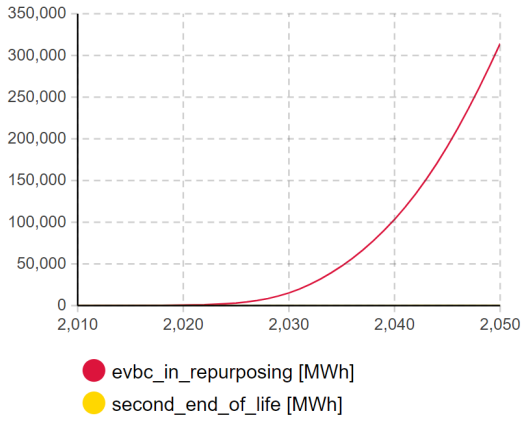


Figura 50: Scenario 4: EVBC in Repurposing

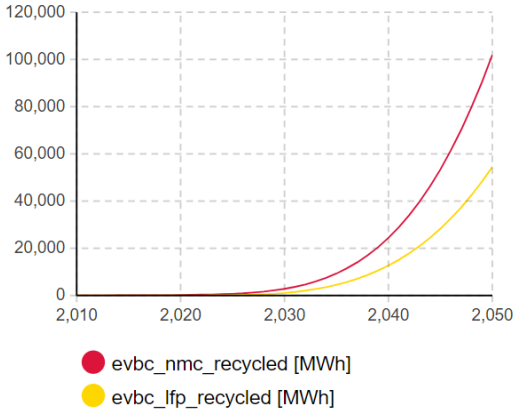


Figura 51: Scenario 4: EVBC in Recyclying

4.5 Scenario 5: ICE Ban + one-loop

Lo scenario ICE Ban + one-loop prevede un'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici in cui la vendita di veicoli a combustione interna viene progressivamente vietata entro il 2035. Questa transizione accelera l'adozione degli EV, determinando una crescita rapida della mobilità elettrica e un aumento del numero di batterie che raggiungono il fine vita. Nella gestione del EOL, lo scenario one-loop prevede che tutte le batterie EV giunte a fine vita vengano direttamente riciclate senza passare per una fase di riutilizzo. L'obiettivo è massimizzare il recupero di materiali critici come litio, cobalto e nickel attraverso processi di riciclo, garantendo un flusso costante di materie prime riciclate per la produzione di nuove batterie.

Questo scenario consente di valutare l'impatto di un'accelerazione forzata della transizione elettrica combinata con una strategia di riciclo diretto. L'assenza di una fase di riutilizzo consente di reintegrare rapidamente i materiali nella filiera produttiva, ma trascura il potenziale di estensione della vita utile delle batterie. L'analisi evidenzia il ruolo del riciclo in un contesto di crescita elevata della domanda di batterie e la capacità del sistema di assorbire l'aumento dei volumi di materiali a fine vita.

Carbon footprint

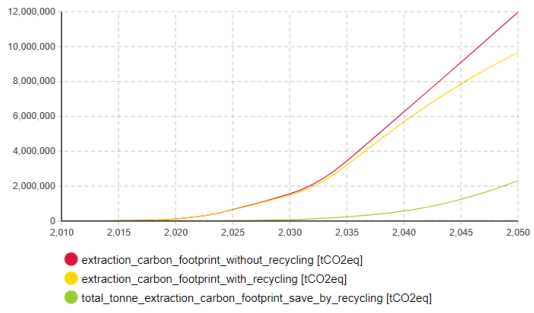


Figura 52: Scenario 5: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

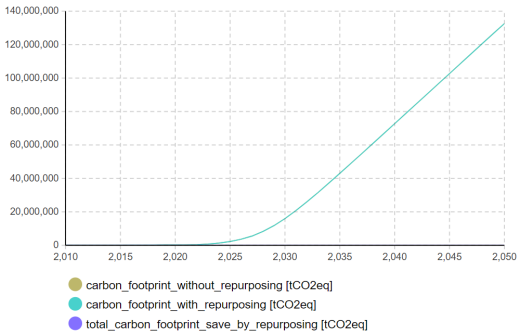


Figura 53: Scenario 5: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2

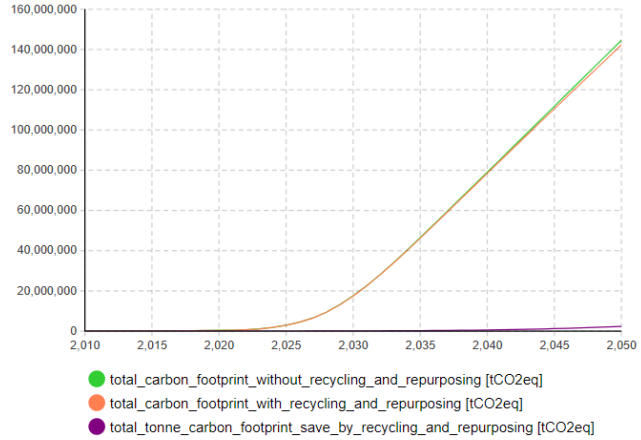


Figura 54: Scenario 5: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	**ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]**	**ExCFW/Recycling [tCO_2eq]**	**ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]**
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	12,461.30	1,625.21
2020	118,490.11	113,589.38	4,900.73
2025	658,005.58	640,143.55	17,862.03
2030	1,557,551.84	1,482,561.56	74,990.28
2035	3,443,636.18	3,207,053.79	236,582.39
2040	6,257,408.17	5,683,261.95	574,146.22
2045	9,095,056.41	7,851,126.25	1,243,930.16
2050	11,969,761.60	9,662,437.82	2,307,323.78

Tabella 28: Scenario 5: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	**CFW/Orepurposing[tCO_2eq]**	**CFW/Repurposing [tCO_2eq]**	**CFSavebyRepurposing [tCO_2eq]**
2010	0.00	0.00	0.00
2015	83,546.56	83,546.56	0.00
2020	269,706.75	269,706.75	0.00
2025	2,292,429.98	2,292,429.98	0.00
2030	15,991,113.01	15,991,113.01	0.00
2035	43,042,404.96	43,042,404.96	0.00
2040	72,760,532.68	72,760,532.68	0.00
2045	108,684,779.14	108,684,779.14	0.00
2050	132,644,854.29	132,644,854.29	0.00

Tabella 29: Scenario 5: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	**CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]**	**CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]**	**CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]**
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	80,101.48	17,531.59
2020	388,196.86	334,714.14	53,482.72
2025	2,950,435.55	2,722,340.23	228,095.33
2030	17,548,664.86	16,466,895.04	1,081,769.82
2035	46,486,041.14	46,249,458.75	236,582.39
2040	79,017,940.84	78,443,794.63	574,146.22
2045	111,790,162.16	110,546,232.01	1,243,930.16
2050	144,614,615.89	142,307,292.11	2,307,323.78

Tabella 30: Scenario 5: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità materiali critici, quote di riciclo

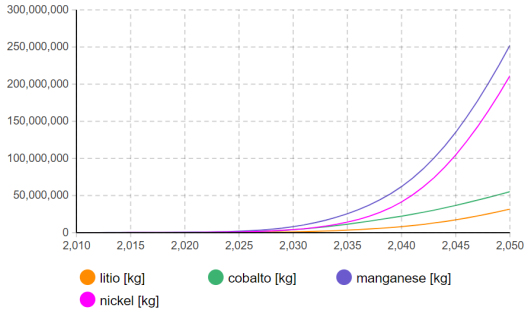


Figura 55: Scenario 5: Kg di materiali critici

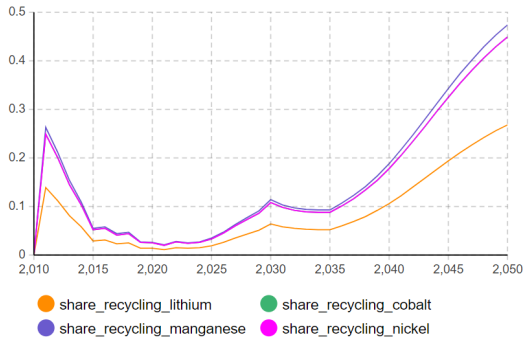


Figura 56: Scenario 5: Quote di riciclo

Anno	Litio [kg]	Manganese [kg]	Cobalto [kg]	Nickel [kg]
2010	0	0	0	0
2015	17,797.87	179,517.47	89,343.01	88,889.49
2020	54,678.89	540,465.78	268,981.29	267,615.90
2025	219,394.00	1,953,000.00	971,866.84	966,933.51
2030	1,032,000.00	8,101,000.00	3,990,000.00	4,070,000.00
2035	3,401,000.00	25,460,000.00	11,420,000.00	14,180,000.00
2040	9,565,000.00	73,190,000.00	24,750,000.00	50,720,000.00
2045	19,800,000.00	155,500,000.00	40,150,000.00	122,800,000.00
2050	31,670,000.00	252,300,000.00	55,140,000.00	211,200,000.00

Tabella 31: Scenario 5: Kg di materiali critici, ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	Nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	2.90	5.20	5.50	5.20
2020	1.40	2.50	2.60	2.50
2025	1.90	3.30	3.50	3.30
2031	5.80	9.80	10.30	9.80
2036	6.00	10.10	10.70	10.10
2040	12.20	17.80	18.80	17.80
2045	19.40	32.50	34.30	32.50
2050	26.80	44.90	47.40	44.90

Tabella 32: Scenario 5: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

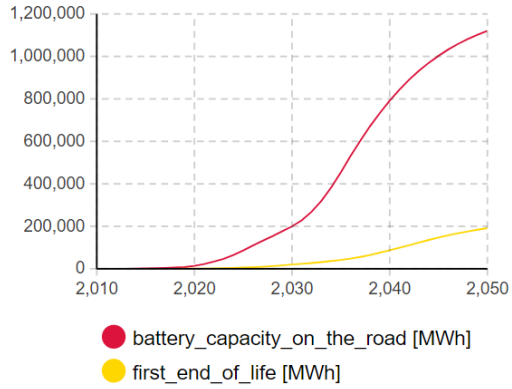


Figura 57: Scenario 5: EVBC in First use

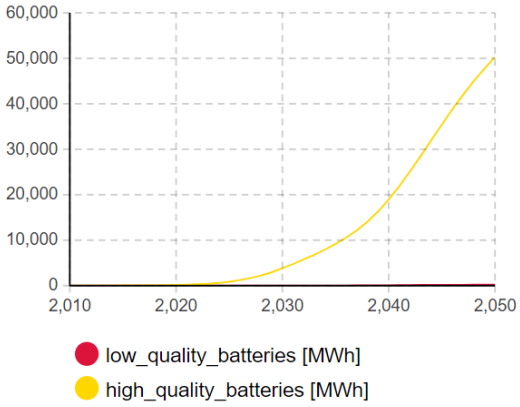


Figura 58: Scenario 5: EVBC High and Low quality

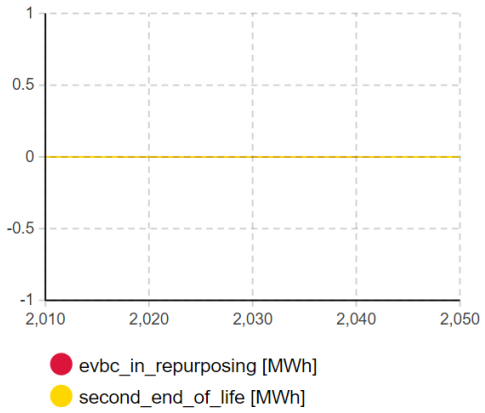


Figura 59: Scenario 5: EVBC in Repurposing

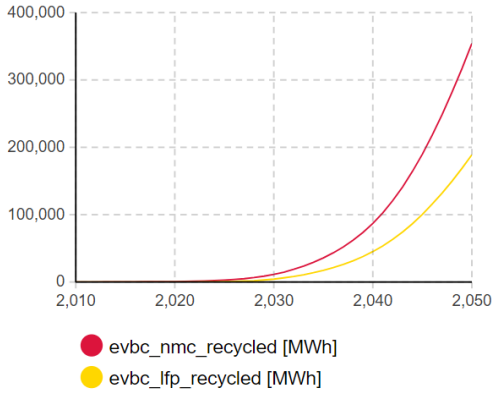


Figura 60: Scenario 5: EVBC in Recyclying

4.6 Scenario 6: ICE Ban + two-loop

Lo scenario ICE Ban + two-loop prevede un'evoluzione del mercato dei veicoli elettrici in cui la vendita di veicoli a combustione interna viene progressivamente vietata entro il 2035. Questa transizione accelera l'adozione degli EV, determinando una crescita rapida della mobilità elettrica e un aumento significativo del numero di batterie che raggiungono il fine vita. Nella gestione del EOL, lo scenario two-loop prevede che le batterie EV vengano inizialmente riutilizzate in applicazioni stazionarie prima di essere riciclate. Questo approccio consente di estendere la vita utile delle batterie, riducendo temporaneamente l'offerta di materiali vergini riciclati. Il riciclo avviene solo dopo il termine della seconda vita delle batterie, garantendo comunque il recupero di materiali critici come litio, cobalto e nickel.

Questo scenario consente di valutare l'impatto di una transizione forzata alla mobilità elettrica, combinata con una strategia di riutilizzo prima del riciclo. L'analisi si concentra su come l'allungamento della vita utile delle batterie influisca sull'impronta di carbonio e sulla disponibilità di materiali riciclati nel breve e lungo termine, consentendo un confronto dei benefici ambientali e strategici con il modello one-loop. In questo modo, emerge chiaramente il trade-off tra la disponibilità immediata di materie prime provenienti da riciclo e la riduzione della domanda di nuove BESS ottenibile attraverso il riutilizzo.

