



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Novembre 2024

Tesi di Laurea di II livello

**Confronto dei costi del ciclo di vita
tra un trattore termico e uno
ibrido-elettrico
mediante la tecnica del Life Cycle
Costing Assesment**

Relatori:

Scellato Giuseppe
Somà Aurelio

Candidata:

Gasparroni Michela

*“La conoscenza
è il tesoro più prezioso
che l'uomo possa possedere”*

INDICE

PRIMO CAPITOLO: INTRODUZIONE.....	4
SECONDO CAPITOLO: LIFE CYCLE COST ANALYSIS	
2.1 Aspetti metodologici dell'approccio Life Cycle Costing.....	8
2.2 Categorie e voci di costo per l'analisi LCC.....	12
2.3 LCA: Life Cycle Assesment.....	14
2.4 Prospetto comparativo tra le due analisi.....	17
2.5 Analisi della letteratura.....	19
2.6 Studi LCC applicati al mondo agricolo.....	27
TERZO CAPITOLO: ANALISI DEI COSTI APPLICATA AL TRATTORE DA FRUTTETO TRADIZIONALE E AL TRATTORE IBRIDO	
3.1 Sistema di riferimento e functional unit.....	30
3.2 Life cycle inventory- trattore tradizionale	32
3.3 Trattore con componente ibrida: produzione, vita utile e fine vita.....	46
3.4 Batteria: scenario di riciclo e scenario di second life.....	51
QUARTO CAPITOLO: ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	
4.1 Risultati delle varie analisi.....	54
4.2 Analisi di sensitività.....	57
QUINTO CAPITOLO: CONCLUSIONI.....	69
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	72
RINGRAZIAMENTI.....	75

PRIMO CAPITOLO

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, il settore agricolo ha affrontato una crescente pressione per migliorare l'efficienza operativa ed economica e la sostenibilità ambientale. I trattori, macchine fondamentali per molte operazioni agricole, rappresentano una delle principali voci di investimento e di costo per un'azienda agricola. Il loro ciclo di vita, che può estendersi per decenni, comporta un significativo impegno finanziario per l'acquisto, la manutenzione, il consumo di carburante, la gestione dei pezzi di ricambio e lo smaltimento finale. Le aziende agricole devono affrontare anche il rapido avanzamento delle tecnologie nei trattori, che spaziano dall'integrazione di sistemi di automazione e precisione alla transizione verso l'uso di carburanti più sostenibili o di motori elettrici [1].

Questi sviluppi rendono ancora più importante la valutazione approfondita del costo totale di proprietà, al fine di prendere decisioni informate su nuovi acquisti o aggiornamenti. L'Analisi del Costo del Ciclo di Vita (LCC, Life Cycle Cost) è un metodo utilizzato per stimare il costo complessivo di un bene durante l'intero ciclo di vita, inclusi costi di acquisizione, utilizzo, manutenzione e smaltimento.

Nell'ambito dell'agricoltura, dove macchine come i trattori sono asset critici per la produzione, l'analisi LCC diventa uno strumento molto utile soprattutto per i produttori di tali mezzi.

L'obiettivo principale del lavoro di tesi presentato è un'analisi incentrata esclusivamente sui costi del ciclo di vita completo di due diversi sistemi, così da comparare i risultati ottenuti. Da una parte il trattore tradizionale con motore termico diesel (ICET), e dall'altra il trattore da frutteto ibrido-elettrico (HET), che sta emergendo come una soluzione promettente per migliorare l'efficienza energetica e ridurre l'impatto ambientale delle attività agricole. In questo modo sarà possibile avere una comparazione tra i due mezzi non solo dal punto di vista ambientale ma anche dal punto di vista economico. L'attività di tesi è stata svolta in collaborazione con la Ecothea srl, società fortemente impegnata nel campo dell'elettrificazione dei veicoli da lavoro off-road.

L'attività di valutazione si basa sul confronto tra due trattori della stessa potenza, e con le stesse caratteristiche principali, come compattezza e versatilità, tipiche di trattori da frutteto attualmente presenti sul mercato [2].

Il primo è un trattore con motore a combustione interna diesel (ICET), che rappresenta il veicolo tradizionale attualmente utilizzato e presente sul mercato, nel quale la potenza sviluppata dal gruppo termico viene trasmessa direttamente all'albero di trasmissione, che a sua volta trasmette potenza al cambio e agli pneumatici per la movimentazione, alla presa di forza e all'impianto idraulico per gli attrezzi e i servizi ausiliari [3].

Il secondo veicolo, invece, combina un motore a combustione interna (diesel) con uno o più motori elettrici, offrendo una serie di vantaggi per il settore agricolo, come la riduzione dei consumi di carburante, le emissioni ridotte, il miglioramento dell'efficienza operativa, il recupero dell'energia, ma presenta anche delle sfide come un elevato costo iniziale, la disponibilità di infrastrutture di ricarica, la richiesta di una manutenzione più specializzata e quindi costosa.

In futuro, con l'aumento delle normative sulle emissioni e la maggiore attenzione alla sostenibilità, è probabile che i mezzi agricoli a motore ibrido diventino sempre più diffusi, per tale motivo in questa tesi è stata fatta una comparazione tra i due modelli, quantificando i costi che caratterizzano i singoli scenari [4].

Il modello di valutazione complessivo del mezzo agricolo concettualmente si suddivide nelle seguenti fasi: definizione del goal & scope e dei confini del sistema, la parte di inventory relativa alla costituzione del trattore, che è stata presa dalla letteratura [4], la fase LCC, che si è avvalsa sia dei dati forniti dai mercati presenti sia dei dati provenienti dalle attuali previsioni dei vari mercati futuri (es: delle materie prime, dell'energia, del carburante, dei costi di smaltimento...), e infine la fase conclusiva, nella quale sono discussi i risultati ottenuti.

Le tematiche sopra menzionate vengono trattate in questa tesi strutturata nei seguenti capitoli: in questo primo capitolo è presentata un'introduzione del lavoro svolto, del contesto e delle motivazioni, mentre nel secondo capitolo l'oggetto in questione è l'approccio LCC.

Dopo un'iniziale descrizione del concetto di LCC, è spiegato in maniera dettagliata il suo sviluppo nei 15 step che caratterizzano la metodologia e successivamente sono presentate le voci di costo che generalmente la compongono. È poi descritto quello che è l'approccio del Life Cycle Assessment (Analisi LCA), e la comparazione tra le due diverse metodologie, facendo riferimento alle relazioni esistenti, mostrando anche come queste due analisi possano essere applicate congiuntamente. Si conclude analizzando quella che è la letteratura dell'analisi LCC [5].

Il terzo capitolo è stato diviso in due parti: nella prima è applicata l'analisi dei costi dell'intero ciclo di vita del trattore tradizionale, analizzando ogni fase, e calcolando il costo totale del mezzo, mentre nella seconda è preso in oggetto un trattore HET (Hybrid-Electric Tractor) osservando le voci di costo ad esso associate. In questa sezione è inserito un approfondimento che riguarda un tema noto nel "mondo elettrico" odierno: il second life delle batterie.

La "seconda vita" di un pacco batterie si riferisce al suo utilizzo dopo il ciclo di vita iniziale. Le batterie, specialmente quelle utilizzate in veicoli elettrici, possono avere una capacità residua dopo essere state rimosse dai veicoli, a causa di una capacità ridotta rispetto alle specifiche originali. Queste batterie possono essere riutilizzate in altri contesti, per utilizzi in cui non si ha la necessità di erogare la stessa potenza che si eroga su un trattore, ad esempio, soddisfacendo altri target prestazionali [6].

Questo approccio alla "seconda vita" delle batterie è importante sia per ridurre il costo di smaltimento delle batterie elettriche, sia per massimizzare il loro valore e ridurre l'impatto ambientale complessivo. Inoltre, prolungare la vita delle batterie significa ridurre la loro impronta di carbonio e aumentare sia la quantità di energia rinnovabile disponibile sulla rete, sia l'economicità dei veicoli elettrici, poiché trasforma i possibili costi di smaltimento dei rifiuti in un valore residuo [6-8].

Il riutilizzo di una batteria elettrica è un processo complesso, che coinvolge diverse fasi per garantire che le batterie siano utilizzate in modo sicuro ed efficiente anche dopo la loro vita utile iniziale. Il modo più semplice è quello di utilizzare il pacco batteria dismesso dal veicolo esattamente com'è, realizzando un sistema di storage che utilizzi un numero di batterie sufficiente a raggiungere le potenze richieste.

Il quarto capitolo si occupa dell'analisi e discussione dei risultati, capitolo che serve a collegare i dati raccolti con quelli ricavati, a interpretare il loro significato e a trarre conclusioni che vadano oltre i meri numeri o dati emersi dalla ricerca. Si discute l'impatto dei risultati sulla teoria o sul campo di ricerca, ed è anche importante riconoscere eventuali limiti nella metodologia o nei risultati. All'interno di questo capitolo è presente un paragrafo nominato "analisi di sensitività", in cui si parla delle fluttuazioni future del prezzo di carburante ed energia elettrica.

Nel quinto ed ultimo capitolo si riassume il lavoro svolto e sono indicate le possibili direzioni per ricerche future, suggerendo aree che potrebbero essere ulteriormente esplorate o nuovi approcci che potrebbero essere utilizzati per affrontare il problema in maniera diversa.

SECONDO CAPITOLO

VALUTAZIONE DEI COSTI NEL CICLO DI VITA DEL PROGETTO:

LIFE CYCLE COST ANALYSIS

2.1 ASPETTI METODOLOGICI DELL'APPROCCIO *LIFE CYCLE* *COSTING*

La metodologia LCC è consolidata su scala internazionale, soprattutto per quanto riguarda la possibilità di avere uno strumento condiviso a livello comunitario, e permette di integrare i costi di investimento con i costi di gestione supportando le fasi di valutazione che, a loro volta, devono essere supportate dalla costruzione di banche dati sui costi. L'analisi LCC viene inoltre usata per confrontare alternative progettuali e tecnologiche che implicano diversi costi nel ciclo di vita di un mezzo agricolo.

Generalmente l'analisi LCC supporta la soluzione che prevede maggiori costi iniziali con successivi costi di manutenzione e gestione minori. Si può sottolineare che "dal punto di vista operativo" uno step delicato e complesso riguarda la determinazione del periodo temporale di riferimento, cioè l'intero ciclo di vita. Al suo interno, affinché sia possibile supportare le decisioni, è necessario stabilire la durata economica, periodo di tempo dopo il quale non è più conveniente sostituire il mezzo agricolo o un suo componente, e la durata effettiva, periodo di tempo che va dalla realizzazione fino alla fase di riciclo.