Carbon footprint

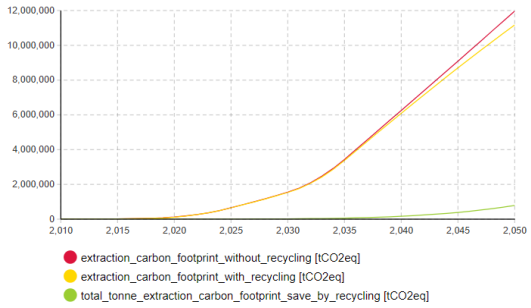


Figura 61: Scenario 6: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

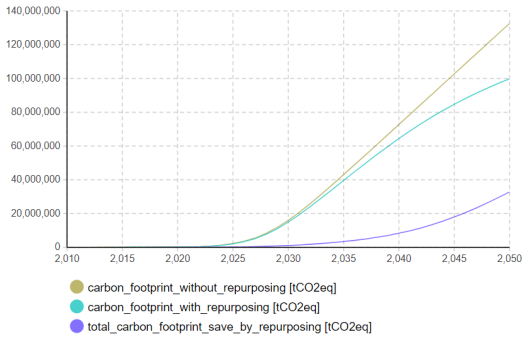


Figura 62: Scenario 6: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2

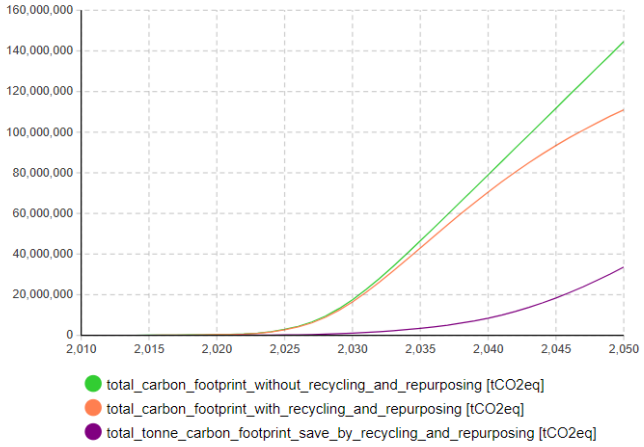


Figura 63: Scenario 6: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	13,759.83	326.68
2020	118,490.11	117,220.25	1,269.86
2025	658,005.58	653,345.77	4,659.81
2030	1,557,551.84	1,538,972.44	18,579.41
2035	3,443,636.18	3,381,989.77	61,646.41
2040	6,257,408.17	6,090,726.05	166,682.12
2045	9,095,056.41	8,705,685.92	389,370.49
2050	11,969,761.60	11,182,482.94	787,278.66

Tabella 33: Scenario 6: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, saving di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/Orepurposing [tCO_2eq]	CFW/repurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	83,546.56	66,341.64	17,204.91
2020	269,706.75	217,493.89	52,212.86
2025	2,292,429.98	2,068,994.60	223,435.38
2030	15,991,113.01	14,927,923.38	1,063,189.64
2035	43,042,404.96	39,620,650.09	3,421,754.87
2040	72,760,532.68	64,445,407.66	8,315,125.02
2045	108,684,779.14	88,122,242.46	20,562,536.68
2050	132,644,854.29	99,837,944.19	32,806,910.10

Tabella 34: Scenario 6: Carbon footprint per BESS W/Repurposing, W/o Repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	80,101.48	17,531.59
2020	388,196.86	334,714.17	53,482.69
2025	2,950,435.55	2,722,340.41	228,095.15
2030	17,548,664.86	16,466,895.85	1,081,769.00
2035	46,486,041.14	43,002,639.90	3,483,401.24
2040	79,017,940.84	70,536,133.74	8,481,807.10
2045	111,790,162.16	93,433,041.52	18,357,120.64
2050	144,614,615.89	111,020,427.17	33,594,188.72

Tabella 35: Scenario 6: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità materiali critici, quote di riciclo e numero di batterie in repurposing

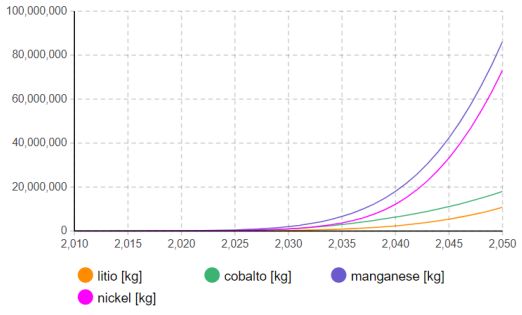


Figura 64: Scenario 6: Kg di materiali critici

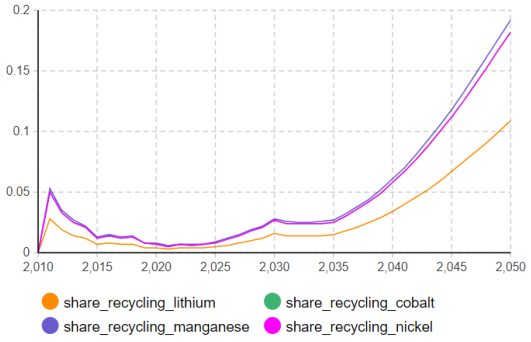


Figura 65: Scenario 6: Quote di riciclo

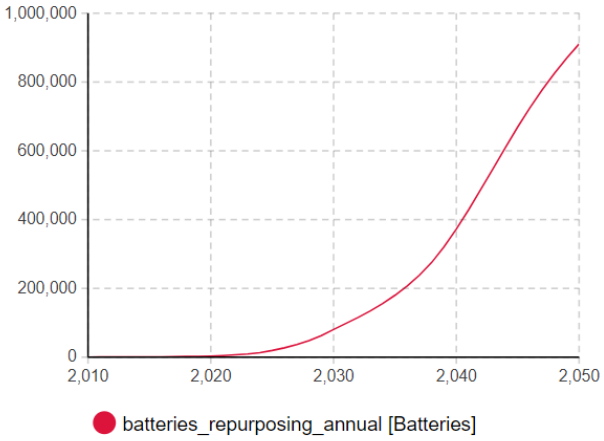


Figura 66: Scenario 6: Batterie in uso stazionario annualmente

Anno	**Litio [kg]**	**Manganese [kg]**	**Cobalto [kg]**	**Nickel [kg]**
2010	0	0	0	0
2015	3,576.40	36,085.12	17,958.99	17,867.83
2020	14,200.16	140,016.67	69,684.09	69,330.36
2025	57,236.86	509,434.71	253,537.61	252,250.62
2030	255,153.47	2,007,000.00	988,789.78	1,008,000.00
2035	886,465.95	6,633,000.00	2,963,000.00	3,712,000.00
2040	2,822,000.00	21,630,000.00	7,126,000.00	15,220,000.00
2045	5,410,000.00	42,380,000.00	11,130,000.00	33,270,000.00
2050	10,780,000.00	86,150,000.00	18,000,000.00	73,110,000.00

Tabella 36: Scenario 6: Kg di materiali critici, ogni 5 anni

Anno	**Litio [%]**	**Cobalto [%]**	**Manganese [%]**	**Nickel [%]**
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.70	1.20	1.30	1.20
2020	1.40	2.40	2.50	2.40
2025	0.50	0.80	0.90	0.80
2031	1.40	2.40	2.60	2.40
2036	1.80	3.00	3.20	3.00
2040	3.40	5.80	6.10	5.80
2045	6.70	11.20	11.80	11.20
2050	10.90	18.20	19.20	18.20

Tabella 37: Scenario 6: Quote di riciclo annuali di Litio, Cobalto, Manganese e Nickel ogni 5 anni

Anno	Batterie in repurposing [unità]
2010	0.00
2015	1,011.07
2020	3,482.98
2025	19,402.55
2030	80,480.03
2035	179,984.22
2040	372,438.82
2045	669,353.54
2050	910,706.91

Tabella 38: Scenario 6: Numero di batterie destinate al repurposing ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

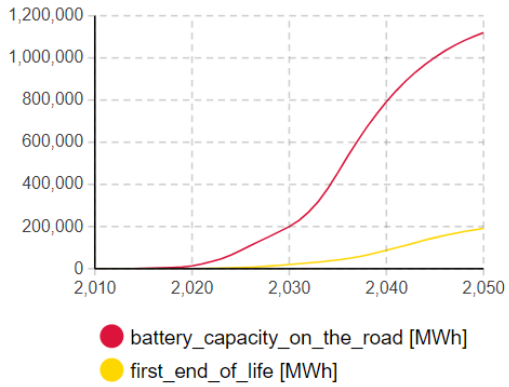


Figura 67: Scenario 6: EVBC in First use

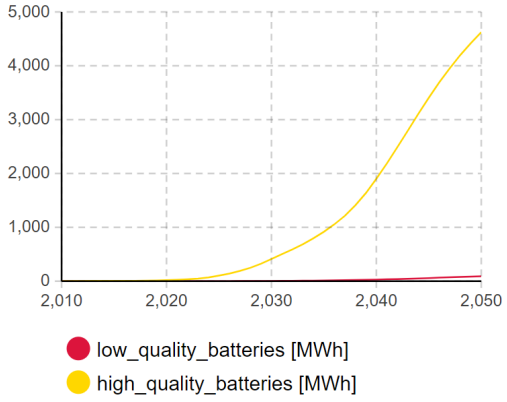


Figura 68: Scenario 6: EVBC High and Low quality

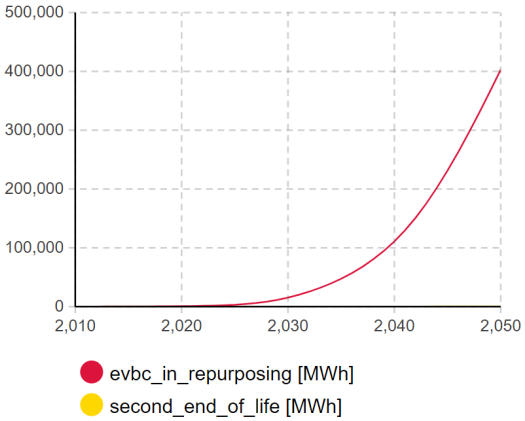


Figura 69: Scenario 6: EVBC in repurposing

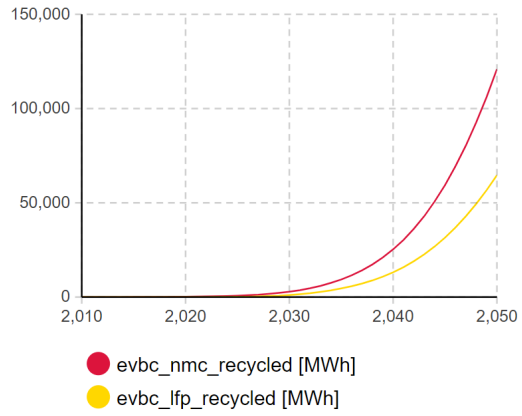


Figura 70: Scenario 6: EVBC in recyclying

4.7 Analisi di sensitività

Per i tre scenari di sensitività, vengono considerati i KPI ambientali relativi all'impronta di carbonio generata, alla quantità di materiali riciclati e alle quote di riciclo per ciascun materiale. Inoltre, si considera la capacità energetica del modello EOL che subisce una variazione considerevole.

4.7.1 Incidenza dei ritardi logistici e di processo

Si parte dallo scenario BAU con strategia one-loop, come già spiegato nell'introduzione dei risultati, andando a considerare nulli i seguenti delay:

- FirstEndOfLifeDelay
- ConstructionDelay
- CarryingDelay
- DelayTesting
- DelayRecycling

Grafici Carbon Footprint

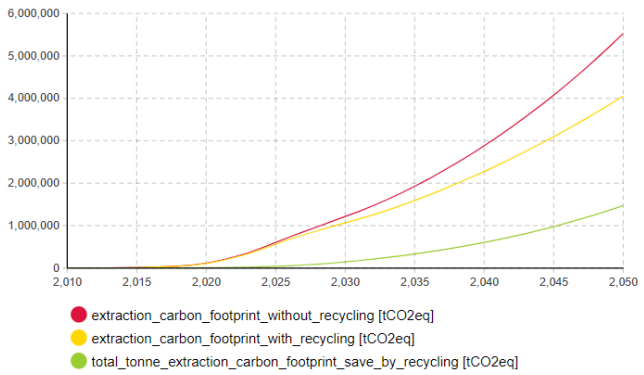


Figura 71: S1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	12,183.30	1,903.21
2020	118,490.11	109,601.16	8,888.96
2025	605,743.92	564,588.05	41,155.87
2030	1,215,058.14	1,068,098.14	146,960.00
2035	1,927,210.65	1,591,594.10	335,616.55
2040	2,883,949.40	2,277,807.05	606,142.35
2045	4,075,979.69	3,096,471.46	979,508.23
2050	5,527,965.08	4,053,205.58	1,474,759.50

Tabella 39: S1: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità Materiali critici, quote di riciclo

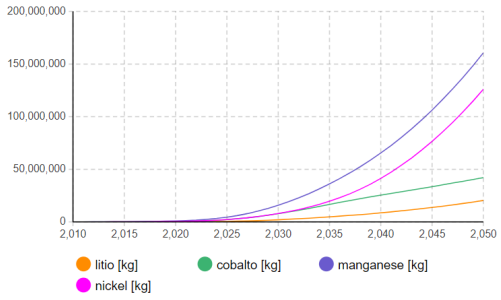


Figura 72: S1: Kg di materiali critici

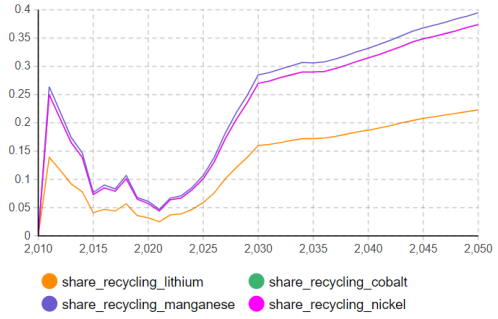


Figura 73: S1: Quote di riciclo

Anno	Lithium [kg]	Manganese [kg]	Cobalt [kg]	Nickel [kg]
2010	0	0	0	0
2015	20,864.88	210,249.27	104,637.74	104,106.59
2020	99,667.98	980,373.78	487,916.55	485,439.81
2025	510,609.68	4,498,000.00	2,238,000.00	2,227,000.00
2030	2,010,000.00	15,890,000.00	7,836,000.00	7,972,000.00
2035	4,779,000.00	36,150,000.00	16,570,000.00	19,700,000.00
2040	8,599,000.00	65,480,000.00	25,410,000.00	41,350,000.00
2045	13,700,000.00	106,300,000.00	33,530,000.00	76,580,000.00
2050	20,390,000.00	160,800,000.00	42,110,000.00	126,100,000.00

Tabella 40: S1: Kg di materiali critici ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	4.10	7.30	7.70	7.30
2020	3.20	5.70	6.10	5.70
2025	5.90	10.10	10.70	10.10
2031	16.20	27.40	28.90	27.40
2036	17.30	29.10	30.80	29.10
2040	18.70	31.40	33.20	31.40
2045	20.80	34.80	36.80	34.80
2050	22.30	37.40	39.40	37.40

Tabella 41: S1: Quota di riciclo ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

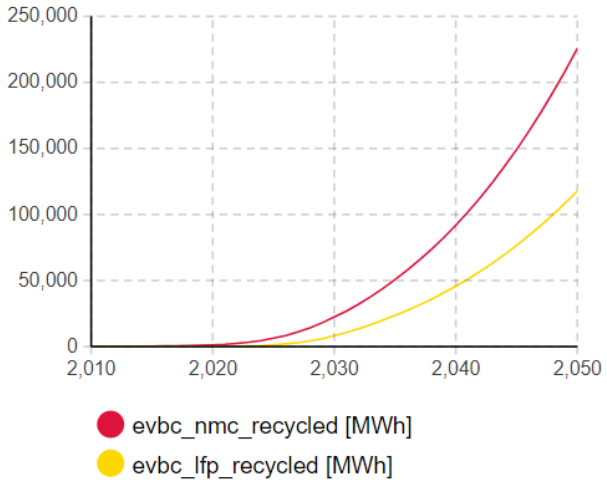


Figura 74: S1: EVBC in recycling

4.7.2 Incidenza della sostituzione di batterie NMC con LFP

Si parte dallo scenario BAU con strategia one-loop, come spiegato nell'introduzione dei risultati, andando a considerare nullo l'effetto di sostituzione delle batterie NMC con le batterie LFP.