L'applicazione LCC prevede i seguenti passaggi fondamentali [9-11]:

1. Definizione dell'obiettivo dell'analisi;
2. Identificazione preliminare dei parametri e dei requisiti dell'analisi;
3. Conferma dei requisiti del progetto e dei mezzi necessari;
4. Raccolta dei costi e dei dati di performance;
5. Applicazione dell'analisi e iterazione;
6. Interpretazione e illustrazione dei risultati.

Nel caso in cui gli obiettivi siano già stati definiti in linea generale, i suddetti passaggi possono essere approfonditi e scomposti nei 15 step che caratterizzano essenzialmente la metodologia LCC, tre dei quali sono facoltativi [9].

Tali passaggi sono:

Step 1. Identificazione dello scopo principale dell'analisi LCC. Durante questo step vengono definiti gli obiettivi principali e i risultati attesi dell'analisi. L'approccio può essere applicato alle diverse fasi del progetto o del ciclo di vita del bene, nell'accezione cradle to grave, ovvero "dalla culla alla tomba". In particolare, l'analisi LCC affronta due temi principali:

- decisioni inerenti i processi di pianificazione, programmazione preventiva del bilancio e appalto nel caso in cui si parli di beni esistenti;
- decisioni riguardo l'acquisto di nuovi beni o alternative progettuali/tecnologiche, per cui è necessaria una stima di possibilità finanziarie.

Step 2. Identificazione dello scopo principale dell'analisi. Lo step 2 consente di individuare l'obiettivo specifico dell'applicazione LCC, definendo le fasi del ciclo di vita del bene su cui viene applicato lo strumento LCC e il contesto in cui si opera, distinguendo tra un bene singolo, un componente o un portafoglio comprendente diversi assets.

Step 3. Identificazione delle relazioni fra analisi di sostenibilità e LCC. Questo step riguarda le relazioni tra l'analisi della sostenibilità, in particolar modo quella ambientale, cioè la metodologia LCA, discussa e presentata nel successivo paragrafo (2.3), e l'analisi dei costi.

Step 4. Particolare attenzione viene data all'identificazione dei metodi di valutazione economica e al modo di operare con importi relativi ai costi in diversi periodi di tempo. Se si deve operare con periodi superiori ad un anno, per i noti principi della matematica finanziaria, è necessario procedere con l'operazione di sconto.

Step 5. Identificazione delle necessità di analisi aggiuntive, quali analisi di rischio/incertezza e sensibilità. Si individuano eventuali fattori di rischio e incertezza attraverso specifiche analisi. L'analisi LCC prevede la presenza dell'incertezza contenuta nelle assunzioni relative a costi futuri, crescita dei costi, tassi di inflazione futuri e durata prevista del componente o della struttura. Il rischio deve pertanto essere identificato e stimato in termini di probabilità e impatto potenziale. Infine, devono essere individuate le misure per moderare ed evitare i rischi. La chiave per la gestione efficace del rischio / incertezza è l'identificazione della causa della potenziale variabilità che può influenzare l'analisi LCC e di conseguenza la misurazione della probabilità che si verifichi.

La valutazione del rischio economico, utilizzando l'approccio probabilistico o l'Analisi di Sensibilità, può essere utilizzata per ridurre le incertezze.

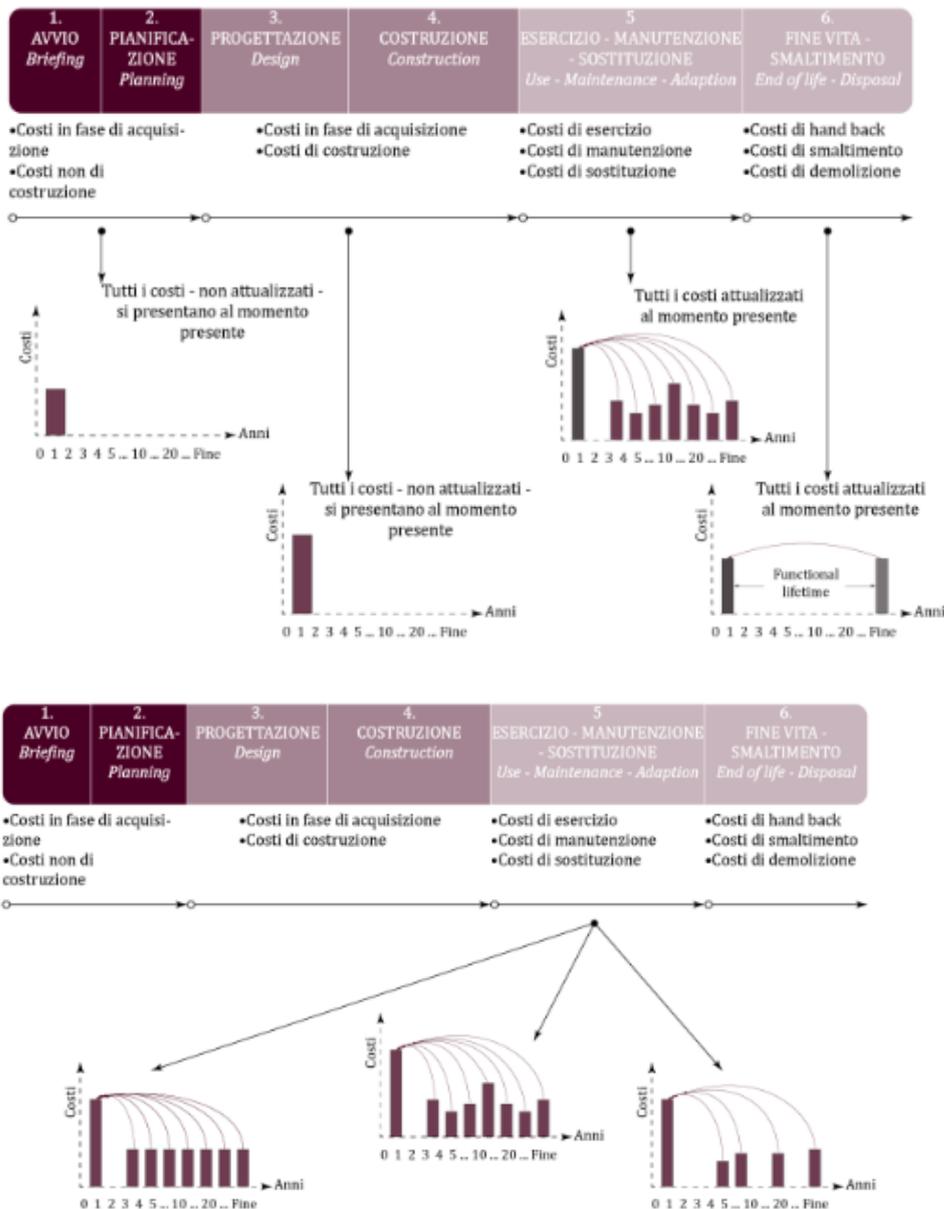


Fig. 2 e 3: Categorie di costo lungo il ciclo di vita edilizio e rispettive attualizzazioni [fonte dei dati:11]

In figura vengono mostrate le categorie di costo del ciclo di vita edilizio, preso come esempio, lungo l'intero ciclo di vita. Ogni voce di costo rilevante, come evidenziato dai grafici, deve essere trattata in modo appropriato rispetto alla relazione tempo-denaro.

Lo sconto finanziario si ottiene trasferendo la quantità di denaro al momento attuale (il momento della valutazione), assumendo che la somma di denaro abbia un valore più alto nel presente piuttosto che in un tempo futuro a causa della perdita del suo valore nel tempo.

Step 6. Identificazione dei requisiti del bene e del progetto. In questo step vengono individuate le caratteristiche principali del bene, in base alla funzionalità e in base alle caratteristiche fisiche. In questo passaggio è importante anche la definizione e conferma dei requisiti di qualità e vincoli del progetto, ossia del budget e del programma, anche dal punto di vista temporale.

Step 7. Identificazione delle opzioni che devono essere incluse nell'analisi LCC e delle voci di costo da considerare;

Step 8. Raccolta dei dati di costo e tempo da usare nell'analisi LCC.

Lo step 8, riguardo l'individuazione dei dati e le relative fonti, è un passaggio delicato: più il progetto si sviluppa, più sarà necessario un grado di dettaglio più avanzato dei costi e delle fonti. Se i dati derivano da precedenti valutazioni di sostenibilità ambientale saranno tenute in considerazione solo le voci ambientali quantificabili, e riguardano generalmente la scelta dei materiali o dei componenti che limitano l'impatto ambientale e/o il consumo di energia.

Step 9. Verifica dei valori dei parametri finanziari e del periodo di analisi. Vengono verificati i parametri finanziari, ossia saggio di sconto, inflazione tassazione ecc., e l'arco temporale di riferimento precedentemente fissati prima di procedere con l'applicazione dell'analisi LCC. In questo passaggio, in funzione degli obiettivi della valutazione, viene inoltre selezionato il "Metodo di analisi economica", di solito NPV e PBP.

Step 10. Revisione della strategia di rischio e produzione di un'analisi preliminare di rischio/incertezza. È un altro passaggio opzionale. In questa fase è possibile revisionare i fattori di rischio individuati allo step 5 per poi svolgere un'analisi di rischio dettagliata.

Step 11. Produzione della valutazione economica. Fondamentale è lo step 11, cioè il passaggio che riguarda l'effettiva applicazione dell'analisi LCC basata su tutti i dati finora raccolti. L'applicazione dell'analisi LCC tendenzialmente è supportata dall'uso di software, che prevedono attività di inserimento dati, calcoli dei costi del ciclo di vita e analisi dei risultati.

Step 12. Applicazione dell'analisi di rischio/incertezza dettagliata, se necessario.

Step 13. Applicazione dell'analisi di sensitività, se necessario. L'approccio di sensibilità viene utilizzato per determinare in che modo il valore di un output è influenzato dalla variazione di un parametro di input da cui dipende.

Step 14. Interpretazione e presentazione dei risultati iniziali, presentati mediante il modello più adatto (tabelle, grafici ecc.).

Molti sono i limiti dell'analisi LCC, in particolare per quanto riguarda le ipotesi circa tempi, costi e dati per le fasi di esercizio e manutenzione. È quindi opportuno produrre diversi scenari per molte variabili critiche, considerando anche la natura iterativa del metodo LCC.

Step 15. Presentazione dei risultati e predisposizione della reportistica finale, composta da una sezione narrativa in cui vengono descritti il bene e il processo LCC sviluppato, una parte tabellare che riporta tutti i dati riguardo i costi, il progetto, le spese annuali e i parametri chiave, e infine il modello LCC dettagliato con i relativi profili di costo.

2.2 CATEGORIE E VOCI DI COSTO PER L'ANALISI LCC

L'analisi LCC mira all'identificazione e alla quantificazione di tutti i costi economici associati all'intero ciclo di vita del processo o attività, includendo appunto quelli dovuti all'impatto ambientale dello stesso ciclo di vita preso in esame.