Grafici Carbon Footprint

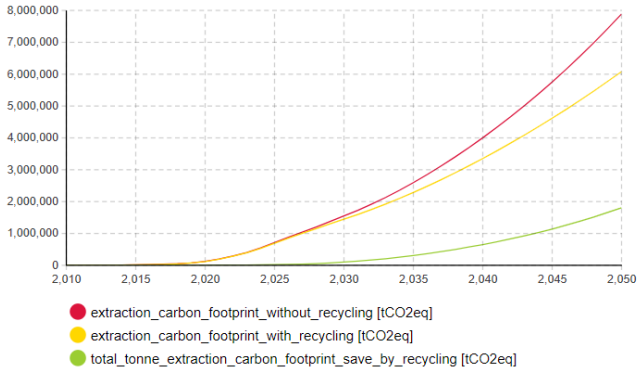


Figura 75: S2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,403.21	12,746.90	1,656.31
2020	124,722.16	119,599.46	5,122.70
2025	714,134.46	692,976.59	21,157.88
2030	1,549,020.05	1,448,975.44	100,044.61
2035	2,596,894.75	2,287,857.41	309,037.35
2040	4,003,840.87	3,351,962.55	651,878.33
2045	5,755,873.86	4,616,465.34	1,139,408.52
2050	7,889,323.52	6,083,235.72	1,806,087.79

Tabella 42: S2: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità Materiali critici, quote di riciclo

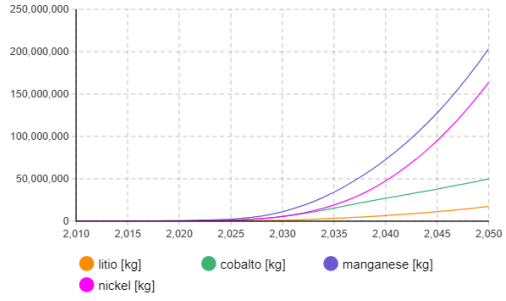


Figura 76: S2: Kg di materiali critici

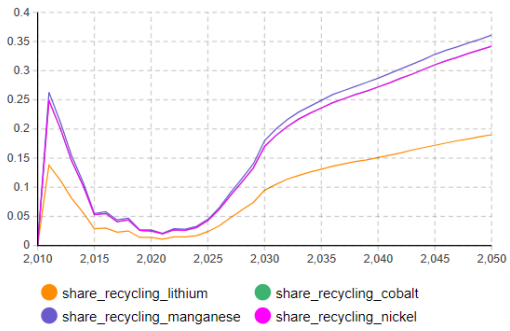


Figura 77: S2: Quote di riciclo

Anno	Litio [kg]	Manganese da NMC [kg]	Cobalto da NMC [kg]	nickel da NMC [kg]
2010	0	0	0	0
2015	17,868.34	183,182.64	91,167.11	90,704.33
2020	55,263.85	566,553.90	281,964.93	280,533.64
2025	228,251.97	2,340,000.00	1,165,000.00	1,159,000.00
2030	1,077,000.00	11,060,000.00	5,445,000.00	5,561,000.00
2035	3,263,000.00	34,250,000.00	15,400,000.00	19,040,000.00
2040	6,640,000.00	72,670,000.00	26,960,000.00	47,430,000.00
2045	11,200,000.00	127,800,000.00	37,910,000.00	94,990,000.00
2050	17,300,000.00	203,600,000.00	49,850,000.00	164,000,000.00

Tabella 43: S2: Kg di materiali critici ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	2.90	5.30	5.50	5.30
2020	1.40	2.50	2.70	2.50
2025	2.40	4.30	4.50	4.30
2031	10.50	18.90	20.00	18.90
2036	13.60	24.50	25.90	24.50
2040	15.10	27.20	28.70	27.20
2045	17.20	31.00	32.80	31.00
2050	19.00	34.20	36.10	34.20

Tabella 44: S2: Quote di riciclo ogni 5 anni

Grafici capacità energetiche End-of-Life

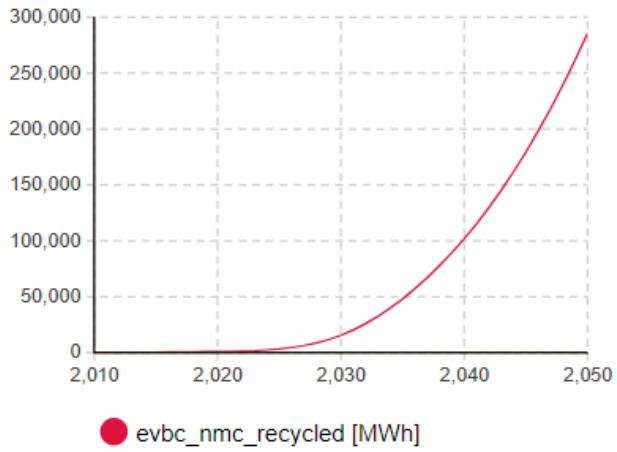


Figura 78: S2: EVBC in Recycling

4.7.3 Incidenza della distribuzione di probabilità dello SoH

Si parte dallo scenario BAU con strategia two-loop, come spiegato nell'introduzione dei risultati, andando a ridurre la probabilità di avere batterie con un elevato SoH

dall'80% al 15%, ponendosi così in un caso particolarmente negativo per il two-loop.

Grafici Carbon Footprint

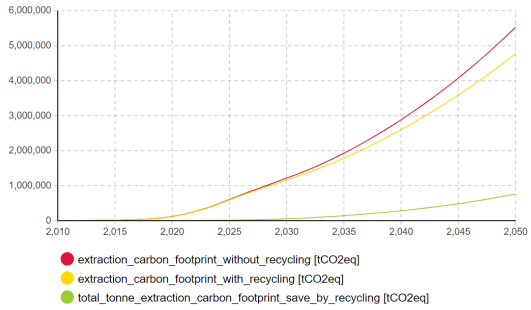


Figura 79: S3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2

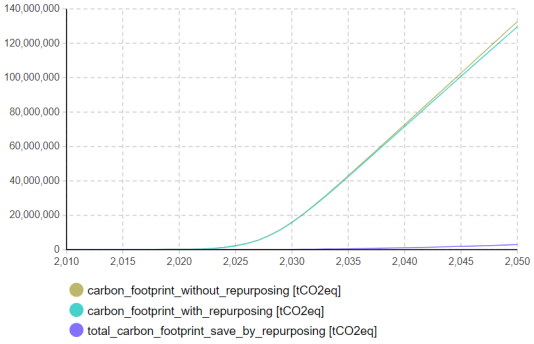


Figura 80: S3: Carbon footprint W/ repurposing, W/o repurposing, risparmio di CO2

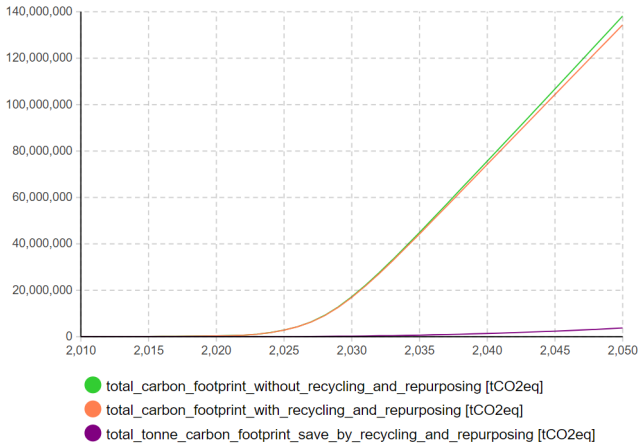


Figura 81: S3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2

Anno	ExCFW/oRecycling [tCO_2eq]	ExCFW/Recycling [tCO_2eq]	ExCFSavebyRecycling [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	14,086.51	12,931.65	1,154.87
2020	118,490.11	115,006.16	3,483.95
2025	605,743.92	592,504.19	13,239.72
2030	1,215,058.14	1,162,597.10	52,461.04
2035	1,927,210.65	1,785,406.36	141,804.29
2040	2,883,949.40	2,600,337.79	283,611.61
2045	4,075,979.69	3,590,517.34	485,462.35
2050	5,527,965.08	4,766,710.24	761,254.84

Tabella 45: S3: Carbon footprint per estrazione W/recycle, W/o recycle, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Anno	CFW/Orepurposing [tCO_2eq]	CFW/Repurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	83,546.56	80,320.64	3,225.92
2020	269,706.75	259,916.84	9,789.91
2025	2,292,429.98	2,250,554.61	41,875.37
2030	15,991,113.01	15,800,152.35	190,960.66
2035	43,042,404.96	42,491,185.38	551,219.57
2040	72,760,532.68	71,643,936.09	1,116,596.58
2045	102,695,105.75	100,781,251.96	1,913,853.79
2050	132,644,854.29	129,646,178.46	2,998,675.83

Tabella 46: S3: Carbon footprint W/ repurposing, W/o repurposing, risparmio di CO2 ogni 5 anni

Anno	CFW/ORecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFW/RecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]	CFSavebyRecyclingAndRepurposing [tCO_2eq]
2010	0.00	0.00	0.00
2015	97,633.07	93,252.28	4,380.79
2020	388,196.86	374,923.00	13,273.87
2025	2,898,173.89	2,843,058.77	55,115.12
2030	17,206,171.15	16,962,749.40	243,421.75
2035	44,969,615.61	44,276,591.70	693,023.91
2040	75,644,482.08	74,244,273.84	1,400,208.24
2045	106,771,085.44	104,371,769.25	2,399,316.19
2050	138,172,819.37	134,412,888.65	3,759,930.72

Tabella 47: S3: Carbon footprint W/recycle e repurposing, W/o recycle e repurposing, risparmio di CO2, ogni 5 anni

Grafici quantità Materiali critici, quote di riciclo e numero di batterie in repurposing

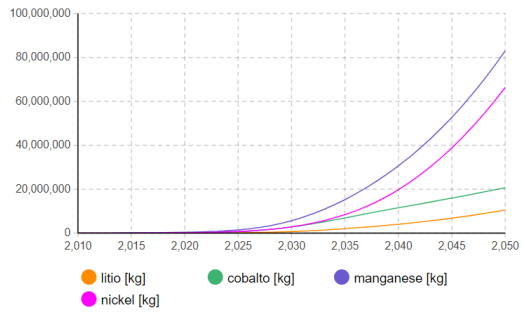


Figura 82: S3: Kg di materiali critici

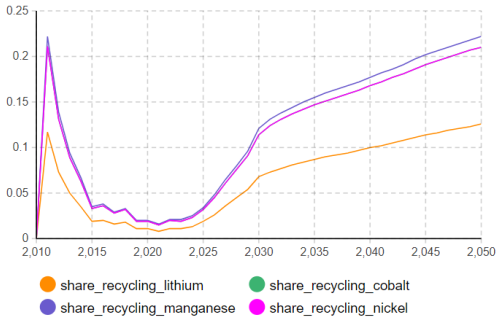


Figura 83: S3: Quote di riciclo

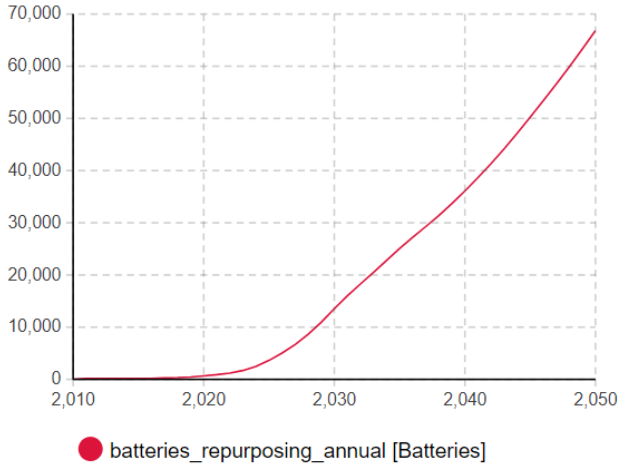


Figura 84: S3: Batterie in uso stazionario annualmente

Anno	Litio [kg]	Manganese [kg]	Cobalto [kg]	Nickel [kg]
2010	0	0	0	0
2015	12,628.37	127,580.00	63,494.55	63,172.25
2020	38,864.94	384,225.28	191,222.86	190,252.18
2025	162,881.82	1,447,000.00	720,256.67	716,600.55
2030	719,617.00	5,669,000.00	2,793,000.00	2,846,000.00
2035	2,031,000.00	15,260,000.00	6,919,000.00	8,415,000.00
2040	4,032,000.00	30,640,000.00	11,540,000.00	19,770,000.00
2045	6,792,000.00	52,710,000.00	15,930,000.00	38,820,000.00
2050	10,520,000.00	83,040,000.00	20,710,000.00	66,410,000.00

Tabella 48: S3: Kg di materiali critici ogni 5 anni

Anno	Litio [%]	Cobalto [%]	Manganese [%]	Nickel [%]
2010	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	1.90	3.30	3.50	3.30
2020	1.10	1.90	2.00	1.90
2025	1.90	3.20	3.40	3.20
2031	7.30	12.40	13.10	12.40
2036	9.00	15.10	16.00	15.10
2040	10.00	16.80	17.70	16.80
2045	11.40	19.10	20.20	19.10
2050	12.60	21.00	22.20	21.00

Tabella 49: S3: Quote di riciclo ogni 5 anni

Anno	**Batterie in repurposing annuale**
2010	0.00
2015	189.58
2020	653.06
2025	3,626.25
2030	13,549.45
2035	25,052.68
2040	36,101.89
2045	50,230.28
2050	66,836.82

Tabella 50: S3: Quantità annuale di batterie destinate al repurposing ogni 5 anni

5 Discussione

Nella tesi sono stati presi in analisi molteplici scenari volti a simulare la futura evoluzione del mercato italiano dei veicoli elettrici e dei relativi impatti ambientali in termini di gestione del fine vita delle batterie. Gli scenari considerati differiscono sia nelle politiche di adozione dei veicoli elettrici (BAU, Net zero, ICE ban) sia nelle strategie di End-of-Life delle batterie (one-loop e two-loop). A completamento di questi sei scenari principali, sono state realizzate ulteriori analisi di sensitività che hanno riguardato l'incidenza dei ritardi logistici e di processo, l'omissione della sostituzione delle batterie NMC con LFP e uno scenario pessimista per quanto riguarda le batterie di alta qualità per verificare la robustezza del two-loop.