Per porre maggiore attenzione ai costi ambientali e per indirizzare meglio le scelte di investimento, e quindi per fornire un'approssimativa classificazione di tutti i costi inerenti al rapporto dell'impresa con l'ambiente, l'EPA (agenzia statunitense per la protezione dell'ambiente) ha fornito una classificazione dei costi che prevede:

- i costi convenzionalmente calcolabili,
- i costi potenzialmente nascosti o potenziali,
- i costi esterni all'impresa.

Nei costi convenzionalmente calcolabili si trovano tutti i costi che sono tradizionalmente individuati e misurati nell'ambito del sistema impresa della contabilità, finalizzata al controllo di gestione e alla formalizzazione del bilancio civilistico.

Nella categoria dei costi potenziali sono inclusi tutti i costi interni all'impresa, compresi quelli nascosti o meno tangibili, che essendo meno misurabili e quantificabili, sono difficili da misurare in contabilità generale. Tali costi possono essere nascosti in altre figure di spesa non riconducibili a quelle ambientali, oppure possono derivare da situazioni che si possono manifestare potenzialmente; possono essere potenziali i costi di preparazione all'attività produttiva, i costi necessari per adeguarsi alla legislazione, i costi di natura volontaristica (audit ambientale, reporting ambientale...).

La somma dei costi convenzionalmente calcolati e dei costi potenzialmente nascosti o potenziali da i costi totali di impresa, tutti quei costi cioè per i quali un'impresa è responsabile in uno specifico periodo di tempo e alla luce di condizioni di regolamentazione prevalenti o prevedibili di mercato.

Infine, nei costi esterni all'impresa sono compresi quei costi che il meccanismo dei prezzi e le attuali regole di mercato non riescono ad attribuire all'impresa. Gli impatti ambientali, talora abbinati ad altri effetti negativi a livello sociale rientrano in questa categoria che viene definita delle cosiddette “esternalità negative”. Solitamente questi costi non rientrano nel processo decisionale dell'impresa, ma in futuro è probabile che si avrà un'espansione dell'area dei costi totali di impresa verso queste esternalità.

Il problema della quantificazione delle esternalità è da tempo oggetto di studio e diverse sono le tecniche messe a punto per una loro misurazione. Tralasciando quelle di carattere sociale (come i costi sociali dovuti alla disoccupazione e i costi sociali dovuti agli incidenti stradali), le principali esternalità che incidono strettamente sospetti ambientali possono essere gli impatti sulle risorse naturali, gli impatti sulla salute umana, gli impatti sull'ecosistema, quelli sulle colture agricole, sulle biodiversità, sulle strutture e infrastrutture civili, i danni provocati dal cambiamento climatico.

Il tradizionale meccanismo dei prezzi di mercato non è in grado di identificare l'ammontare è l'origine delle esternalità poiché non è agevole valutare monetariamente alcuni impatti ambientali. Tuttavia, sono stati sviluppati i vari metodi per valutare indirettamente gli impatti ambientali.

I risultati ottenuti con questi metodi permettono così la quantificazione in fase progettuale dell'impatto ambientale di ciascuna fase del ciclo di vita.

Le variabili di costo prese in considerazione sono le seguenti:

- Initial Costs o Costi Iniziali: costo iniziale per l'acquisto del bene;
- Operation costs o Costi operativi: costi coinvolti nel funzionamento e operatività quotidiana del bene. Sono costi da attualizzare. Sono da considerare solo i costi direttamente correlati.
- Maintenance Costs o Costi di Manutenzione: costi legati alla manutenzione e riparo del bene, durante tutto il suo ciclo di vita;

- Replacement Costs o costi di sostituzione: Costi di sostituzione dell'alternativa in futuro saranno pari a: Costo attuale del bene più i costi di demolizione, più eventuali modifiche degli "impianti", per esempio, necessarie per il nuovo bene.
- Disposal Costs o Costi di Smaltimento: costi legati allo smaltimento o il riciclo;

Tali costi possono variare lungo il ciclo di vita del prodotto/servizio; perciò, diventa necessario assegnarli a specifici periodi temporali (base annua o fase specifica del ciclo di vita).

Una volta che tutti i costi pertinenti sono stati stabiliti e attualizzati al loro valore attuale, i costi verranno sommati per calcolare il costo totale del ciclo di vita del prodotto.

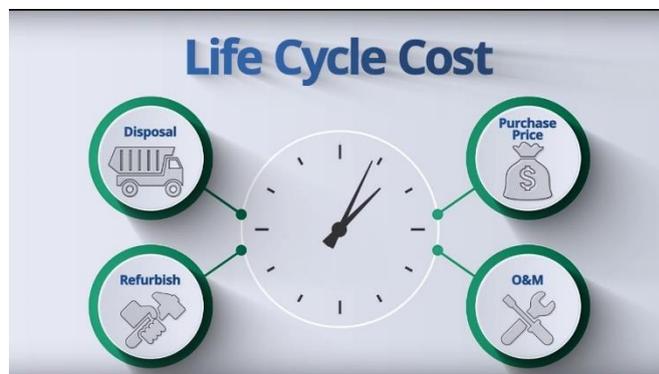


Fig. 4: I principali costi dell'analisi LCC [12]

2.3 LCA: LIFE CYCLE ASSESSMENT

L'LC è uno strumento oggettivo per analizzare e quantificare le conseguenze ambientali associate ad un prodotto, processo o attività umana, durante tutto il loro ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime, attraverso la produzione industriale, compresa la fase di utilizzo e lo smaltimento a fine vita.

Uno studio LCA si compone di quattro fasi, tra loro interconnesse [4-5]:

- Definizione dello scopo e del campo di applicazione.
- Analisi dell'inventario o del ciclo di vita.
- Valutazione degli impatti ambientali.
- Interpretazione dei risultati.

È inoltre un metodo standardizzato, definito dalla norma ISO 14040 e 14044; perciò consente analisi più robuste e una maggiore facilità di comprensione [2].

2.3.1 Fase 1: Definizione dello scopo e del campo di applicazione

Durante la prima fase dell'analisi del ciclo di vita del prodotto, in funzione dell'obiettivo dello studio, vengono definiti:

- i confini del sistema (spaziali e temporali),
- l'unità funzionale rispetto alla quale riportare i risultati,
- le categorie di impatto ambientale considerate (come ad esempio scarsità idrica, consumo di risorse, eutrofizzazione dei corpi idrici...).

In questa fase l'obiettivo dello studio LCA è dichiarato e giustificato, specificando anche l'intenzione dell'utilizzo dei risultati (applicazione), l'iniziatore (e commissario) dello studio, il professionista, gli stakeholders ai quali sono destinati i risultati dello studio (pubblico target).

I confini del sistema definiscono i processi unitari da includere nel sistema, e dovrebbero essere fissati nel modo più ampio possibile.

L'Unità Funzionale è un parametro di riferimento a cui attribuire i risultati della LCA. La scelta è arbitraria, ma deve essere coerente con gli obiettivi dello studio e con la funzione per la quale il sistema di prodotto è stato progettato. Questo riferimento è necessario per garantire la comparabilità dei risultati dell'LCA.

2.3.2 Fase 2: Analisi dell'inventario (LCI) e del ciclo di vita

Questa fase comprende tutte le attività volte alla raccolta ed elaborazione dei dati relativi a tutti gli input e output (sia in termini di massa che di energia) del sistema produttivo considerato, così da generare l'inventario del ciclo di vita (LCI).

I dati per ciascun processo unitario all'interno del confine del sistema possono essere classificati come segue:

- Input energetici, input di materie prime, input ausiliari e altri input fisici
- Prodotti, coprodotti e rifiuti
- Emissioni nell'aria, scarichi nell'acqua e nel suolo;

- Altri aspetti ambientali.

Per facilitare la raccolta dei dati esistono numerosi database che forniscono dati di inventario su vari materiali e processi. Le due tipologie principali in cui si distinguono sono

- Dati in primo piano (o primari), ottenuti direttamente dalla modellazione di un sistema di prodotti;
- Dati di sfondo (o secondari).

Per produrre l'inventario del ciclo di vita è necessaria una combinazione dei due.

2.3.3 Fase 3: Valutazione degli impatti ambientali

Gli input e gli output del sistema produttivo individuati nella fase precedente vengono convertiti in potenziali impatti ambientali applicando ai dati di inventario i relativi fattori di caratterizzazione (Classificazione e caratterizzazione). Si ottiene in questo modo un profilo dei potenziali impatti ambientali, costituito dai risultati delle diverse categorie d'impatto considerate.

Le norme di riferimento contemplano anche una successiva elaborazione (facoltativa) dei risultati ottenuti, mediante le operazioni di:

- normalizzazione (i valori di ogni categoria vengono espressi in funzione di un valore di riferimento),
- raggruppamento (smistamento e classificazione delle categorie di impatto),
- pesatura (conversione e aggregazione degli indicatori applicando fattori di pesatura).

2.3.4 Fase 4: Interpretazione dei risultati

La fase di interpretazione dei risultati permette di derivare conclusioni e raccomandazioni robuste, sulle quali, ad esempio, basare una strategia comunicativa e/o un processo di eco-design. I principali elementi dell'interpretazione dei risultati sono:

- identificazione degli hot-spot (vengono individuati i materiali/processi che contribuiscono maggiormente agli impatti complessivi),

- valutazioni sulla completezza e robustezza del modello (come analisi di sensitività e incertezza),
- definizione delle conclusioni dello studio, anche alla luce delle limitazioni presenti, e raccomandazioni.

Lo strumento del *Life Cycle Assessment* permette quindi l'ottenimento di una comprensione chiara, trasparente e scientifica delle problematiche ambientali legate ai prodotti e servizi erogati al mercato in un'ottica di ciclo di vita così da permettere la programmazione di azioni per il miglioramento (eco-design).



Figura 6: Applicazione dell'LCA di prodotto [13]

2.4 PROSPETTO COMPARATIVO TRA LE DUE ANALISI

Nei precedenti paragrafi è stata spiegata più approfonditamente l'analisi dei costi LCC, mentre qui si vogliono evidenziare le analogie e differenze presenti con l'analisi LCA.

Si può notare che i due approcci LCA e LCC presentano molti parallelismi e interrelazioni:

- valutano gli effetti a lungo termine delle varie scelte;
- analizzano una gamma diversificata di valori;
- valutano la fase di riciclo e smaltimento dei prodotti;
- considerano funzionamento e manutenzione;

- nelle scelte da analizzare forniscono un solido punto di partenza da cui avviare un razionale processo decisionale.

Come detto in precedenza, nonostante i due approcci LCC e LCA siano due metodologie distinte, possono essere applicate sinergicamente nel settore dei mezzi di trasporto, o in maniera congiunta per una valutazione più ampia, oppure utilizzando i risultati di un'analisi come input per l'altra.

Di seguito vengono illustrate le possibili sinergie tra la metodologia LCC e la metodologia LCA.

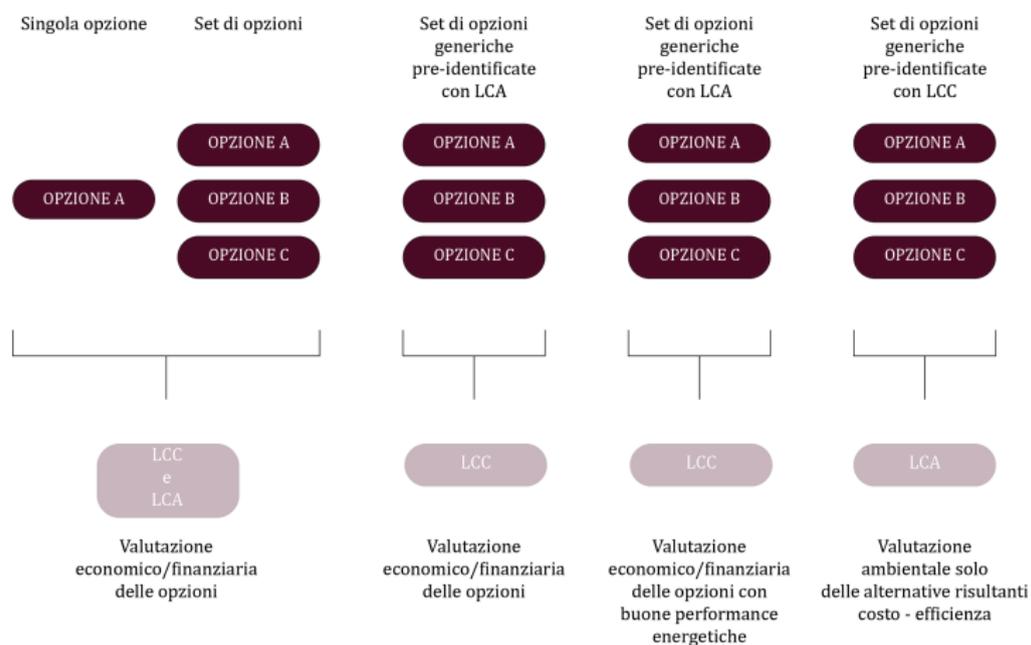


Fig. 6: Sinergia tra LCC e LCA [fonte dei dati:11]

Invece le differenze riscontrate tra le due diverse analisi sono:

- L'analisi LCCA unisce tutti i costi rilevanti espressi in termini finanziari e li utilizza come base per prendere decisioni di investimento;
- L'analisi LCA permette, invece, di prendere delle decisioni sulla base di possibili impatti ambientali, basandosi su punteggi di criteri ambientali.

Agli impatti ambientali si possono attribuire alcune delle voci di costo, anche se ciò non è sempre possibile in quanto non esistono criteri per quantificarli. Le analisi LCC e LCA possono essere applicate anche congiuntamente in diversi contesti e modalità:

- L'uso di LCC e LCA come due criteri distinti per la valutazione di una sola scelta di investimento;
- L'uso di LCC e LCA come due criteri di selezione per la valutazione di scelte di investimento alternativi;
- L'uso della metodologia LCC per avere una valutazione economica degli impatti di sostenibilità con un valore monetario accettato e facilmente calcolato;
- L'uso dell'analisi LCC per fornire una valutazione economica delle scelte alternative individuate in una valutazione LCA;

Si può quindi dichiarare che, grazie ai loro aspetti comuni e alle eventuali differenze, le due analisi, LCC e LCA, possono essere impiegate sia contemporaneamente, l'una accanto all'altra in un processo di valutazione più ampio, sia in maniera sequenziale in un processo dove i risultati di un'analisi sono il punto di partenza dell'altra.

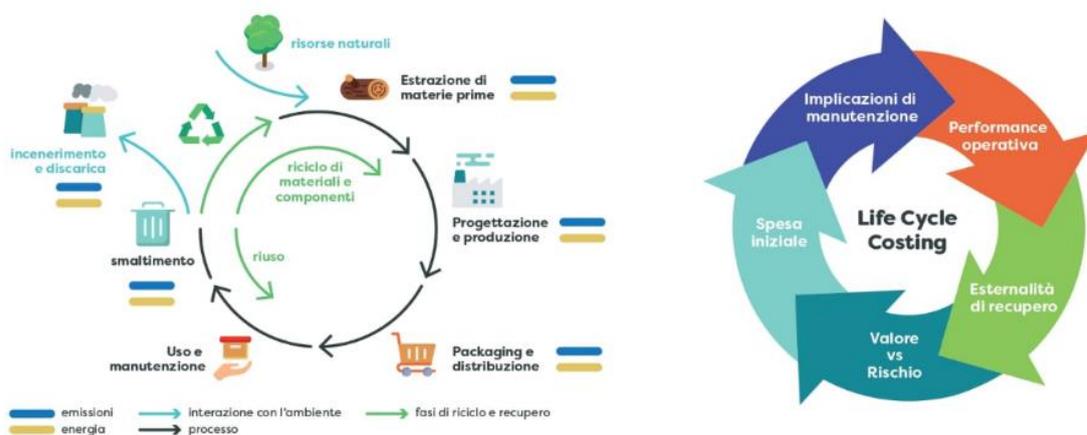


Figura 7: LCA e LCC [13]

2.5 ANALISI DELLA LETTERATURA

Il National Institute of Standards and Technology (NIST) Handbook, definisce il Life Cycle Cost come "il costo totale scontato in dollari per possedere, gestire, mantenere e smaltire un edificio o un sistema di costruzione" in un periodo di tempo.

L'analisi del costo del ciclo di vita (LCCA) è una tecnica di valutazione economica basata su un approccio sistematico e analitico, utilizzabile nella valutazione dei costi (diretti e indiretti) associati ad un prodotto, un servizio o un'attività, lungo il suo

intero ciclo di vita, con anche l'obiettivo di comparare diverse ipotesi alternative di progetto.

L'analisi del costo nel ciclo di vita, infatti, è particolarmente utile nelle prime fasi del processo di progettazione, quando vengono confrontate opzioni che soddisfano gli stessi requisiti prestazionali ma differiscono rispetto ai costi iniziali e di gestione per determinare quale sistema influisce sul risparmio netto massimo.

La sostenibilità riguarda anche gli aspetti ambientali e sociali oltre quelli economici e gran parte degli studi utilizza la valutazione ambientale del ciclo di vita (LCA) con la valutazione del costo del ciclo di vita (LCCA). La valutazione dei costi lungo l'intero ciclo di vita è essenziale per comprendere l'impatto economico complessivo (e l'impatto ambientale) dei costi aziendali per la produzione di un prodotto/servizio, e diventa un fattore determinante nelle strategie aziendali e nella gestione delle risorse finanziarie.

Si possono individuare delle fasi principali, il cui numero dipende sensibilmente dal tipo di analisi che si vuole condurre. In generale, le fasi principali da considerare sono quattro:

1. Reperimento/Acquisizione delle materie prime (si possono aggiungere i costi di R&D);
2. La fase operativa o di utilizzo;
3. La fase riguardante i costi di manutenzione e le eventuali sostituzioni di componenti e parti di ricambio di macchinari, etc;
4. La fase di dismissione o smaltimento del prodotto.

Il concetto di LCC (Life cycle cost), dell'ambito trattato in questa tesi, è stato ampiamente trattato in letteratura. Alcuni studi hanno cercato di concentrarsi sul processo di elettrificazione dei veicoli da lavoro, considerandone gli aspetti economici e ambientali, altri si focalizzano sugli impatti ambientali derivanti dall'utilizzo di macchinari agricoli con motore termico e quelli derivanti da motore ibrido, confrontando i parametri di consumo, inquinamento e i relativi benefici, altri invece tengono conto del confronto delle prestazioni e dei consumi dei vari modelli.

L'analisi mira a individuare la soluzione progettuale ottimale in funzione dei costi e dei fattori inquinanti, riducendo al minimo sia i costi globali, relativi all'investimento e al funzionamento degli usi energetici nel corso del ciclo di vita del veicolo, sia l'emissione di CO₂ durante poi la fase di utilizzo del mezzo agricolo stesso. Quest'ultimo punto è

importante anche perché nei vari Paesi sono presenti sanzioni da pagare in conseguenza alla contribuzione dell'inquinamento ambientale, ad esempio nell' Unione Europea le sanzioni per le emissioni di CO₂ sono particolarmente severe [15].

Diversa è la situazione per i produttori di veicoli agricoli, poiché al momento non ci sono sanzioni specifiche legate alle emissioni di CO₂, come quelle applicate nell'industria automobilistica. Piuttosto, le normative per i mezzi agricoli tendono a concentrarsi sulle emissioni di sostanze inquinanti, come gli ossidi di azoto e il particolato [16].

Nella letteratura si trovano in particolare applicazioni su progetti di conversione dal motore termico al motore elettrico soprattutto nel settore delle auto e dei mezzi pubblici, con l'obiettivo di identificare la strategia di intervento ottimale per un miglioramento sull'impatto ambientale che può avvenire giornalmente, da parte di ogni singolo individuo. Nel corso degli ultimi anni tali attenzioni si sono rivolte anche nei vari settori specifici, tra cui quello agricolo [17-21].

2.5.1 Evoluzione dell'approccio life cycle costing

La prima applicazione di LCC avvenne alla fine degli anni '50 nel mondo edilizio, nominata "cost in use", teorizzato nel Regno Unito. Nonostante il sostanziale sforzo esercitato nel promuovere il concetto di "cost-in-use" e spiegando la terminologia, l'applicazione di quest'approccio per gli edifici era stata irregolare così come c'era un dubbio sull'adozione di un metodo che si basava su tutta una serie di ipotesi. Negli Stati Uniti, contrariamente, venivano adottati dei metodi di valutazione economica per le decisioni del governo su grandi progetti. Queste metodologie tenevano conto dei benefici (risparmi) e costi dei progetti oltre il ciclo di vita atteso. LCC è stato il primo approccio sviluppato a metà degli anni '60, per poter assistere il Dipartimento degli Stati Uniti di difesa nell'approvvigionamento di attrezzature militari (Epstein, 1996). È stato solo dopo la crisi energetica del 1973 che è stato compreso che bisognava considerare i costi energetici futuri quando si pianificano e progettano edifici [22].

Anche in Europa, verso la metà degli anni '70, l'LCC ha attirato l'attenzione del settore pubblico per quanto riguarda l'edilizia, il settore energetico, dei trasporti e militare. L'estrema varietà di applicazione è dimostrata, in parte, dai numerosi standards che si sono susseguiti nel corso degli anni, come ad esempio: IEC 60300 33 [23] e ISO 15663 [24].