Nel complesso, i risultati hanno messo in luce come il repurposing delle batterie a fine vita risulti determinante ai fini della riduzione di CO_2eq, superando di gran lunga l'effetto di mitigazione che si ottiene con il riciclo immediato dei materiali critici che non dovranno più essere estratti. Al contempo, alcuni scenari indicano che perseguire il riutilizzo di batterie in applicazioni stazionarie rende impossibile raggiungere le quote di riciclo obbligatorie previste dalla normative europea Battery Regulation 1542/2023, in quanto la disponibilità di batterie da riciclare si posticipa di una seconda vita media.

La tabella seguente riporta le percentuali minime di riciclo imposte dalla Battery Regulation 1542/2023. L'attuale quadro normativo stabilisce obiettivi vincolanti per il 2031 e il 2036. La simulazione sviluppata estende tuttavia l'analisi fino al 2050, un orizzonte temporale per cui non risultano ancora definite ulteriori soglie obbligatorie di riciclo.

Materiale critico	**Quota di riciclo (2031)**	**Quota di riciclo (2036)**
Litio	6%	12%
Cobalto	16%	26%
Nickel	6%	15%

Tabella 51: Quote obbligatorie di riciclo per litio, cobalto e nickel secondo la Battery Regulation 1542/2023

5.1 Analisi scenari principali

Studiamo singolarmente i risultati degli scenari che sono stati presentati nel capitolo 4.

Scenario 1: BAU + one-loop

Nel caso BAU + one-loop, il tasso di penetrazione dei veicoli elettrici cresce in modo moderato e le batterie, una volta raggiunto il primo End-of-Life, vengono immediatamente riciclate. Dalla tabella 6 si nota che al 2050 il risparmio di CO_2eq imputabile

al riciclo (ExCFSavebyRecycling) è di circa 1.150 milioni di tonnellate, mentre non si registra alcun beneficio aggiuntivo derivante dal repurposing. Di conseguenza, la riduzione complessiva dell'impronta di carbonio si limita a 1.150 MtCO_2eq al 2050. In parallelo, la quota di riciclo (tabella 10) di lito, nickel e cobalto al 2031 rispetterebbero le quote obbligatorie di riciclo, mentre al 2036 l'unico materiale che non rispetterebbe la quota obbligatoria sarebbe il Cobalto, sotto di circa 3 punti percentuali. Questi risultati segnalano che, pur non sfruttando il second-loop, la strategia di riciclo diretto permette di recuperare una discreta quantità di materiali critici in tempi rapidi, ma non rispettando perfettamente la Battery regulation 1542/2023.

Scenario 2: BAU + two-loop

Se a parità di scenario di mercato BAU si introduce il repurposing, come nel caso BAU + two-loop, le batterie che presentano ancora un elevato State of Health vengono impiegate in applicazioni stazionarie prima di essere riciclate. Dalla Tabella 12, ad esempio, si osserva che al 2050 le tonnellate di carbonio risparmiate sarebbero circa 15.992 milioni di tonnellate, mentre il risparmio da riciclo come si vede in tabella 11 si attesta sotto il mezzo milione di tonnellate (0.443 MtCO_2eq circa). Complessivamente, quindi, la somma dei due contributi, come si nota da tabella 13 arriva a 16,437 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate al 2050, nettamente superiori ai 1,150 milioni del rispettivo scenario one-loop. In parallelo, le quote di riciclo, come si vede da tabella 15 sono molto inferiori, poiché molte batterie restano nella seconda vita e non vengono rese disponibili per il recupero dei metalli. Esse non raggiungono nè al 2031 nè al 2036 le quote obbligatorie di riciclo della Battery regulation 1542/2023. Questi risultati mettono in evidenza la forza delle strategia di repurposing nell'andare ad abbassare l'impronta di carbonio relativa alla produzione di BESS, ma non permettendo il soddisfacimento delle quote obbligatorie di riciclo.

Scenario 3: Net zero + one-loop

Con l'aumento della penetrazione dei veicoli elettrici nello scenario Net zero, i volumi di batterie a fine vita crescono più rapidamente. Dalla tabella 17 si nota che il risparmio di carbon footprint cumulato dovuto al riciclo raggiunge 1,858 milioni di tonnellate al 2050, valore maggiore del 61 % circa rispetto allo scenario BAU + one-loop. Tuttavia, l'assenza di repurposing implica zero risparmi di carbon footprint collegati al riutilizzo. In parallelo, la quota di riciclo di litio e nickel (tabella 21) al 2031 rispettano la normativa, mentre al cobalto mancano circa 4 punti percentuali. Al 2036, l'unico materiale a rispettare la normativa è il nickel, mentre a litio e cobalto mancano rispettivamente circa 3 e 10 punti percentuali. Questi risultati segnalano che, pur non sfruttando il second-loop, la strategia di riciclo diretto permette di recuperare una buona quantità di materiali critici in tempi rapidi, ma in questo caso l'aumento repentino delle quote di veicoli elettrici intorno agli anni 2030, porterebbe al non rispetto delle quote obbligatorie.

Scenario 4: Net zero + two-loop

Se si aggiunge il riutilizzo in uno scenario Net zero, le batterie che presentano ancora

un elevato State of Health vengono impiegate in applicazioni stazionarie prima di essere riciclate. Al 2050, il risparmio da riciclo raggiunge 0.664 milioni di tonnellate di CO_2eq come si vede da tabella 22, ma la voce del risparmio dovuto al repurposing è molto più rilevante, arrivando a 26.240 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate, come si nota da tabella 23. Si tocca quindi un totale, leggendo da tabella 24, di 26.905 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate, con una incidenza dovuta quasi totalmente al repurposing. È un salto molto marcato rispetto al corrispettivo one-loop e la differenza sostanziale, come già discusso in precedenza, consiste nell'evitare la produzione ex novo di batterie stazionarie. Anche in questo caso, si nota da tabella 26 che le quote di riciclo risultano sensibilmente più modeste, data la repentina crescita di veicoli elettrici intorno al 2030. Nessun materiale, nè al 2031 nè al 2036 riuscirebbe a soddisfare le quote obbligatorie di riciclo della Battery regulation.

Scenario 5: ICE ban + one-loop

Nell'ipotesi di un divieto delle vendite di veicoli a combustione interna, l'adozione dei veicoli elettrici crescerebbe in modo esponenziale, generando, a distanza di alcuni anni, un flusso ingente di batterie a fine vita. Nel caso ICE ban + one-loop, al 2050 si raggiungono i 2.307 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate grazie al riciclo, come si vede da tabella 28, un valore ulteriormente superiore rispetto allo scenario Net zero + one-loop. Anche qui, però, l'assenza del repurposing fa sì che si perda il contributo positivo del second-loop, infatti la riduzione dell'impronta di carbonio rimane dunque legata unicamente al riciclo dei materiali critici. In parallelo, le quote di riciclo di litio e nickel che si leggono in tabella 32 sono rispettate al 2031 (al litio mancherebbero 0.2 punti percentuale), ma la quota del cobalto è sotto di circa 6 punti percentuali. Al 2036, nessuna quota di riciclo di materiali rispetterebbe la normativa. Questi risultati mostrano come l'aumento esponenziale delle quote di veicoli elettrici intorno agli anni 2030, porti al non rispetto delle quote obbligatorie date dalla Battery Regulation, in quanto ci sono dei delay di processo da considerare affinché si possa avere a disposizione la batteria da riciclare. Infatti, dalla figura 56 si osserva che è circa dal 2038 che si inizia ad avere una crescita esponenziale delle quote di riciclo, infatti in quell'anno si avranno a disposizione le batterie morte che provengono dall'aumento repentino di circa una decina di anni prima.

Scenario 6: ICE ban + two-loop

Infine, ICE ban + two-loop si configura come uno degli scenari che raggiungono la più ampia riduzione di impronta di carbonio. Al 2050, il riciclo consente di risparmiare circa 0.787 milioni di tonnellate di CO_2eq, come si vede da tabella 33, mentre il repurposing leggendo in tabella 34 ha una riduzione di carbon footprint di 32.807 milioni, portando il totale, secondo tabella 35, a oltre 33.594 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiata. Questo valore è fra i più elevati in assoluto, ma si accompagna, come visto anche negli altri scenari two-loop, a quote di riciclo più basse, come si può vedere in tabella 37. Al 2031 e al 2036 non sono rispettate le quote obbligatorie di riciclo della normativa. La causa è legata al fatto che molte batterie rimangono in uso prolungato all'interno delle applicazioni stazionarie e confluiscono in ritardo agli impianti di riciclo.

5.2 Analisi di sensitività

Al di fuori dei sei scenari principali, sono state condotte simulazioni aggiuntive per valutare la robustezza dei risultati al variare di alcuni parametri. In questo caso per semplificare, si sono fatti confronti diretti prendendo come riferimento gli scenari BAU + one-loop oppure BAU + two-loop.

Eliminazione dei ritardi logistici (BAU + one-loop)

La prima simulazione di sensitività analizza l'impatto dell'azzeramento dei delay legati a disassemblaggio, testing e costruzione degli impianti di riciclo, mantenendo BAU + one-loop come scenario base. Dal confronto delle tabelle, in particolare tabella 39 contro tabella 6, si nota che al 2050 il risparmio totale di CO_2eq derivante dal riciclo sale a 1.475 milioni di tonnellate, contro i 1.150 milioni dell'originale BAU + one-loop, con un aumento del risparmio dell'impronta di carbonio del 28% circa. Anche le quote di riciclo, leggendo in tabella 41, risultano maggiori. Sia al 2031 che al 2036 sono rispettate le quote di riciclo obbligatorie della normativa. Questo risultato conferma che migliorare l'efficienza nella supply chain, prediligendo un approccio integrato e coordinato che permetta di ridurre sprechi di tempo, permette un recupero più tempestivo dei materiali e, di conseguenza, un impatto ambientale minore.

Sostituzione batterie NMC nulla (BAU + one-loop)

Nella seconda simulazione, sempre partendo dallo scenario BAU + one-loop, si riduce a zero la sostituzione delle batterie NMC con batterie LFP. Confrontando le tabelle 42 e 6 si osserva un incremento delle tonnellate di CO_2eq risparmiate dal riciclo (1.806 milioni circa al 2050, contro 1.150 milioni) e quote di riciclo più alte (soprattutto dopo il 2036 quando arrivano i maggiori volumi di batterie in EOL), come si legge da tabella 44. L'assenza di batterie LFP, meno ricche di materiali critici, aumenta infatti il potenziale di recupero di nickel e cobalto, anche se al 2036 la quota di riciclo del cobalto non rispetterebbe quella obbligatoria da normativa (c'è da considerare che aumenterebbe anche la domanda di quei materiali critici). Al tempo stesso, però, la maggiore diffusione di batterie NMC significa produrre più emissioni in termini assoluti in fase di estrazione, con un aumento del totale di CO_2eq rispetto al BAU iniziale, come si vede sempre dalle stesse tabelle confrontando le voci "ExCFW/oRecycling" e "ExCFW/Recycling". Se da un lato si ottiene un vantaggio nelle quote di riciclo e si aumenta il risparmio di impronta di carbonio del 57%, dall'altro lato i valori assoluti delle tonnellate di CO_2eq emesse sono maggiori rispetto al caso BAU + one-loop con la sostituzione progressiva delle batterie.

Riduzione della probabilità di avere batterie High SoH (BAU + two-loop)

Infine, si è analizzato cosa accade nello scenario BAU + two-loop se la percentuale di batterie che conservano un elevato SoH a fine vita scende drasticamente dall'80% al 15%. I risultati delle tabelle 45, 46, 47 confrontati con le tabelle 11, 12, 13 eviden-

ziano che la riduzione del SoH diminuisce il contributo positivo del repurposing (al 2050 si passa da 15.992 a 2.999 milioni di tonnellate risparmiate di CO_2eq risparmiate dal repurposing). Tuttavia, si osserva come il two-loop in questo caso sfavorevole rimanga comunque più vantaggioso in termini di carbon footprint risparmiata rispetto allo scenario one-loop con le quote di batterie con elevato SoH immutate, poiché perfino un piccolo nucleo di batterie di alta qualità aiuta a evitare la produzione ex novo di sistemi BESS. Inoltre, con meno batterie che accedono alla seconda vita, aumenta l'afflusso di batterie guaste direttamente riciclate, facendo salire in parte le tonnellate di carbonio risparmiate dal riciclo (da 0.443 a 0.761 milioni di tonnellate di CO_2eq al 2050), andando ad aumentare anche le quote di riciclo. Esse in questo caso, saranno rispettate al 2031 per il litio e il nickel, e al 2036 solamente per il nickel. Questa simulazione ha lo scopo di far osservare quantitativamente la robustezza del repurposing se si seguono i KPI ambientali della carbon footprint, che anche in casi molto sfavorevoli consentono di avere dei risparmi maggiori rispetto alla soluzione del riciclo immediato.