Andando ad analizzare il settore di interesse della presente tesi, negli anni '80 e '90 l'attenzione dei costruttori di mezzi agricoli era principalmente focalizzata sui costi iniziali di acquisto e sui costi di manutenzione. L'obiettivo principale era quello di ridurre i costi di produzione e di manutenzione per rendere le macchine più accessibili e competitive sul mercato. Durante questo periodo, i costruttori iniziarono a prendere coscienza dell'importanza di considerare anche i costi operativi e di manutenzione nel lungo termine. Con il passare del tempo, i costruttori hanno iniziato a includere i costi di esercizio nel calcolo del LCC, e questo cambiamento ha permesso ai costruttori di fornire ai clienti una visione più completa e realistica dei costi totali associati all'acquisto e all'uso di una macchina agricola [25-27].

Negli anni 2000, la crescente consapevolezza ambientale ha portato all'inclusione dei costi ambientali nel calcolo del LCC, e di conseguenza una maggiore attenzione nella valutazione dell'impatto ambientale delle macchine agricole durante tutto il loro ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento. I costruttori hanno iniziato a progettare macchine più efficienti dal punto di vista energetico e un ridotto impatto ambientale, con l'obiettivo di ridurre non solo i costi operativi, ma anche l'impronta ecologica [25-27].

Con l'avvento della digitalizzazione e dell'Internet of Things (IoT), l'approccio LCC ha subito un'ulteriore evoluzione. La possibilità di raccogliere dati in tempo reale dalle macchine agricole ha permesso ai costruttori di sviluppare sistemi di manutenzione predittiva. Questi sistemi monitorano continuamente le condizioni delle macchine, prevedendo guasti e ottimizzando i tempi di manutenzione. Questo non solo riduce i costi di manutenzione e i tempi di inattività, ma migliora anche l'affidabilità e la longevità delle macchine [25-27].

Oggi, l'approccio LCC è strettamente legato ai principi dell'economia circolare. I costruttori di mezzi agricoli stanno adottando strategie per estendere la vita utile dei loro prodotti, promuovendo la riparazione, il riciclo e il riuso delle componenti. Questo approccio non solo riduce i costi complessivi, ma contribuisce anche alla sostenibilità ambientale e alla riduzione dei rifiuti.

Nel complesso, la ragione per applicare un'analisi LCC non è diversa da quella di qualsiasi altro processo aziendale: identificare dove la società può ottenere un vantaggio competitivo a lungo termine.

La tabella 1 fornisce una lista illustrativa delle applicazioni della LCC di varie organizzazioni.

Motivazione	Categoria di prodotto	Organizzazione
Appalto	beni durevoli	dipartimento della difesa, USA
definizione delle priorità di ricerca e sviluppo	beni durevoli	tecnologie unite, USA
miglioramento del processo	Materiali	Alco, Canada
valutazione del costo opportunità	beni durevoli	Ford, Germania
analisi di affidabilità	Energia	EDF, Francia
giustizia intergenerazionale	energia nucleare	EDF, Francia
analisi di manutenzione	prodotti di trasporti	DEL, Germania
Offerte	servizi municipali	Halton, Canada
supporto alle vendite	servizi (acqua)	ACQUA+TECH, Svizzera
EPD	beni semidurevoli (cibo, carta)	ABB, Israele, Fonti, Nuova Zelanda, Kemira, Finlandia
aggiornamenti apparecchiature e sostituzioni		
pianificazione delle tasse	stima della CO	Unione Europea

Tabella 2.5.1: Tabella delle applicazioni della LCC di varie organizzazioni [28]

Il concetto e il calcolo dei costi nel settore dei produttori dei mezzi agricoli ha assunto un ruolo sempre più centrale negli ultimi anni, questo perché la LCCA aiuta le aziende a stimare, inoltre, in termini monetari, il costo delle proprie risorse tangibili e intangibili, e questo è l'importante per un'impresa per avere una visione completa del "cash-out", per aiutare gli imprenditori a prendere decisioni informate e oculate, per ottimizzare i costi, per la valutazione dell'impatto ambientale scegliendo decisioni sostenibili e per una pianificazione strategica di lungo termine.

Attraverso un'indagine e un'analisi della letteratura si nota che la produzione dei testi e degli articoli scientifici che trattano questo tema è in continua crescita ed evoluzione. Le analisi economiche di un progetto (realizzazione di un prodotto o servizio) sono decisamente incrementate negli ultimi anni, e i contenuti della letteratura trattano l'approccio dell'analisi LCC, ossia le analisi dei costi nel ciclo di vita di un mezzo agricolo, affiancate e sostenute anche da analisi energetiche, analisi ambientali e analisi dei rischi (Figura 3).

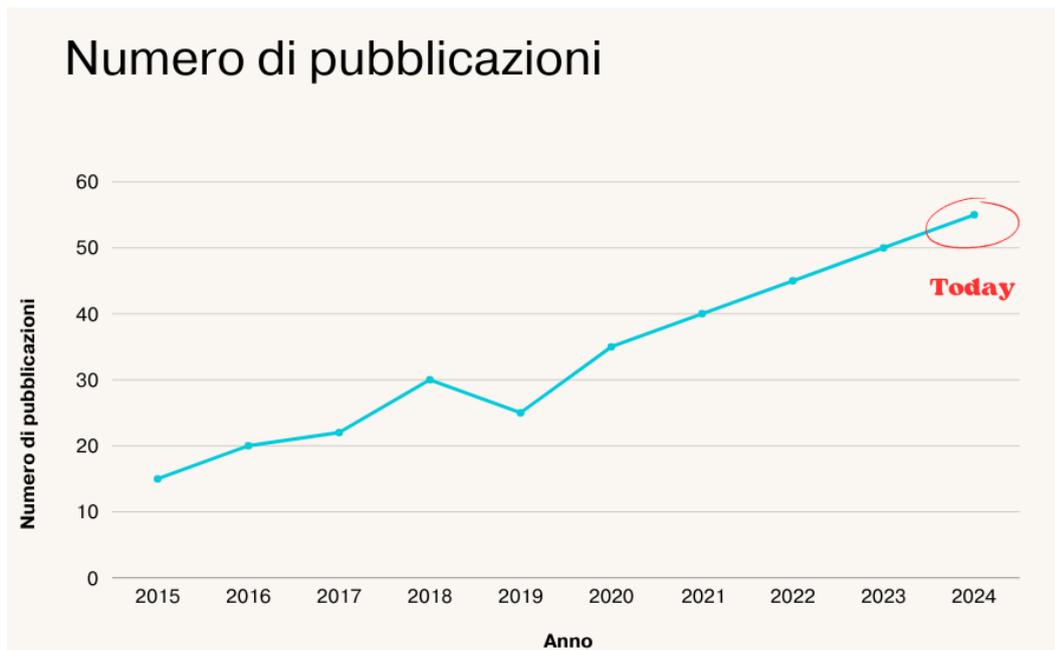


Figura 8: Distribuzione temporale dei prodotti bibliografici relativi all'analisi LCC dal 2015 ad oggi [29]

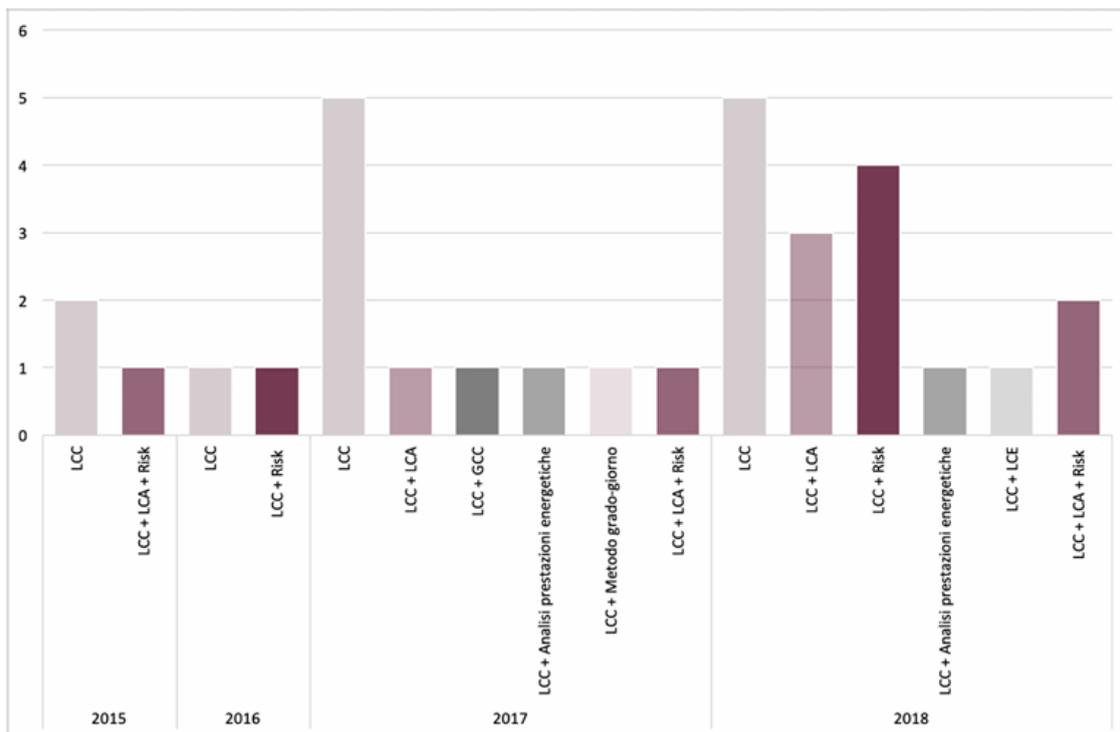


Figura 9: Metodologia LCC applicata singolarmente/congiuntamente, dal 2015 al 2018 [30]

Questa analisi, quindi, permette quindi di individuare le voci di costo che più influiscono sul costo globale. Si tratta di uno strumento molto utile per il progettista che ha come obiettivo l'identificazione del livello di prestazione energetico ottimale in funzione dei costi.

2.5.2 Contestualizzazione geografica

Rispetto alla collocazione geografica in cui vengono effettuate applicazioni e studi per l'analisi dei costi, si possono notare notevoli differenze. L'analisi LCC, ormai tecnica consolidata, è uno strumento che viene utilizzato soprattutto in Europa e in Asia, mentre un contributo inferiore viene fornito dall'Australia e dall'America. Anche in Italia, il ricorso a tale tipologia di analisi è di minor consuetudine rispetto agli altri Paesi europei.

In Europa i Paesi che maggiormente sviluppano la metodologia LCC sono quelli del nord (Svezia, Norvegia, Olanda), paesi che sono da sempre attenti e sensibili al tema della sostenibilità. Questi ultimi hanno un particolare interesse a studiare come ridurre l'impatto ambientale e migliorare la prestazione energetica nei vari settori, tra cui anche quello automobilistico e quello delle "non auto", comprendente tutti i mezzi di lavoro, tra cui anche quelli agricoli. Anche i paesi dell'est Europa, come Polonia e Romania, si impegnano nel trovare soluzioni per il risparmio energetico per la riduzione delle emissioni di inquinanti ambientali per un miglioramento dell'efficienza energetica di tutti i mezzi [31].

Anche l'Asia mostra un particolare interesse nell'utilizzo dell'analisi LCC, soprattutto sui sistemi impiantistici, tra cui la possibilità di installazione di impianti fotovoltaici, per trarne i benefici sia dal punto di vista economico, sia energetico. Tali applicazioni avvengono, inoltre, per rispettare le normative vigenti nei vari paesi asiatici, come è presente attualmente in Indonesia, dove il governo ha fissato un obiettivo per l'energia rinnovabile nel mix energetico del 23% entro il 2025 e del 31% entro il 2050 [32]. Spesso in questi paesi meno sviluppati il Ministero estende sussidi e prestiti a basso interesse per coprire l'elevato costo delle applicazioni solari fotovoltaiche.

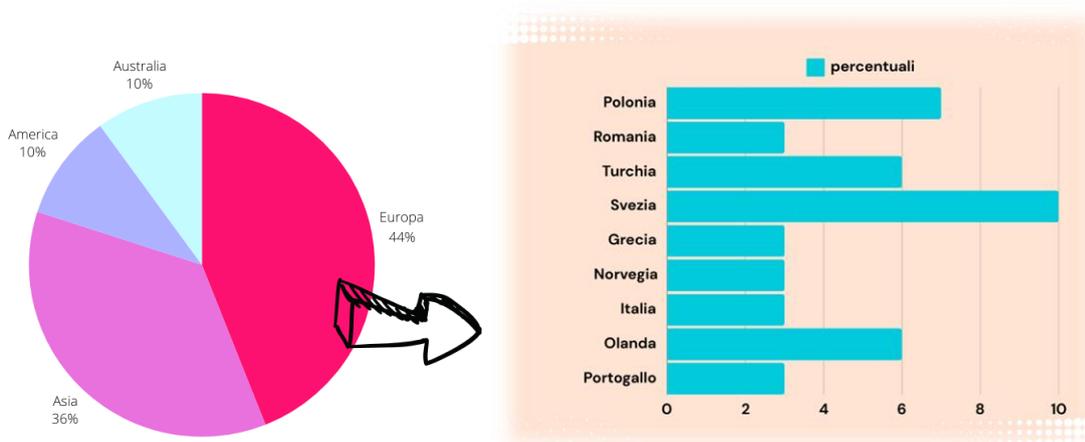


Figure 10: Distribuzione dei prodotti bibliografici relativi all'analisi LCC per contesto geografico. [grafici realizzati dall'autrice della tesi facendo riferimento a vari articoli sulla libreria online PIARC]

Riassumendo:

- L'approccio di Life Cycle Costing è in continua evoluzione ed è uno degli strumenti più comuni per la valutazione dei costi, per la comprensione dei rischi e delle incertezze, considerando sempre gli impatti ambientali.
- Gli oggetti delle valutazioni economiche nel ciclo di vita del progetto non sono solamente a scala del veicolo (auto o non auto), ma si trovano applicazioni anche relative al singolo componente, soprattutto nel nostro caso riguarderà il motore stesso.
- Gli approcci per la valutazione economica sono approcci multidisciplinari, che non coinvolgono solamente l'area disciplinare della Valutazione Economica del

Progetto per i calcoli dei costi nel ciclo di vita del progetti, ma vedono coinvolte anche discipline come la Scienza e Tecnologia dei Materiali, ad esempio quando si effettuano analisi degli impatti ambientali in seguito alle emissioni di CO₂ da parte dei veicoli, o durante la produzione e l'assemblaggio dei singoli componenti che lo costituiscono.

- Per quanto riguarda il contesto geografico, queste metodologie sono utilizzate ormai in tutto il mondo: anche i Paesi in via di sviluppo, come quelli asiatici, non tralasciano gli studi per individuare le soluzioni progettuali più convenienti anche dal punto di vista dell'efficienza energetica.

2.6 STUDI LCC APPLICATI AL MONDO AGRICOLO

Prima di procedere con l'analisi su cui questa tesi è incentrata, sono esposti in questo paragrafo gli studi che già sono stati effettuati sempre nel settore agricolo.

Ribeiro e Silva (2022) [33] discutono l'applicazione dell'analisi dei costi del ciclo di vita per la gestione sostenibile delle macchine agricole, evidenziando come questo approccio permetta di valutare i costi totali delle attrezzature durante tutto il loro ciclo di vita, dall'acquisizione allo smaltimento. Secondo gli autori, l'LCC consente di individuare le scelte più economiche e sostenibili tra diverse opzioni di macchinari, supportando gli agricoltori nella riduzione dei costi operativi e nella minimizzazione degli impatti ambientali.

L'articolo sottolinea anche che la scelta di macchinari efficienti dal punto di vista energetico e con costi di manutenzione ridotti può avere un impatto significativo sulla sostenibilità economica e ambientale dell'azienda agricola. Integrando l'LCC con strumenti di valutazione ambientale come l'LCA, Ribeiro e Silva dimostrano che si possono ottenere stime più accurate sui costi a lungo termine, inclusi quelli legati alla gestione delle risorse, come il consumo di carburante e l'emissione di gas serra [98].

Yamamoto e Kitagawa (2021) [34] esplorano l'uso dell'analisi dei costi del ciclo di vita (LCC) come strumento per una gestione sostenibile dei trattori agricoli. L'articolo evidenzia come l'LCC permetta di valutare non solo i costi di acquisto iniziale, ma anche quelli operativi, di manutenzione e di smaltimento dei trattori, offrendo così una stima più accurata dei costi complessivi durante tutto il ciclo di vita del mezzo.

Gli autori mettono in luce i benefici dell'LCC nel sostenere scelte informate, contribuendo a ridurre i costi a lungo termine e ad attenuare gli impatti ambientali, come le emissioni e l'uso di carburanti. Secondo Yamamoto e Kitagawa, l'adozione di questo approccio permette agli agricoltori di comparare trattori con caratteristiche tecniche diverse, identificando le opzioni più vantaggiose e sostenibili nel lungo periodo.

L'analisi proposta suggerisce che, con il supporto dell'LCC, sia possibile ottimizzare le spese per i macchinari agricoli, migliorando l'efficienza economica delle aziende agricole e promuovendo la sostenibilità.

Zhao et al. (2020) [35] analizzano i costi del ciclo di vita (LCC) delle macchine agricole con un focus particolare sui trattori, utilizzando un caso di studio per dimostrare l'applicabilità pratica dell'LCC nel settore agricolo. Lo studio considera una gamma completa di costi associati ai trattori, inclusi quelli di acquisto, operativi, di manutenzione, e di smaltimento, per offrire una visione chiara del costo totale lungo tutto il ciclo di vita delle macchine.

Gli autori sottolineano che l'applicazione dell'LCC consente di identificare le opzioni di trattori più economiche nel lungo periodo, riducendo le spese complessive delle aziende agricole e promuovendo una gestione più sostenibile delle risorse. Il caso studio rivela che i costi di manutenzione e carburante costituiscono una parte significativa delle spese a lungo termine, suggerendo che la scelta di trattori con maggiore efficienza energetica e minori esigenze di manutenzione può essere particolarmente vantaggiosa.

Zhao et al. concludono che l'approccio LCC fornisce uno strumento decisionale essenziale per agricoltori e responsabili delle politiche, permettendo scelte più consapevoli e sostenibili sia dal punto di vista economico sia ambientale.

Gómez e Ceballos (2019) [36] esplorano l'applicazione dell'analisi dei costi del ciclo di vita nella progettazione di attrezzature agricole, evidenziando come questa metodologia possa guidare scelte progettuali più sostenibili e vantaggiose nel lungo periodo. L'articolo mostra come l'LCC permetta ai progettisti di tenere in considerazione non solo i costi di produzione iniziali, ma anche quelli legati all'uso, alla manutenzione e allo smaltimento finale dell'attrezzatura.

Gli autori dimostrano che integrare l'LCC già nella fase di progettazione consente di identificare materiali e componenti che, sebbene possano risultare inizialmente più costosi, riducono i costi operativi e di manutenzione in maniera significativa nel lungo

termine. Questo approccio aiuta quindi a sviluppare attrezzature più durevoli e efficienti dal punto di vista energetico, diminuendo le risorse necessarie per il loro utilizzo e riducendo l'impatto ambientale complessivo. Gómez e Ceballos evidenziano che l'uso dell'LCC nella progettazione delle attrezzature agricole può ottimizzare sia la sostenibilità economica che quella ambientale, portando a una migliore qualità e affidabilità delle macchine, oltre che a benefici finanziari per gli agricoltori.

In sintesi, come detto in tutti gli studi qui sopra discussi, l'uso dell'LCC nella gestione delle macchine agricole si rivela uno strumento fondamentale per migliorare l'efficienza e la sostenibilità in agricoltura, offrendo un supporto decisionale basato su una visione olistica del ciclo di vita dei macchinari.

TERZO CAPITOLO

ANALISI DEI COSTI APPLICATA AL TRATTORE DA FRUTTETO TRADIZIONALE E AL TRATTORE IBRIDO

3.1 SISTEMA DI RIFERIMENTO E FUNCTIONAL UNIT

I trattori da frutteto hanno un ruolo centrale nell'agricoltura europea, poiché frutteti e vigneti rappresentano uno dei settori in più rapida crescita negli ultimi anni, sia in termini di ettari che di trattori venduti a questo tipo di attività agricola. Inoltre, le sue caratteristiche principali (maneggevolezza, compattezza...) fanno di loro uno dei mezzi da lavoro più versatili attualmente presenti sul mercato.

Per questo motivo l'analisi e i risultati ottenuti in questa tesi potrebbero essere rivolti ad un pubblico diversificato:

- produttori di trattori, che potrebbero essere aiutati soprattutto durante la fase di progettazione;
- specialisti e ricercatori in impatto ambientale;
- potenziali acquirenti, i quali potrebbero valutare meglio la scelta di un tipo di mezzo piuttosto che l'altro sulla base anche dei costi di consumo, di manutenzione e soprattutto quelli relativi alla fase finale del ciclo di vita.

Come detto in precedenza, l'analisi mira ad un confronto tra 2 trattori generici da frutteto dalla potenza di 75 KW. Il primo ha una motorizzazione tradizionale, e per tradizionale si intende un motore termico diesel, il secondo è un veicolo ibrido dotato di un motore termico e uno elettrico. Il primo utilizza solo il motore termico (ICE in figura 11) per fornire potenza alla trasmissione, il secondo invece combina la potenza del termico con quella generata dal motore elettrico (nominato in figura EM). È importante sottolineare che l'architettura ibrida non prevede solo la presenza di un motore elettrico, ma anche quella di un inverter e un sistema di accumulo con batterie Li-Ion (in figura nominato con ESS). Gli altri due componenti visibili nella seguente figura sono la pompa (PUMP) e la presa di potenza (PTO).