Dopo aver riassunto brevemente i risultati principali di ogni scenario, si prosegue con un confronto incrociato che mira a esaltare le differenze sostanziali tra scenari e/o strategie di gestione dell'EOL.

5.3 Confronti tra scenari principali e valutazione sensitività

Confronto tra gli scenari della strategia one-loop: BAU, Net zero e ICE ban

Nel caso in cui le batterie a fine vita siano riciclate senza passare dal riutilizzo, secondo la strategia one-loop, si osserva innanzitutto come l'aumento della quota di veicoli elettrici, previsto dai diversi scenari, comporti una progressiva crescita delle tonnellate di carbonio evitate grazie al riciclo. Confrontando, ad esempio, lo scenario BAU + one-loop con Net zero + one-loop, si nota che il passaggio a un mercato EV più rapido come il Net zero porti ad un aumento del 61% del risparmio di CO_2eq imputabile al riciclo entro il 2050. In BAU + one-loop, infatti, al 2050 si raggiungo i 1.150 milioni di tonnellate di CO_2eq evitate, mentre nello scenario Net zero + one-loop il valore sale a circa 1.858 milioni. Infatti, la maggiore diffusione di auto elettriche produce un volume maggiore di batterie a fine vita, di conseguenza cresce la quantità di materiali critici che si possono recuperare e non da estrarre ex novo. Avendo una maggiore domanda di veicoli elettrici, i valori assoluti dell'impronta di carbonio emessa per estrarre i materiali critici necessari sarà sicuramente maggiore nel caso Net zero (avendo però un risparmio di tCO_2eq maggiore), è però interessante notare che le tonnellate di carbonio emesse nello scenario BAU senza considerare opzioni di riciclo (circa 5.528 $MtCO_2eq$) siano comunque confrontabili con le tonnellate di carbonio emesse nello scenario Net zero in cui si applicano le politiche di riciclo (circa 7.853 $MtCO_2eq$). Si osserva quindi che a livello di carbon footprint generata, non ci sono differenze troppo marcate tra uno scenario con più domanda di materiali (Net zero) in cui è presente una buona politica di riciclo, e uno

scenario con meno domanda (BAU) in cui il recupero di materiali non è presente.

Un salto ulteriore avviene quando si passa allo scenario ICE ban. In quest'ultimo, il divieto di vendere veicoli endotermici entro il 2035 accelera bruscamente l'adozione di EV, e dunque, nel corso della simulazione, si giunge a un flusso ancora più rilevante di batterie da riciclare. Il risparmio di carbonio a fine simulazione è circa 2.307 milioni di tonnellate, confermando come uno scenario più aggressivo di elettrificazione incida positivamente sul risparmio di tonnellate di carbonio. Avendo una crescita esponenziale delle quote di veicoli elettrici, è presente un aumento in termini assoluti della carbon footprint generata, avendo più domanda di materiali critici. E' però interessante notare che le tonnellate di carbonio emesse nello scenario Net zero senza considerare opzioni di riciclo (circa 9.711 $MtCO_2eq$) siano superiori alle tonnellate di carbonio emesse nello scenario ICE ban in cui si applicano le politiche di riciclo (circa 9.662 $MtCO_2eq$). Il modello mostra che l'implementazione del riciclo può compensare l'impatto ambientale di una crescita esponenziale degli EV. Nello specifico, la carbon footprint di uno scenario con riciclo e crescita derivante da ICE ban risulti inferiore a quella di una crescita NET zero ma senza riciclo.

Gli scenari one-loop non prevedono alcuna riduzione ulteriore di CO_2eq dovuta al riutilizzo in BESS, in quanto tutte le batterie vengono immediatamente disassemblate dai veicoli elettrici e riciclate.

Nei percorsi Net zero e ICE ban, l'incremento anticipato delle vendite di veicoli elettrici consente di riciclare un gran numero di batterie NMC, in un periodo in cui la sostituzione con LFP non è ancora così diffusa. Ad esempio, se al 2030 si ha una quota del 35% di sostituzione NMC con LFP, in quell'anno lo scenario BAU ha una penetrazione del mercato EV del 21%, mentre gli scenari Net zero e ICE ban raggiungono già nel 2026-2027 circa la stessa quota di vendite. Quindi, questi ultimi scenari, hanno a disposizione degli anni in più in cui le quote di sostituzione sono minori, avendo quindi maggiori batterie NMC sulle auto e maggiori materiali critici da poter poi riciclare una volta raggiunta l'End-of-Life.

Le quote di riciclo nei modelli one-loop risultano significativamente più elevate al termine della simulazione rispetto agli scenari two-loop, in quanto il processo di riciclo avviene immediatamente dopo il fine vita della batteria, salvo ritardi logistici e di processo. Confrontando le strategia one-loop, nello scenario ICE ban le percentuali di recupero di litio, nickel e cobalto a fine simulazione raggiungono i valori più alti tra tutti gli scenari considerati, mentre nei casi BAU + one-loop e Net zero + one-loop tali quote si mantengono più basse.

Per quanto riguarda le percentuali di riciclo imposte dalla Battery Regulation, si osserva dai risultati che nel periodo intorno al 2031-2036 le quote di riciclo di litio, nickel e cobalto diminuiscono al crescere della domanda di batterie, e quindi andando dallo scenario BAU all'ICE ban. Questo fenomeno è legato alla disponibilità dei materiali da riciclare, il quale dipende dal numero di batterie giunte a fine vita, soggette a un tempo medio di utilizzo discusso in precedenza. Se il picco di domanda di nuove batterie si verifica in questa finestra temporale, la richiesta di materiali

sarà elevata, ma la disponibilità di materiale riciclato risulterà ancora insufficiente per soddisfare una quota significativa della domanda. Tali materiali diventeranno disponibili in quantità rilevanti solo dopo circa un decennio, come evidenziato dall'andamento esponenziale delle quote di riciclo nell'ultima fase della simulazione.

Pertanto, risulta evidente dai risultati della simulazione che con le politiche ICE ban, il completo rispetto delle quote obbligatorie di riciclo stabilite dalla normativa europea non sia realizzabile, a causa dello sfasamento temporale tra l'entrata in vigore degli obblighi normativi e la disponibilità effettiva dei materiali riciclati.

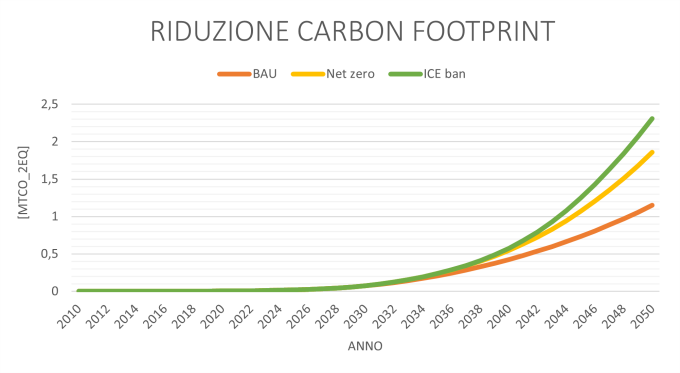


Figura 85: Carbon footprint evitata nel one-loop

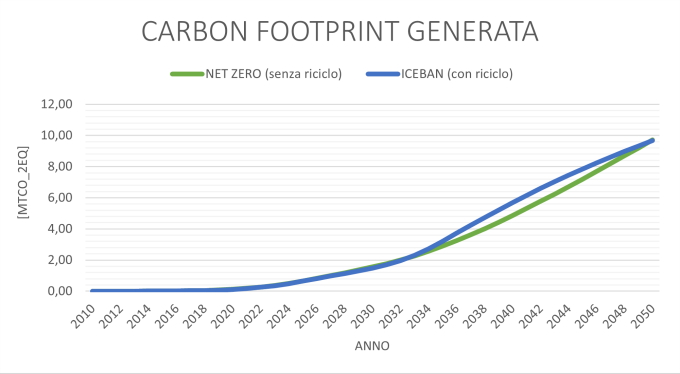


Figura 86: Carbon footprint generata a confronto (ICE Ban e Net Zero)

Confronto tra gli scenari della strategia two-loop: BAU, Net zero, ICE ban

Spostando il confronto sugli scenari in cui le batterie sono destinate al riutilizzo prima di essere riciclate (two-loop), emerge fortemente il ruolo cruciale del repurposing nel ridurre la carbon footprint complessiva.

Lo scenario BAU + two-loop mostra come anche con una crescita moderata degli EV si possano raggiungere 16.436 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate entro

il 2050. I dati evidenziano, però, che la quota di riciclo ne risente. Una parte consistente di batterie rimane in servizio all'interno delle applicazioni stazionarie e non arriva agli impianti di riciclo prima della fine della simulazione, portando a delle quote di riciclo molto basse.

Il discorso diventa più rilevante quando si passa a Net zero + two-loop, dove la diffusione dei veicoli elettrici è più rapida. Da un lato aumenta il numero di batterie che giungono al primo EOL, dall'altro una grande percentuale di queste batterie risultano idonee all'impiego stazionario. I risultati parlano di 26.905 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate al 2050. Ancora una volta, la quota di riciclo entro il 2050 risulta più contenuta, perché il ricorso alla seconda vita slitta in avanti il riciclo.

Il fenomeno raggiunge la sua massima espressione nello scenario ICE ban + two-loop, in cui l'eliminazione dei veicoli endotermici fa crescere esponenzialmente la popolazione di auto elettriche. L'effetto combinato con il repurposing fa sì che, entro il 2050, si raggiungano quasi i 32.807 milioni di tonnellate di CO_2eq evitate grazie al solo riutilizzo delle batterie in ambito BESS, a cui si aggiungono oltre circa 0.787 milioni di tonnellate risparmiate derivanti dal riciclo. Complessivamente, si arriva a più di 33.594 milioni di tonnellate di CO_2eq risparmiate, di gran lunga il valore più alto di tutti gli scenari presi in esame. Anche qui, però, la scelta di prolungare la vita delle batterie fa sì che molte non siano ancora pronte per il riciclo, abbassando di netto le quote di riciclo.

Con l'aumento delle quote di mercato dei veicoli elettrici, incrementa il numero di batterie a disposizione per usi stazionari, passando circa dalle 356 mila unità di batterie da EV convertibili in BESS nel caso BAU, fino ad arrivare alle 910 mila unità circa del caso ICE ban.

Il confronto tra gli scenari mette in luce, da un lato, l'enorme potenziale della seconda vita come soluzione per ridurre le emissioni globali di anidride carbonica e, dall'altro, il ritardo nel recupero dei materiali critici che questa strategia comporta. In un contesto di forte crescita del mercato elettrico, come negli scenari Net zero e soprattutto ICE ban, è evidente come il repurposing diventi una leva ambientale potentissima, spostando tuttavia più in là nel tempo il riciclo effettivo di numerose batterie.

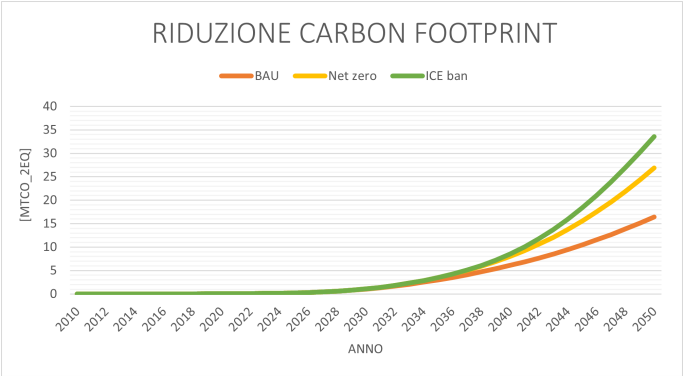


Figura 87: Carbon footprint evitata nel two-loop

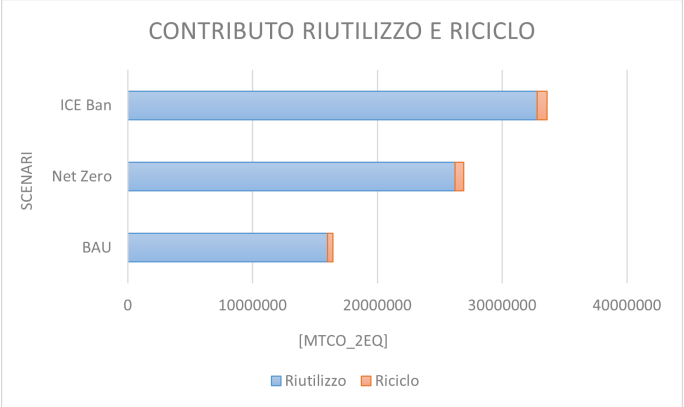


Figura 88: Contributo di riutilizzo e riciclo nel risparmio di carbon footprint

Confronti tra strategie one-loop e two-loop in ogni scenario: BAU, Net zero e ICE ban

Partendo dallo scenario con crescita EV moderata, si osserva come la presenza del repurposing faccia aumentare il risparmio di tonnellate di carbonio da 1.150 milioni di tonnellate (nel caso one-loop) a 16.436 milioni al 2050 (nel caso two-loop). Un divario così ampio è frutto del fatto che si evitano, su larga scala, nuove produzioni di batterie per i BESS, generando un vantaggio ambientale immediato. Allo stesso tempo, però, si registra una quota di riciclo più bassa, sia per gli anni della Battery regulation sia al termine della simulazione, dal momento che molte batterie restano operative nella seconda vita e non vengono ancora disassemblate e riciclate.

Il medesimo effetto si trova confrontando Net zero + two-loop e Net zero + one-loop. Nel primo caso, il risparmio complessivo di CO_2eq al 2050 sale a 26.905 milioni di tonnellate, contro i circa 1.858 milioni registrati nel one-loop. Di nuovo, gran parte di questa differenza deriva dalle emissioni evitate grazie al riutilizzo. In parallelo, si nota che le quote di riciclo non raggiungono gli stessi picchi del corrispettivo one-

loop, poiché è minore la quantità di batterie effettivamente avviata ai processi di recupero nel periodo di simulazione.