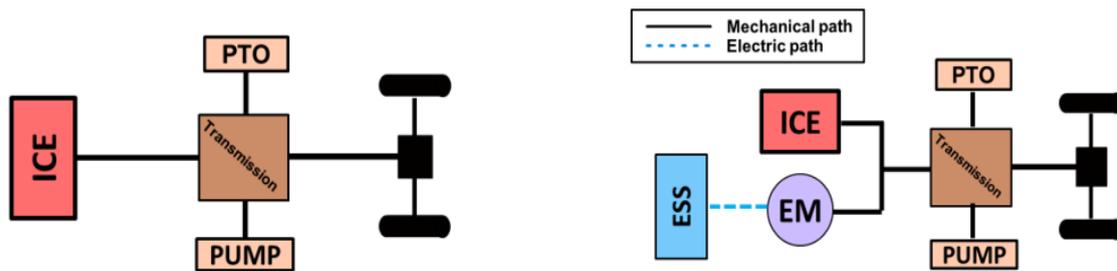


Figura 11: I due diversi sistemi a confronto [2]

L'analisi si concentra sul sistema trattore secondo un approccio "cradle-to-grave". Il ciclo di vita del trattore è suddiviso in tre parti, meglio illustrate nel successivo paragrafo.

L'unità funzionale utilizzata nella seguente analisi è stata impostata su $1 \text{ kg (veicolo)}^{-1} \cdot \text{anni}^{-1}$, in quanto, esprimendo il modello in funzione del peso del veicolo e al tempo stesso fornendo un orizzonte temporale di riferimento, si favoriscono la replicabilità e la riutilizzabilità dei dati forniti [2].

L'intero ciclo di vita del trattore è stato impostato su 10 anni dalla produzione allo smaltimento, inoltre nello scenario considerato il tempo di lavoro annuale è pari a 1000 ore, mentre la massa del mezzo agricolo considerata pari a 2500 kg [2].

Nella figura 12 è possibile osservare che il ciclo vita del prodotto oggetto di studio si articola in 3 fasi, in maniera tale da considerare adeguatamente quelli che sono gli step fondamentali del prodotto stesso:

- produzione: ogni passaggio dalla materia prima all'assemblaggio finale per ottenere il mezzo agricolo;
- vita di servizio: questa fase considera la vita utile del trattore che è costituita da due elementi essenziali, ovvero il consumo del carburante e la manutenzione ordinaria;
- end-of-life: una volta terminata la vita utile il trattore viene sottoposto ad una serie di trattamenti di smaltimento per evitare la produzione di materie prime ed energia dai sottoprodotti primari.

In figura 12 si riporta lo scenario considerato per quest'analisi



Figura12: Confini del sistema

3.2 LIFE CYCLE INVENTORY- TRATTORE TRADIZIONALE

Le tre fasi dell'analisi LCC rispecchiano la natura economica dell'analisi, in contrasto, ad esempio con la dimensione ambientale predominante nel modello LCA, dove lo stesso tipo di analisi viene effettuata ma dal punto di vista di impatto ambientale, e rappresentano un tentativo di dare maggiore efficacia al modello.

Sono ora analizzate più nel dettaglio tutte le fasi.

3.2.1 Produzione.

La LCC nella fase di produzione si riferisce all'analisi dei costi relativi a questa fase. Quest'ultima è una delle più cruciali all'interno dell'LCC perché rappresenta spesso la parte più significativa in termini di costi diretti.

Si inizia raccogliendo i dati riferiti alla fornitura dei materiali necessari alla produzione dei componenti e il costo della manodopera relativo.

Partendo dai vari componenti principali che compongono il mezzo agricolo (tab 1), per ognuno poi si è fatto il focus delle materie prime richieste (fonte dati [2]), e della manodopera necessaria all'assemblaggio (stimata secondo le considerazioni e i calcoli mostrati nella tabella 9 e seguente spiegazione), espressa sia in giorni lavorativi, sia in ore uomo, considerando una giornata lavorativa di 8 ore, 5 giorni lavorativi a settimana, e 52 settimane all'anno [2], come è possibile vedere nella tabella 7.

Per il calcolo della manodopera si veda la tabella 9 e la successiva spiegazione.

Sottosistema	Massa (kg)	Massa (%)
Cabina	230	9.20%
Motore	325	13%
Pneumatici	200	8%
Telaio e propulsore	1620	64.80%
Altri componenti	125	5%

Tab 1: Composizione della massa del sottoinsieme del trattore da frutteto

Elemento	Valore	Unità di misura
Acciaio	101.19	Kg
Gomma	1.87	kg
Alluminio	3	kg
Polimero termoindurente	35.24	kg
Polimero termoplastico	42.67	kg
Rame	5.03	kg
Vetro	26.39	kg
Colore	3.5	kg
Energia assemblaggio	492.24	MJ

Tab 2: Flussi elementari della cabina

Il motore (tabella 3) è stato modellato considerando la sua composizione principale del materiale (ghisa, acciaio, e alluminio).

Elemento	Valore	Unità di misura
Acciaio	52.62	kg
Ghisa	257.72	kg
Alluminio	14.66	kg
Energia assemblaggio	950.22	MJ

Tab 3: Il motore

Si è ipotizzato che il telaio del trattore (tabella 4) fosse realizzato essenzialmente utilizzando parti in ghisa e una piccola quantità di parti in acciaio.

Elemento	Valore	Unità di misura
Acciaio	486	kg
Ghisa	1134	kg

Tab 4: Telaio e propulsore

Infine, gli pneumatici sono stati modellati secondo la composizione del materiale definita da Dong et al [2].

Elemento	Valore	Unità di misura
Gomma	39.71	kg
Carbone	48.96	kg
Silice	20.92	kg
Olio	10.84	kg
Tessile	9.68	kg
Acciaio	20.28	kg
Energia assemblaggio	26.172	MJ

Tab 5: Gli pneumatici

Infine, nel gruppo delle “altre categorie” (tabella 6) rientrano tutti i restanti componenti principali dei veicoli. Nello specifico sono state considerate viti, vernice, plastiche per carrozzeria esterna e i componenti principali che costituiscono il posto di guida, ovvero il sedile, rollbar e cruscotto.

Elemento	Valore	Unità di misura
Dispositivi elettronici	10	kg
Cablaggio elettrico	10	kg
Materie plastiche	35	kg
Batteria al piombo	20	kg
Componenti in alluminio	25	kg
Componenti in acciaio	25	MJ

Tab 6: Altri componenti

Componente	Giorni	Tot ore lavoro
Cabina	6	48
Motore	30	240
Telaio	8	64
Propulsore	25	200
Pneumatici	5	40
Altri componenti	20	160

Tab 7: Manodopera per singoli componenti

Raccolti questi dati, sono stati messi insieme nella Tabella 8, nella quale sono state riportate tutte le materie prime necessarie alla realizzazione del trattore agricolo, espresse sia in forma di Functional unit (FU), sia in quantità assoluta. Come risultato finale, visibile nell'ultima colonna della tabella 8, sono riportati i costi di tutta la prima fase dell'analisi, espressi in euro, ma secondo la FU utilizzata nel modello.

Ponendo l'attenzione sui componenti in acciaio, data la loro quantità e presenza all'interno del veicolo, si è decisi di fare una macro-suddivisione per tipologie di lavorazione, visti i costi di lavorazione, e quindi i costi di acquisto, differenti.

Per quanto riguarda quest'ultimi, i prezzi inseriti sono una media dei dati trovati che fanno riferimento prevalentemente al mercato europeo a metà anno 2024 (Risorse utilizzate per ottenere dati aggiornati e accurati sui prezzi delle materie prime [37-44]).

Di seguito le specifiche e le caratteristiche considerate per la valutazione e la scelta di prezzi degli acciai:

- Acciaio in tubi → acciaio base tubolare
- Acciaio in lamiere → acciaio base in fogli
- Componenti in acciaio ottenuti tramite tornitura → il costo dipende molto dalla precisione e complessità, volumi di produzione richiesti, trattamenti post tornitura e materiali di scarto
- Componenti generici → il loro prezzo va dai 3 ai 6 euro al kg, a seconda del tipo di acciaio e della complessità di lavorazione

Flussi in ingresso	Unità	Value FU	Valore assoluto	Prezzo di mercato (euro/unità)	Costo (riferito alla FU)
Acciaio (in tubi- 18%)	Kg	0,004932	123.3	2.5	0.01233
acciaio (in lamiere- 25%)	Kg	0,00685	171.25	4.1	0.028085
acciaio (componenti ottenuti tramite tornitura-20%)	Kg	0,00548	137	7	0.03836
acciaio (componenti generici-37%)	Kg	0,010138	253.45	4.5	0.045621
Gomma	Kg	0,00166	41.5	0.98	0.0016268
Alluminio	Kg	0,00171	42.75	2.31	0.0039501
Polimero termoindurente	Kg	0,00141	35.25	4.5	0.006345
polimero termoplastico	Kg	0,00311	77.75	1.6	0.004976
Rame	Kg	0,000601	15.025	8.6	0.0051686
Vetro	Kg	0,000106	2.65	0.2	0.0000212
Verniciatura	Kg	0,00014	3.5	30	0.0042
Ghisa	Kg	0,0575	1437.5	0.5	0.02875
Carbone	Kg	0,00196	49	0.25	0.00049
Silice	Kg	0,000837	20.925	0.2	0.0001674
Olio	Kg	0,000434	10.85	15	0.00651
Tessile	Kg	0,000387	9.675	20	0.00774
Batteria al piombo	Kg	0.0008	20	10	0.008

Componenti elettronici	Kg	0,0004	10	320	0.128
Energia dell'assemblaggio	MJ	0,0588	1470	0.1	0.00588
Energia assemblaggio finale	MJ	0,65	16250	0.1	0.065
Manodopera					1.08375
Trasporto finale	Km		250	1.369	0.09396
Costo totale					1.5789311

Tab 8: Fase di produzione

	Ore	Costo (riferito alla FU)
Manodopera componenti	752	
Manodopera assemblaggio finale	115	
Totale	867	
Ore-uomo operai specializzati	476.85	16689.75
Ore-uomo operai generici	260.1	3901.5
Ore-uomo ingegneri e supervisori	130.05	6502.5
Costo TOTALE		27093.75

Tab 9: dettagli costo manodopera

Per la stima della manodopera necessaria alla realizzazione dei singoli componenti e all'assemblaggio sono state fatte stime che possono variare a seconda delle condizioni specifiche e delle pratiche d'azienda [45-49].