Infine, lo scenario ICE ban + two-loop mostra che al 2050 si possono raggiungere i 33.594 milioni di tonnellate circa di anidride carbonica risparmiate in totale, con un contributo preponderante (circa 32.807 milioni) dovuto al repurposing, contro i 2.307 milioni di tonnellate risparmiati dallo scenario ICE ban + one-loop. Anche qui, tuttavia, l'arrivo ritardato delle batterie al riciclo fa sì che le quote di materiali critici recuperati entro il 2050 siano più basse di quelle raggiungibili nello stesso scenario con strategia one-loop.

Considerazioni su analisi di sensitività

Approfondendo l'impatto dei ritardi logistici, è emerso che, se si annullano i delay di disassemblaggio, testing, costruzione degli impianti e trasporto, il riciclo risulta ovviamente più tempestivo e le quote di materiali riciclati tendono ad aumentare già nei primi anni di simulazione. Ciò comporta un guadagno in termini di riduzione delle emissioni e si riduce la dipendenza dall'estrazione di materie prime vergini. Da questo punto di vista, promuovere la realizzazione di impianti integrati e rendere più efficienti le fasi di logistica appare cruciale per beneficiare maggiormente di un'economia circolare.

Per quanto riguarda la sostituzione delle batterie NMC con LFP, l'analisi ha mostrato un trade-off significativo. Le batterie NMC contengono quantità maggiori di materiali critici (nickel, cobalto, litio e manganese), la cui estrazione ha un impatto ambientale più elevato rispetto al litio-ferro-fosfato (LFP). Allo stesso tempo, la presenza di questi metalli rende il riciclo molto redditizio in prospettiva circolare, poiché la percentuale di materiali critici recuperabili è più elevata. Se il mercato dovesse spostarsi in modo rilevante sulle batterie LFP, si avrebbe una riduzione delle emissioni nella fase di estrazione dei materiali, ma il riciclo risulterebbe sicuramente meno strategico per l'Unione Europea e meno vantaggioso in termini di recupero di metalli costosi e geopoliticamente critici.

Infine, si è analizzata la riduzione della probabilità di avere batterie ad alto State of Health nella valutazione dopo il primo End-of-Life. Anche in una situazione estremamente pessimista, nella quale solo il 15% delle batterie risulti idoneo al riutilizzo (invece dell'80% inizialmente studiato), il two-loop continua comunque a garantire un risparmio significativo di CO_2eq rispetto al one-loop, poiché è sufficiente quella quota ridotta di batterie di alta qualità a garantire un certo contenimento della domanda di nuove batterie per usi stazionari (BESS).

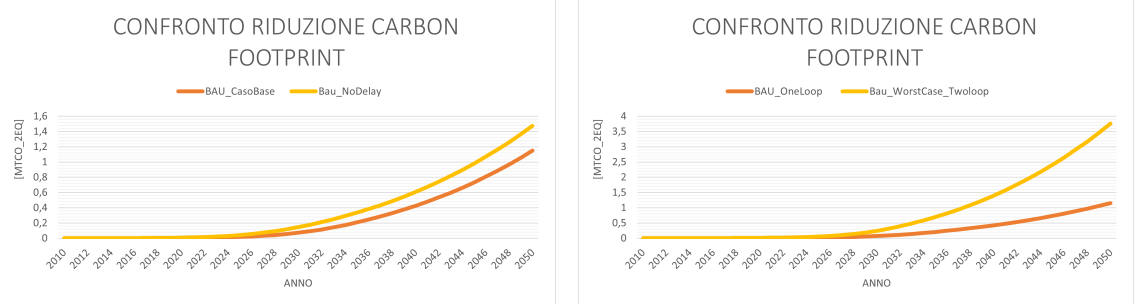


Figura 89: Confronti riduzione carbon footprint nell'analisi di sensitività

5.4 Considerazioni finali

La panoramica delineata evidenzia la differenza che si riscontra fra one-loop e two-loop all'interno di ogni scenario. Se l'obiettivo primario è ridurre la carbon footprint generata, la seconda vita delle batterie (two-loop) fornisce risultati molto favorevoli, con una diminuzione di CO_2eq che può raggiugere i 33.594 milioni circa di tonnellate entro il 2050 nello scenario ICE ban + two loop. Al contrario, se si punta al recupero immediato di materie prime critiche per cercare di soddisfare gli obblighi europei sul contenuto di materiali riciclati, allora la strategia one-loop risulta più efficace, benché rinunci a un gran potenziale di risparmio di emissioni e si vada ad investire sulle capacità di disassemblaggio/riciclo e sull'efficienza della supply chain.

Dai risultati numerici emerge in primo luogo che lo scenario two-loop assicura un considerevole vantaggio in termini di impronta di carbonio che si va ad evitare. Riutilizzare le batterie che giungono alla soglia di fine vita nel settore automotive evita la necessità di produrre ex novo un numero significativo di batterie per applicazioni stazionarie, riducendo così sia le emissioni generate dalla fase produttiva sia il fabbisogno di materie prime estratte. A differenza del one-loop, in cui le batterie vengono mandate immediatamente al riciclo, il two-loop consente di prolungare la vita utile delle batterie e di far fronte in maniera efficace alla crescente domanda di sistemi di accumulo, favorendo anche lo sviluppo delle comunità energetiche.

Un ulteriore aspetto da evidenziare è il beneficio logistico che il two-loop introduce per gli impianti di riciclo, in quanto sposta in avanti nel tempo la dismissione effettiva delle batterie. Se, da un lato, questo ritardo può rallentare la disponibilità immediata di materiale riciclato, dall'altro consente ai Paesi, agli investitori e agli operatori di settore di organizzare con maggiore calma gli investimenti nelle infrastrutture di riciclo e disassemblaggio, scongiurando il rischio di trovarsi improvvisamente a fronteggiare enormi volumi di batterie guaste. In un orizzonte reale, soprattutto nelle nazioni che ancora non dispongono di impianti adeguati, questa dilazione può dunque rappresentare un'opportunità strategica rilevante.

Parallelamente all'analisi sull'impatto ambientale, la valutazione della disponibilità di materiali critici ha tenuto conto delle quote minime di riciclo imposte dalla Battery

Regulation 1542/2023 (EU2 (2023)) per materiali critici come litio, cobalto e nickel. Gli scenari di tipo two-loop mostrano come, in determinate condizioni, tali quote possano non venire rispettate entro la fine dell'orizzonte di simulazione, poiché una parte delle batterie continua a svolgere la propria seconda vita e non rientra dunque nel flusso di riciclo prima del 2050. La conseguenza è che lo sfasamento temporale tra il momento dell'immissione sul mercato della batteria nel EV e il recupero dei materiali critici si allunga.

Al contrario, negli scenari one-loop il rispetto delle quote obbligatorie risulta maggiore, in quanto il riciclo scatta immediatamente e su un numero elevato di batterie. Tuttavia, questo vantaggio nel cercare di raggiungere questi obiettivi normativi presenta un costo ambientale non trascurabile. Rinunciando alla seconda vita delle batterie, con un'analisi sistematica che è necessaria quando si tratta la carbon footprint, si emette molta più CO_2eq nel lungo periodo.

Un ulteriore aspetto che emerge è la tendenza della quota di riciclo a crescere nel tempo (dopo il periodo 2036) con l'aumentare della penetrazione dei veicoli elettrici. All'aumentare del numero complessivo di batterie introdotte sul mercato, cresce inevitabilmente lo stock di batterie che, a distanza di alcuni anni, giunge a fine vita e diventa disponibile per il riciclo. La rapidità con cui si riescono a riciclare materiali da batterie guaste, sul lungo periodo, supera il tasso di crescita del mercato automotive. Questo spiega perché negli scenari Net zero o ICE ban (dove la penetrazione EV accelera notevolmente) le quote di materiali riciclati finiscono per salire di più rispetto allo scenario BAU.

Lo studio delle diverse combinazioni mette in luce un trade-off rilevante fra raggiungere rapidamente alte quote di riciclo e prolungare la vita utile delle batterie per abbattere l'impronta di carbonio.

Il quadro emerso dai risultati numerici evidenzia come l'adozione del repurposing nei contesti di crescita rapida del mercato dei veicoli elettrici (Net zero e ICE ban) generi risparmi di CO_2eq estremamente significativi. L'unico aspetto negativo rispetto alla strategia one-loop è la velocità con cui si reintroducono nell'economia i materiali critici riciclati, potenzialmente minando il rispetto immediato di certe quote obbligatorie. In prospettiva, andando oltre allo scenario di simulazione di 40 anni, quando le batterie giungeranno alla seconda fine vita, si potrà comunque recuperare una gran massa di materiali, stavolta con un vantaggio ambientale già incassato lungo il percorso. La scelta tra one-loop e two-loop, dunque, non è solo tecnologica ed ambientale, ma anche politico-economica. Da un lato, la necessità di realizzare un'economia circolare che dia a disposizione materiali critici riciclati nel più breve tempo possibile, cercando di rendersi indipendente dall'estrazione di materiali in luoghi con situazioni geopolitiche critiche, dall'altro lato il desiderio di ridurre la carbon footprint, spalmandone i benefici in un orizzonte temporale più lungo.

Secondo Digitale (2024) la Cina detiene circa il 90% della capacità di lavorazione delle terre rare, un monopolio che rappresenta un rischio strategico per l'Occidente,

poiché questi materiali sono essenziali per tecnologie avanzate come veicoli elettrici, smartphone e sistemi militari. La forte concentrazione della produzione espone le nazioni europee a potenziali interruzioni delle forniture, specialmente in periodi di tensioni geopolitiche, come dimostrato nel 2010, quando la Cina sospese temporaneamente le esportazioni di terre rare al Giappone. Per ridurre questa dipendenza, l'Unione Europea ha introdotto il ***Critical Raw Materials Act*** (CRMA), una strategia volta a potenziare la capacità estrattiva, di lavorazione e di riciclo all'interno dell'UE, promuovendo al contempo accordi commerciali con partner affidabili. (EU2 (2024)). Tuttavia, la costruzione di una filiera autonoma richiede ingenti investimenti e tempi prolungati, mentre la Cina continua a consolidare il proprio controllo sulle risorse interne. Il CRMA mira a rafforzare l'autonomia dell'UE nel settore delle batterie e delle tecnologie rinnovabili, riducendo il rischio di dipendenza da fornitori esterni e garantendo maggiore stabilità economica in un contesto geopolitico sempre più complesso.

Entrambi gli approcci presentano vantaggi e svantaggi, ma nel quadro complessivo il two-loop si distingue per l'ampiezza dei benefici ambientali, per la diminuzione dei volumi di produzione ex novo di BESS (necessarie per lo sviluppo di comunità energetiche rinnovabili) e per il maggiore tempo offerto ai Paesi per costruire infrastrutture di riciclo adeguate.

Tuttavia, l'evidenza che le quote di riciclo possano non essere pienamente rispettate solleva la necessità di riconsiderare la formulazione degli obblighi normativi, valorizzando in modo adeguato il contributo ambientale del repurposing. Un approccio ibrido, in cui vengano definite soglie minime di riciclo che tengano conto del fatto che una parte delle batterie viene destinata alla seconda vita, e quindi entrerà nella fase di riciclo in un periodo successivo, affiancato da obiettivi specifici per la promozione del repurposing, potrebbe rappresentare una soluzione più equilibrata ed ambientalmente positiva per la transizione verso un modello di economia circolare.

In definitiva, i risultati mostrano come, in un futuro oltre lo scenario di simulazione, caratterizzato da un ampia diffusione di veicoli elettrici, la combinazione di repurposing e riciclo appaia la strategia più virtuosa per seguire gli obiettivi ambientali e svincolarsi dall'estrazione di materie prime vergini. Promuovere la seconda vita delle batterie e consolidare, al tempo stesso, le infrastrutture di riciclo a livello italiano e non solo, permette di ridurre la carbon footprint generata e di sviluppare un modello di economia circolare, riuscendo a fronteggiare le crescenti sfide ambientali, economiche e tecnologiche del settore della mobilità elettrica.

5.5 Limitazioni del modello e dei risultati

Il modello sviluppato nella tesi presenta alcune limitazioni che possono influenzare l'accuratezza delle previsioni e l'affidabilità delle conclusioni. Una delle principali semplificazioni riguarda l'utilizzo di dati provenienti da studi condotti in Svizzera per la stima della vita media delle batterie che devono ancora raggiungere l'End-of-

Life. Inoltre, il modello assume un comportamento omogeneo per tutte le tipologie di veicoli elettrici, senza distinguere tra differenti segmenti di mercato, come auto, furgoni, autobus e veicoli commerciali, che potrebbero presentare cicli di vita e tassi di sostituzione differenti. Un ulteriore elemento non considerato riguarda l'incidenza di barriere psicologiche o economiche legate all'adozione dei veicoli elettrici, come la percezione dei prezzi elevati, la disponibilità delle infrastrutture di ricarica e la fiducia nella durata delle batterie, fattori che potrebbero ostacolare la transizione alla mobilità elettrica.

La modellazione del fine vita delle batterie non considera, inoltre, differenze nella durata operativa tra le chimiche NMC e LFP. Questa assunzione potrebbe portare a un disallineamento della quantità di batterie disponibili per il repurposing e il riciclo. Un'altra ipotesi riguarda l'assenza di flussi di esportazione/importazione delle batterie a fine vita, ipotizzando che l'intero ciclo di gestione avvenga all'interno dei confini nazionali. Tuttavia, il commercio internazionale delle batterie esauste rappresenta un aspetto rilevante, influenzato da regolamentazioni ambientali e strategie industriali delle aziende del settore.

Dal punto di vista operativo, il modello assume che la capacità di disassemblaggio e riciclo sia sempre sufficiente a trattare tutte le batterie disponibili, trascurando eventuali vincoli infrastrutturali e possibili colli di bottiglia nel trattamento delle batterie giunte a fine vita. Viene utilizzato un delay medio di 3 anni per considerare eventuali investimenti e tempi di costruzione per gli impianti. Nella realtà attuale, la capacità di disassemblaggio e riciclo non è elevata, che potrebbe portare a rallentamenti importanti nel fine vita delle batterie elettriche. Per questo è necessario un'analisi ulteriore che mira a studiare il rapporto tra la capacità industriale e la domanda di batterie, con conseguenti risultati su investimenti in capacità. Inoltre, i ritardi logistici e di processo, sebbene considerati nel modello, non includono la possibilità di interruzioni nella catena di fornitura, dovuta a possibili effetti frusta che derivano da una supply chain non coordinata, che potrebbero alterare la disponibilità di materiali critici riciclati nel breve-medio termine.

Un altro aspetto non approfondito riguarda la variabilità della qualità delle batterie a fine vita. Il modello assume una distribuzione fissa tra batterie di alta e bassa qualità al momento della valutazione, ma nella realtà questa proporzione potrebbe evolvere nel tempo a seguito di miglioramenti tecnologici delle batterie.

L'analisi economica rappresenta un ulteriore elemento di miglioramento del modello, in quanto lo studio si focalizza sugli aspetti ambientali e sulle emissioni di carbon footprint, senza integrare una valutazione dettagliata dei costi delle diverse strategie di End-of-Life. Un'analisi costo-beneficio più approfondita potrebbe fornire indicazioni più precise sulla convenienza relativa tra riciclo e riutilizzo, considerando anche le potenziali variazioni nei prezzi delle materie prime critiche nel lungo periodo.

Non sono stati presi in considerazione gli impatti ambientali, in termini di carbon footprint, che possono derivare dalle operazioni di riciclo e di conversione delle batterie EV in BESS.

Infine, la ricerca potrebbe beneficiare di un'analisi più dettagliata del ciclo di vita delle batterie attraverso un approccio di Life Cycle Assessment, in grado di quantificare gli impatti ambientali lungo l'intera catena del valore. L'evoluzione delle tecnologie di riciclo rappresenta un altro elemento di incertezza, in quanto gli attuali processi potrebbero essere sostituiti da metodologie più efficienti, alterando le previsioni sulle quote di recupero dei materiali critici e sull'impronta di carbonio associata ai diversi scenari analizzati.

6 Conclusioni

La gestione dell'end-of-life delle batterie agli ioni di litio nei veicoli elettrici sta assumendo un ruolo cruciale nell'attuale panorama industriale ed energetico, in un contesto normativo di crescita esponenziale delle immatricolazioni di auto elettriche. Questa tesi ha indagato, attraverso un modello di System Dynamics realizzato con il software AnyLogic, due principali strategie di fine vita: il riciclo immediato (one-loop) e il riutilizzo in applicazioni stazionarie con successivo riciclo (two-loop). L'analisi ha evidenziato un equilibrio delicato fra l'esigenza di recuperare in tempi rapidi materiali critici (così da soddisfare le quote obbligatorie di riciclo imposte dal Regolamento UE 1542/2023) e la volontà di allungare il ciclo di vita delle batterie in un secondo impiego stazionario, che genera benefici in termini di risparmio di emissioni di CO_2eq.

Nel dettaglio, la scelta della strategia one-loop si traduce in un recupero immediato di materiali critici come litio, nickel e cobalto, andando a ridurre la domanda di materie prime vergini da dover estrarre in tempi brevi e rendendo il sistema più efficace nel rispettare senza ritardi i target di riciclo europei sempre più stringenti. Questo approccio si basa fortemente sul CRMA (Critical Raw Materials Act), che mira a ridurre la vulnerabilità degli approvvigionamenti potenziando filiere estrattive, impianti di raffinazione e infrastrutture di riciclo all'interno dell'Unione Europea. Tuttavia, recuperare i materiali il prima possibile significa rinunciare al secondo ciclo di vita delle batterie, rappresentato da un loro riuso nelle applicazioni stazionarie (BESS). Le batterie, con un adeguato stato di salute residuo, potrebbero infatti essere valorizzate in accumuli domestici o industriali, abbattendo la necessità di produrre ex-novo delle unità dedicate agli impianti di accumulo e generando un impatto ambientale globale notevolmente inferiore. Nella strategia two-loop infatti si accetta di posticipare il flusso di materiali critici verso le industrie di riciclo, ma si sfrutta il potenziale residuo di capacità, andando a prolungare il ciclo di vita delle batterie e riducendo la produzione ex novo di BESS. Si offre, in questo modo, un vantaggio sociale (stimolando la crescita delle comunità energetiche rinnovabili) ed ecologico (riducendo l'impronta di carbonio generata in questi settori), a costo di tempi più lunghi per soddisfare le quote minime di riciclo.

La modellazione, condotta su diversi scenari di crescita del settore dei veicoli elettrici, ha messo in luce come il dilemma fra scegliere un recupero immediato di materie prime e optare per un sistema di estensione del ciclo di vita diventi ancora più cruciale in scenari fortemente espansivi del mercato EV. Poiché i volumi di batterie esauste sono ingenti, la disponibilità di materiali critici recuperati dal riciclo diretto crescerebbe considerevolmente, ma a scapito del potenziale di riutilizzo. Viceversa, puntare in via prioritaria sul second-life posticipa la disponibilità di nickel, litio e cobalto, rendendo più arduo centrare le percentuali di riciclo richieste dal regolamento europeo nei tempi previsti. È importante comunque notare che tale ritardo può talvolta essere un vantaggio strategico, concedendo tempo a investitori e operatori di filiera di allestire infrastrutture di disassemblaggio e di riciclo avanzato, che a regime potrebbero ridurre sensibilmente costi operativi e impatti ambientali (ad esempio

aumentando l'efficienza di recupero degli impianti). Infatti un ulteriore aspetto critico riguarda i possibili ritardi nella creazione di centri di disassemblaggio e di riciclo, dovuti ai tempi necessari per investire e costruire infrastrutture adeguate, formare il personale e ottenere le relative autorizzazioni. Questi ritardi impiantistici possono rallentare l'afflusso di batterie verso il riciclo e posticipare il recupero effettivo di materiali strategici, rendendo più complesso raggiungere tempestivamente le quote previste dal Regolamento UE.

Un ulteriore aspetto riguarda il progressivo aumento di batterie LFP, che, escludendo nickel, cobalto e manganese dalla loro composizione chimica, presentano un valore inferiore sul fronte del riciclo, ma al tempo stesso riducono la dipendenza dell'UE da una catera di fornitura molto critica e instabile. Vi è inoltre una riflessione sulle tempistiche della supply chain, infatti trasporto, testing delle batterie e i ritardi di processo impattano sensibilmente la rapidità con cui le batterie finiscono nei flussi di riciclo e di riutilizzo, evidenziando la necessità di una supply chain coordinata ed efficiente per non rallentare la disponibilità di materie prime riciclate o di batterie EV da convertire in BESS.

Un aspetto fondamentale dello studio è l'adozione di un sistema chiuso, in cui tutte le batterie immesse sul mercato nazionale vengono gestite all'interno dello stesso Paese lungo l'intero EOL. Questo approccio mira a rispondere alle quote obbligatorie di riciclo imposte dall'UE esclusivamente con le proprie forze, favorendo un modello realmente circolare che rispecchia gli obiettivi del CRMA. Se applicato su larga scala, un sistema di questo tipo renderebbe l'Italia non solo più autonoma nell'approvvigionamento di risorse strategiche, ma costituirebbe anche un esempio virtuoso per altri Paesi interessati a coniugare le quote di riciclo richieste dalle norme europee con una gestione efficiente ed ecologicamente sostenibile del fine vita delle batterie.

Questa ricerca offre diversi spunti per futuri approfondimenti. Si potrebbe analizzare con maggior dettaglio l'intera filiera di riciclo, valutando limiti impiantistici e logistici (costi, tempi di costruzione, capacità operativa), eventualmente integrando un'analisi di Life Cycle Assessment che includa ulteriori impatti oltre alle emissioni climalteranti (come il consumo idrico o la tossicità). Un altro possibile sviluppo riguarda l'integrazione di nuove chimiche di batteria, ad esempio allo stato solido o al sodio, per comprendere come cambierebbe il bilanciamento tra riciclo immediato e riutilizzo. Sarebbe poi interessante confrontare il modello "isolato" con scenari internazionali, introducendo import ed export di batterie esauste o di materiali riciclati, al fine di valutare la circolarità complessiva su scala europea.

In conclusione, risulta chiaro come uno scenario completamente orientato al riciclo (one-loop) possa assicurare un rapido raggiungimento dei target di riciclo di materiali, ma rischi fortemente di tralasciare opportunità di riduzione dell'impronta di carbonio offerta dal second-life delle batterie. D'altro canto, un modello basato sul repurposing e sul successivo riciclo (two-loop) implica un maggior risparmio di emissioni, ma ritarda in modo significativo il recupero dei materiali, rendendo difficile soddisfare le soglie minime di riciclo fissate nel breve-medio periodo. Nel lungo

periodo infatti, questi materiali saranno comunque riciclati e rientreranno nella filiera produttiva, ma ciò avverrà con un ulteriore ritardo dato dalla vita media del second-life. La presente ricerca suggerisce un approccio ibrido, in cui siano previste soglie minime di riciclo, calibrate sul fatto che una parte delle batterie sarà destinata a una seconda vita e quindi entrerà nel processo di riciclo in una fase successiva. A queste soglie minime andrebbero affiancati obiettivi specifici per incentivare il repurposing, così da favorire una soluzione più equilibrata e vantaggiosa dal punto di vista ambientale, sostenendo la transizione verso un modello di economia circolare. L'implementazione di investimenti mirati (su infrastrutture e logistica), la promozione di tecnologie di riciclo sempre più efficienti e la pianificazione strategica dell'intera filiera end-of-life possono consentire di cogliere simultaneamente i benefici di circolarità e sicurezza degli approvvigionamenti, minimizzando allo stesso tempo l'impatto ambientale complessivo.

A Appendice supplementare

A.1 Funzione Delay

AnyLogic fornisce la funzione delay per introdurre un ritardo temporale tra l'ingresso e l'uscita di un flusso di dati o materiali all'interno di un modello di simulazione. Nella sua configurazione standard, la funzione delay applica un ritardo fisso, determinato dall'utente, prima di trasferire un input al relativo output. La funzione delay3 rappresenta un'estensione avanzata della funzione di ritardo standard, in quanto non si limita a introdurre un ritardo fisso, ma distribuisce l'uscita lungo un intervallo temporale mediante una coda di ordine tre. Questa caratteristica consente di modellare in modo più realistico fenomeni che non avvengono istantaneamente, bensì in maniera progressiva, come il degrado dei materiali o di sistemi fisici e biologici. La funzione delay di AnyLogic prende in input due parametri principali. Il primo è la quantità che si desidera ritardare prima che venga rilasciato in uscita dallo stock. Il secondo è un parametro temporale, che specifica la durata del ritardo e deve essere espresso nella stessa unità di misura del tempo adottata nella simulazione. Ad esempio, se il ritardo previsto è di 10 giorni e l'unità temporale della simulazione è in anni, il valore da assegnare è 10./365, in modo da mantenere la coerenza delle unità di misura all'interno del modello.

Nella modellazione, la scelta della funzione di ritardo temporale dipende dalla natura del flusso considerato.

Per i flussi in cui il materiale viene spostato in blocco dopo un intervallo di tempo definito, come per esempio il trasporto logistico o il tempo per eseguire un'operazione, si utilizza la funzione delay. Questo approccio è adatto ai casi in cui il flusso segue una logica deterministica, in cui tutto il materiale coinvolto viene trasferito simultaneamente dopo un tempo predefinito.

Nei casi in cui i flussi siano governati da funzioni probabilistiche e ritardi medi, come la vita utile delle batterie, è invece più appropriato l'uso della funzione delay3. Questa funzione consente di modellare un ritardo distribuito, riflettendo una dinamica più realistica. Infatti, quando si considera un parametro come la vita media di una batteria, non tutte le unità raggiungono il fine vita nello stesso istante, ma il degrado avviene in modo graduale nel tempo. L'uso della funzione delay3 permette quindi di ottenere un'uscita del flusso più fluida, evitando un comportamento irrealistico in cui tutte le batterie cessano simultaneamente di funzionare.

Nella modellazione, l'uso della funzione delay in AnyLogic per ritardare l'uscita di una quantità dello stock può generare un problema di doppio conteggio, che porta a una sovrastima della capacità effettivamente disponibile nel sistema. Questo errore si verifica quando, a ogni passo temporale, il modello calcola nuovamente la quota dello stock da far uscire in futuro, senza considerare che una parte dello stock è già stata assegnata a flussi di uscita futuri.

Il problema può essere illustrato con un esempio intuitivo. Supponiamo di avere uno stock iniziale di 10 unità e di voler modellare un'uscita ritardata di due anni, assumendo che tutto lo stock debba uscire alla fine del periodo. Al primo anno, viene calcolato che tutte le 10 unità dovranno uscire tra due anni, ma nel frattempo nessun nuovo flusso entra, quindi lo stock rimane invariato. Al secondo anno, il modello ricalcola l'uscita futura, osserva ancora uno stock di 10 unità e determina nuovamente che tutte le 10 unità dovranno uscire tra due anni. Tuttavia, questo calcolo è sbagliato, perché le 10 unità che sono appena state calcolate sono già state "prenotate in uscita" l'anno precedente, e non dovrebbero essere riconsiderate nel nuovo calcolo. Questa logica si ripete ogni anno, generando un doppio conteggio progressivo che sovrastima il flusso di uscita e distorce la quantità di capacità effettivamente disponibile nel sistema.

Per le ragioni illustrate, ogni volta che si utilizza un delay per un determinato flusso, è fondamentale strutturare il modello in modo che l'input della funzione delay faccia riferimento direttamente al flusso in ingresso allo stock. In questo modo, il flusso che entra nello stock verrà rilasciato totalmente o parzialmente con un ritardo predefinito, evitando così problemi di doppio conteggio e sovrastima delle capacità all'interno del sistema. Ciò consente di preservare la coerenza del modello e di evitare accumuli errati di capacità dovuti a doppi conteggi.

A.2 Distribuzione di Weibull

La distribuzione di Weibull, introdotta dal matematico svedese Waloddi Weibull nel 1939, è una delle distribuzioni di probabilità più impiegate nell'analisi dell'affidabilità e della durata di vita dei sistemi. E' stata inizialmente utilizzata per modellare la resistenza meccanica dei materiali, ma la sua versatilità ne ha consentito un'applicazione in numerosi campi dell'ingegneria e delle scienze applicate. La distribuzione di Weibull è particolarmente adatta per descrivere il comportamento dei sistemi soggetti a fenomeni di deterioramento nel tempo, permettendo di modellare sia fasi di guasto precoce, sia periodi di funzionamento stabile, sia fasi di usura accelerata (Lai et al. (2006)).

La distribuzione di Weibull con due parametri è definita dalla funzione di distribuzione cumulativa seguente:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta}\right]$$

dove $\lambda > 0$ rappresenta il parametro di scala, $\beta > 0$ il parametro di forma. La funzione di densità di probabilità associata è data da:

$$f(t) = \frac{\beta}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta}\right]$$

Una delle caratteristiche fondamentali della distribuzione di Weibull risiede nella funzione di tasso di guasto (hazard rate), definita come:

$$h(t) = \frac{\beta}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1}. \tag{29}$$

Il comportamento della funzione di tasso di guasto dipende dal valore del parametro di forma β:

- $\beta < 1$: il tasso di guasto è decrescente, suggerendo un'elevata incidenza di guasti iniziali che si riducono nel tempo, fenomeno tipico dell'infant mortality phase nei sistemi elettronici;
- $\beta = 1$, il tasso di guasto è costante, modellando un processo in cui il rischio di guasto è indipendente dal tempo di esercizio;
- $\beta >1$, il tasso di guasto è crescente, indicando un fenomeno di deterioramento nel tempo, caratteristico di componenti soggetti a fenomeni di usura.

Valore atteso e varianza

La distribuzione di Weibull è caratterizzata da proprietà matematiche che la rendono particolarmente adatta per l'analisi dell'affidabilità. Il valore atteso e la varianza sono espressi come:

$$E(T) = \lambda\Gamma(1 + 1/\beta) \tag{30}$$

$$V(T) = \lambda^2\left[\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)\right] \tag{31}$$

dove Γ rappresenta la funzione Gamma.

Applicazioni nei vari settori scientifici

Le applicazioni della distribuzione di Weibull sono numerose e trasversali a diversi settori dell'ingegneria e delle scienze applicate. Nell'ambito dell'affidabilità, essa è utilizzata per la modellazione della durata di vita di componenti meccanici, elettronici e strutturali, oltre alla previsione dei guasti nei sistemi complessi. Nella

manutenzione preventiva, la distribuzione consente di ottimizzare le strategie di sostituzione programmata dei componenti, riducendo i costi di fermo macchina e migliorando l'efficienza operativa. In ambito economico e finanziario, è impiegata per modellare il tempo di default di strumenti finanziari e il ciclo di vita dei prodotti. Nelle scienze ambientali, trova applicazione nell'analisi della distribuzione delle velocità del vento per la progettazione di impianti eolici, nella modellazione di eventi sismici e nell'analisi della sopravvivenza delle specie biologiche. Infine, in ambito medico, la distribuzione è ampiamente utilizzata negli studi di sopravvivenza, consentendo di modellare la durata della vita dei pazienti affetti da determinate patologie e di valutare l'efficacia di trattamenti terapeutici (Lai et al. (2006)).

Calcolo vita media delle batterie

Per stimare la vita media attesa delle batterie agli ioni di litio nel settore automobilistico, sono stati utilizzati i parametri di scala e di forma della distribuzione di Weibull forniti da Seika, Kubli (2024). In particolare, il valore atteso della durata delle batterie (Average Lifespan) è stato calcolato con la formula 30, mediante la funzione Gamma. I valori dei parametri erano raggruppati in 5 anni ed arrivavano fino al 2040. Tali parametri sono stati impiegati per stimare il valore atteso della durata operativa delle batterie nel periodo considerato. Per il decennio successivo, dal 2040 al 2050, i valori dei parametri sono stati stimati basandosi sull'analisi delle tendenze osservate nei dati storici. In particolare, l'analisi ha evidenziato una crescita del parametro di scala nel tempo con un andamento caratterizzato da rendimenti decrescenti. Questo fenomeno può essere interpretato alla luce della legge dei rendimenti marginali decrescenti, secondo cui, all'aumentare di un input (in questo caso l'innovazione tecnologica applicata alle batterie), il miglioramento marginale ottenuto tende a ridursi nel tempo.

Tabella 52: Parametri aggregati della distribuzione di Weibull per periodi di 5 anni

Periodo	**Scale λ**	**Shape β**	**Average Lifespan**
2010-2014	5.23	5	4.802
2015-2019	7.12	5	6.537
2020-2024	9.02	5	8.282
2025-2029	10.44	5	9.586
2030-2034	11.41	5	10.476
2035-2039	11.88	5	10.908
2040-2044	12.00	5	11.018
2045-2050	12.10	5	11.110

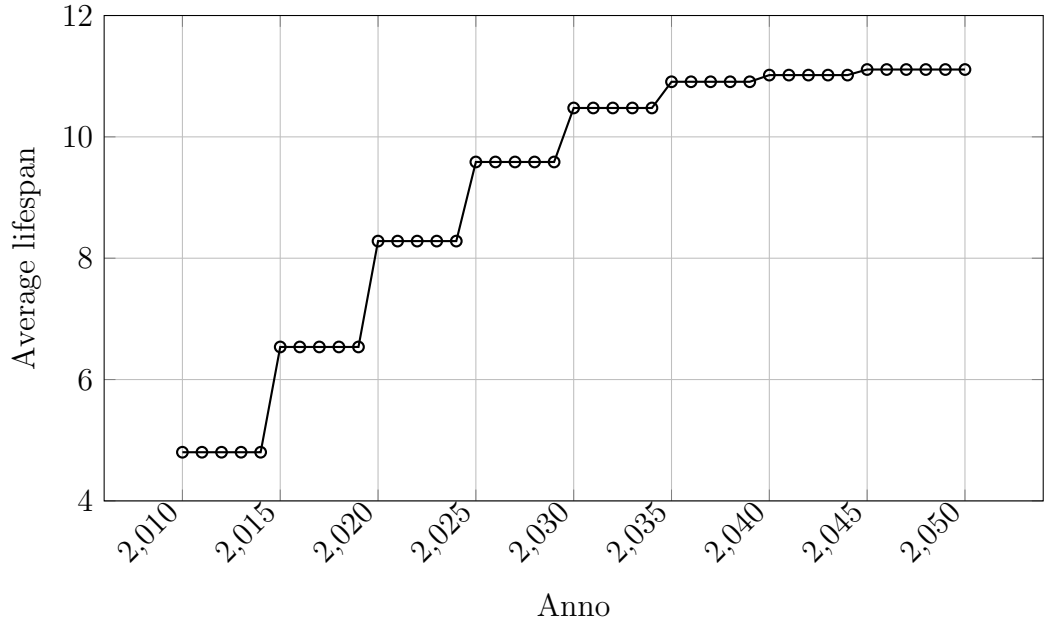


Figura 90: Average lifespan nel periodo di simulazione

La Funzione Gamma

La funzione gamma, indicata con il simbolo $\Gamma(x)$, è una funzione matematica che rappresenta una generalizzazione del concetto di fattoriale ai numeri reali e complessi. È definita per numeri reali positivi come:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt, \quad x > 0. \tag{32}$$

Questa espressione è una forma continua del fattoriale, infatti, per numeri interi positivi n, si ha la relazione:

$$\Gamma(n) = (n-1)! \tag{33}$$

La funzione gamma trova applicazione in molte aree della matematica applicata, tra cui la teoria delle probabilità e la statistica, in particolare nelle distribuzioni di probabilità che coinvolgono espressioni di tipo esponenziale e polinomiale. Essa è alla base di numerose distribuzioni di probabilità, tra cui la distribuzione di Weibull, ed è utilizzata per il calcolo delle statistiche descrittive di questa distribuzione. L'uso della funzione gamma nella distribuzione di Weibull permette di ottenere espressioni analitiche per media e varianza della distribuzione senza dover eseguire esplicitamente l'integrazione della funzione di densità di probabilità (Lai et al. (2006)).

Riferimenti bibliografici

Regolamento (UE) 2023/1542 sulle batterie e i rifiuti di batterie. 2023.

Regolamento (UE) 2024/1252: Quadro per un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche. 2024.

ACCA Software . Requisiti per installare impianti fotovoltaici: aspetti tecnici, vincoli e autorizzazioni. 2024.

BFS & ASTRA . Strassenfahrzeuge – neue Inverkehrsetzungen. 2023.

Baars J., Domenech T., Bleischwitz R., Melin H. E., Heidrich O. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials // Nature Sustainability. 2020. 4, 1. 71–79.

Bianchetti R., Althaus H., Cox B., Truninger L., Meyer I., Marmy C., Büchel A., Gassler M., Hischier R., Wäger P. Batterien für Elektrofahrzeuge. 2023.

Bruno Martina, Fiore Silvia. Material Flow Analysis of Lithium-Ion Battery Recycling in Europe: Environmental and Economic Implications // Batteries. 2023. 9, 231.

Bruno Martina, Fiore Silvia. Review of lithium-ion batteries' supply-chain in Europe: Material flow analysis and environmental assessment // Journal of Environmental Management. 2024. 358. 120758.

Creutzig Felix, Jochem Patrick, Edelenbosch Oreane Y., Mattauch Linus, Vuuren Detlef P. van, McCollum David, Minx Jan. Transport: A roadblock to climate change mitigation? // Science. 2015. 350, 6263. 911–912.

Digitale Redazione Agenda. Terre rare, Occidente dipendente dalla Cina: un rischio geopolitico // Agenda Digitale. 2024.

Dunn Jessica, Kendall Alissa, Slattery Margaret. Electric vehicle lithium-ion battery recycled content standards for the US – targets, costs, and environmental impacts // Resources, Conservation & Recycling. 2022. 185. 106488.

ENEA . Materie Prime Principali e Critiche nelle Batterie agli Ioni. 2020.

ENEA . Guida Operativa alle Comunità Energetiche. 2023.

Europe SolarPower. European Market Outlook for Battery Storage 2024-2028. June 2024.

European Alternative Fuels Observatory (EAFO) . Italy - Infrastructure. 2024.

European Alternative Fuels Observatory (EAFO) . Vehicles and fleet. 2025.

European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) . Economic and Market Report: Global and EU Auto Industry – Full Year 2023. III 2024.

European Commission . Solar Energy - Renewable Energy. 2024.

Gong Wenjing T., Daigo Ichiro, Dunuwila Pasan, Sun Xin. The change of material flows and environmental impacts along with future upgrading scenarios of NCM battery in China // Journal of Cleaner Production. 2024. 463. 142758.

Gonzales-Calienes Giovanna, Kannangara Miyuru, Bensebaa Farid. Economic and Environmental Viability of Lithium-Ion Battery Recycling—Case Study in Two Canadian Regions with Different Energy Mixes // Batteries. 2023. 9, 375.

Gu X., Ieromonachou P., Zhou L., Tseng M. Developing pricing strategy to optimise total profits in an electric vehicle battery closed loop supply chain // Journal of Cleaner Production. 2018. 203. 376–385.

Gutsch Moritz, Leker Jens. Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries – From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling // Applied Energy. 2024. 353. 122132.

International Energy Agency (IEA) . Batteries and Secure Energy Transitions. 2023a.

International Energy Agency (IEA) . Global EV Outlook 2023 - Executive Summary. 2023b.

Joachimsthaler Charlotte, Jarmer Jan-Philipp. Modeling the Environmental Impact of Reverse Logistics for Traction Batteries // IEEE. 2024.

Kamath D., Moore S., Arsenault R., Anctil A. A system dynamics model for end-of-life management of electric vehicle batteries in the US: Comparing the cost, carbon, and material requirements of remanufacturing and recycling // Resources, Conservation and Recycling. 2023. 196. 107061.

Lai Chin-Diew, Murthy D.N. Pra, Xie Min. Weibull Distributions and Their Applications. 2006. 63–76.

Lohum . Factors Influencing Longevity of Lithium-Ion Batteries. 2024.

Nurdiawati A., Agrawal T. K. Creating a circular EV battery value chain: End-of-life strategies and future perspective // Resources, Conservation and Recycling. 2022. 185. 106484.

Nuss Philip, Eckelman Matthew J. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis // PLOS ONE. 2014. 9, 7. e101298.

Olivetti E. A., Ceder G., Gaustad G. G., Fu X. Lithium-Ion battery supply chain considerations: Analysis of potential bottlenecks in critical metals // Joule. 2017. 1, 2. 229–243.

Powy Energy . Incentivi Auto Elettriche Italia 2025. 2024.

Prognos TEP Energy Infras Ecoplan . Energieperspektiven 2050+ Szenarienergebnisse. March 2021.

Re-Bat . Recupero Batterie Litio: Sostenibilità e Risparmio. 2024.

Richa K., Babbitt C. W., Gaustad G., Wang X. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles // Resources, Conservation and Recycling. 2014. 83. 63–76.

Rosenberg S., Glöser-Chahoud S., Huster S., Schultmann F. A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling – A case study of an OEM in Germany // Waste Management. 2023a. 160. 12–22.

Rosenberg Sonja, Kurz Leonard, Huster Sandra, Wehrstein Steven, Kiemel Steffen, Schultmann Frank, Reichert Frederik, Wörner Ralf, Glöser-Chahoud Simon. Combining dynamic material flow analysis and life cycle assessment to evaluate environmental benefits of recycling – A case study for direct and hydrometallurgical closed-loop recycling of electric vehicle battery systems // Resources, Conservation & Recycling. 2023b. 198. 107145.

Seika Juliane, Kubli Merla. Repurpose or recycle? Simulating end-of-life scenarios for electric vehicle batteries under the EU battery regulation // Sustainable Production and Consumption. 2024. 51. 644–656.

StartupItalia . Geografia e Geopolitica delle Terre Rare: Cobalto, Nichel e Litio, ecco come la Cina se le è accaparrate. 2024.

Statista . Passenger Cars in Italy - Statistics & Facts. 2023.

Sustainable Ships . EV Battery Prices Plunge 89% in Ten Years. 2021.

Terna S.p.A. . Gestione delle Anagrafiche Uniche degli Impianti (Gaudì). 2025.

Zhu J., Mathews I., Ren D., Li W., Cogswell D., Xing B., Sedlatschek T., Kantareddy S. N. R., Yi M., Gao T., Xia Y., Zhou Q., Wierzbicki T., Bazant M. Z. End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries // Cell Reports Physical Science. 2021. 2, 8. 100537.