La voce "Manodopera componenti", della tabella 9, risulta essere la somma delle ore presenti nella tabella 7, e rappresenta il totale delle ore uomo necessarie per la realizzazione dei singoli componenti. A queste sono aggiunte le ore di assemblaggio finale per ricavare il totale. Tutto questo è stato calcolato facendo le seguenti considerazioni [50-51]:

CABINA:

- Progettazione e preparazione: 1-2 giorni
- Taglio e preparazione dei materiali: 1-2 giorni
- Assemblaggio della struttura: 2-3 giorni

- Installazione di vetri, porte e sistemi interni: 1-2 giorni
- Finiture e controlli finali: 1 giorno
- **Tempo totale stimato:** 6-10 giorni lavorativi

MOTORE:

- Progettazione e ingegnerizzazione: 1-3 settimane
- Produzione dei componenti principali: 2-4 settimane
- Assemblaggio del motore: 1-2 settimane
- Installazione di sistemi ausiliari: 3-5 giorni
- Controlli di qualità e test: 1-2 settimane
- **Tempo complessivo di lavorazione:** 6-12 settimane, considerando tutte le fasi dalla progettazione alla produzione e ai test finali.

PNEUMATICI

- Preparazione delle materie prime: 1-2 giorni
- Formatura e assemblaggio: 2-3 giorni
- Vulcanizzazione: 1-2 giorni
- Controllo di qualità: 1 giorno
- **Tempo complessivo di lavorazione:** 5-8 giorni, considerando tutte le fasi dalla preparazione delle materie prime alla produzione e ai test finali.

TELAIO E PROPULSORE

per il telaio

- Progettazione e preparazione dei materiali: 2-4 giorni
- Taglio e lavorazione: 2-3 giorni
- Assemblaggio e saldatura: 3-5 giorni
- Trattamento superficiale e verniciatura: 1-2 giorni
- Controlli di qualità: 1 giorno

per il propulsore

- Produzione dei componenti del motore: 2-4 settimane
- Assemblaggio del motore: 1-2 settimane
- Installazione di sistemi ausiliari: 3-5 giorni
- Controlli e test del motore: 1-2 settimane

Tempo totale stimato

- **Telaio:** 8-15 giorni
- **Propulsore (motore e sistemi associati):** 5-9 settimane

ALTRI COMPONENTI

Tempo complessivo di lavorazione: 4-6 settimane, considerando tutte le fasi dalla progettazione alla produzione e ai test finali.

ASSEMBLAGGIO FINALE

- Trattori di media potenza: 80-150 ore uomo (media = 115)
- Trattori di alta potenza: 150-300 ore uomo

Il costo orario della manodopera varia a seconda del paese e del livello di specializzazione richiesto [43-44]:

- **Operai specializzati** (ad esempio, saldatori, meccanici esperti, tecnici CNC):
costo orario: 20-50 euro all'ora (media =35)
percentuale di lavoro 55%
- **Operai generici** o non specializzati
Costo orario: 10-20 euro all'ora (media=15)
Percentuale di lavoro: 30%
- **Ingegneri e supervisori:**
costo orario: 30-70 euro all'ora (media =50)
percentuale di lavoro: 15%

Specificando, il totale delle ore (tabella 8) sono state moltiplicate per le tre differenti categorie di operai (55%, 30% e 15%) e nella colonna accanto per i rispettivi costi.

Il costo totale è stato inserito nella tabella 8.

Ultimo dato, i costi di trasporto, evidenziati in giallo sempre nella tabella 8, ottenuto sommando i due contributi:

- 2500 kg (peso del trattore) * costo di trasporto al kg (0.80 euro per grosse quantità)
- 250 km (raggio medio presenza aziende fornitrici [2]) * 1.396 (costo di trasporto al km [52])

3.2.2 Fase d'uso e manutenzione.

In questa sezione sono stati valutati i costi di un trattore da frutteto durante la sua vita utile. I due contributi principali di questa fase sono dovuti soprattutto al consumo di carburante e alla manutenzione di servizio. Secondo lo scenario ipotizzato, la manutenzione straordinaria non è stata considerata in quanto dato fortemente volatile e di difficile reperibilità.

Il ciclo di lavoro annuale considerato è composto da 5 attività sul campo ed è descritto nella tabella 10. Questo ciclo di lavoro si riferisce a operazioni comuni eseguite nelle coltivazioni di vigneti.

Compito	Tempo di lavoro annuale (%)	Potenza media (kW)
Diserbo	14.3%	35.6
Irrorazione	14.3%	42.1
Raccolta	14.3%	20.7
Aratura	28.6%	11.0
Legatura	28.6%	5.3

Tab 10: Ciclo di lavoro annuale di un trattore da frutteto [3]

In questo studio non sono stati considerati i guasti involontari. Inoltre, nella fase di utilizzo, è stato preso in considerazione il contributo del trasporto, ipotizzando una distanza media degli impianti di produzione e dei siti di produzione del carburante di 250 km dal luogo di lavoro del trattore sotto forma di trasporto terrestre tramite camion.

Partendo dalla fase di manutenzione questa è caratterizzata essenzialmente da 2 operazioni [2], [53]:

Flusso in ingresso	Unità di misura	Quantità totale	Prezzo di mercato (euro/unità)	Costo totale (usando FU)
Olio Lubrificante motore	[L]	200	12.5	0.1
Olio idraulico	[L]	100	6.5	0.026

Pneumatici	[Kg]	800	7	0.224
-------------------	------	-----	---	-------

Tab 11: Flussi elementari di manutenzione di servizio totale

Tali costi sono quelli riguardanti tutto il periodo di vita utile del mezzo agricolo, considerando tutte le manutenzioni necessarie qui di seguito elencate [3]:

- sostituzione dell'olio lubrificante motore ogni 300h
- sostituzione dell'olio idraulico ogni 1500h
- sostituzione pneumatici ogni 2500h

Nella fase d'uso, i costi economici riguardano principalmente i consumi di carburante. Il risultato è ottenuto moltiplicando i consumi per il prezzo unitario dai dati di mercato odierni.

Carburante (diesel)	Unità di misura	Quantità
Consumo orario di carburante per giornata lavorativa	[L/h]	8.2
Costo unitario carburante	[Euro/L]	1.680
Costo totale annuale carburante per FU	[Euro]	0.55104

Tab 12: Costo totale annuale carburante 2024 per il mezzo agricolo [54]

Il consumo di carburante annuale è stato ricavato considerando i dati forniti [2]

- 8.2 è il consumo orario del veicolo
- 1000 sono le ore lavorative annuali
- 1.68 costo unitario del carburante
- 25000 fattore di riduzione utilizzato per avere il risultato secondo FU

A differenza della fase di manutenzione, dove il costo complessivo riguarda tutta la vita del prodotto, nella fase di utilizzo si arriva ad un costo annuale di carburante, che non può essere semplicemente moltiplicato per il numero di anni di vita del mezzo ipotizzati nello scenario (10 anni), poiché si deve tener conto della variazione dei prezzi futuri.

3.2.3 fase di fine vita

Questa fase include tutte le attività legate alla dismissione, riciclo, smaltimento e gestione di un prodotto o sistema una volta che ha terminato il suo utilizzo attivo. In questa fase, si possono avere diverse tipologie di costi e considerazioni economiche. Questi costi possono essere diretti o indiretti, e possono variare notevolmente a seconda del settore, del tipo di prodotto e delle politiche di gestione ambientale.



Figura 13: modello di sviluppo sostenibile secondo i principi dell'economia circolare [55]

L'idea base dello scenario ipotizzato è di recuperare il più possibile, sia sottoforma di materie prime secondarie che di energia, per evitare la produzione di fonti primarie. Tutte le procedure di smaltimento sono state modellate secondo quelle già presenti nella fonte [3]: tutti i componenti sono disassemblati dal mezzo stesso, e questa operazione richiede una certa quantità di energia (ipotizzata uguale a quella necessaria per assemblare il singolo trattore durante la fase di produzione, ossia 50 MJ/kg veicolo). Una volta smontato il trattore, i diversi componenti vengono trasferiti ai corrispondenti impianti di riciclo. L'ipotesi di trasporto è la stessa della fase di utilizzo: gli impianti di riciclo si trovano a una distanza media di 250 km dal sito di smontaggio. Il trasporto avviene tramite camion, secondo il trasporto merci europeo generico con camion standard EURO 6 [3]. Queste due voci di costo sono state inserite nella tabella 14.

In alcuni casi, nella fase di fine vita il prodotto o alcune sue componenti possono avere un valore residuo, ad esempio nel caso di metalli preziosi o materiali riciclabili. Questo valore può compensare parzialmente i costi di smaltimento o addirittura generare profitti. Questo è quello che accade nell'analisi qui presente, nella quale alcuni componenti della fase iniziale vengono riciclati [2].

I diversi componenti dei veicoli possono essere suddivisi in 3 categorie principali:

- componenti metallici,
- componenti in plastica,
- componenti speciali e dispositivi elettronici.

I materiali vengono riciclati in base al loro specifico processo di riciclo, e il risultato è la produzione di materie prime secondarie da rottami. È stato assunto un tasso di recupero per ogni singolo metallo per creare uno scenario di riciclo realistico [3]: 88% per acciaio e ghisa, 96% per alluminio e 100% per ottone e rame.

I componenti in plastica invece possono essere suddivisi in tre sottocategorie, in base al tipo di materiale plastico: componenti termoplastici, i termoindurenti e prodotti derivati dalla gomma. I materiali termoplastici sono solitamente riciclabili, perciò i loro trattamenti di smaltimento sono finalizzati al recupero di alcune materie prime secondarie, utilizzando un tasso di recupero medio dell'84% [3]. Gli altri sottogruppi appartengono alla categoria dei materiali non riciclabili; pertanto hanno ricevuto un processo di conversione dei rifiuti in energia (produzione netta di energia 7.66 MJ/kg) [3].

I componenti derivanti dalla gomma, la maggior parte dei quali sono rappresentati dagli pneumatici, vengono inceneriti per evitare la produzione di vapore da fonti primarie (potere calorifero di 31.99 MJ/kg), che è uno degli elementi più importanti nella produzione degli pneumatici stessi.

L'ultima categoria raggruppa componenti complessi, come tutti i componenti elettronici presenti nel trattore. Lo scopo dei trattamenti di smaltimento, riservati a questi componenti, è quello di recuperare materie secondarie e metalli preziosi.

Materiale	Guadagno dal processo di riciclo (euro)	Costo del processo di riciclo (euro)	Totale risparmio (euro in FU)
Acciaio	570	120	0.018

Ghisa	650	250	0.016
Alluminio	100	20	0.0032
Pneumatici	600	260	0.0136
Rame	135	20	0.0046
Polimero termoidurente	30	15	0.0006
Polimero termoplastico	110	60	0.002
Vetro	40	20	0.0008
Componenti elettronici	350	450	-0.004
TOTALE RISPARMIO			0.0548

Tab 13: Fase di fine vita- costi e risparmi

Analizzando un materiale per volta, si punta l'attenzione sul guadagno dal riciclo, che risulta essere pari al valore dello stesso materiale in forma grezza (moltiplicato per la percentuale della quantità ricavata), poi si considera il costo da sostenere per riciclare il materiale stesso, e per ultimo (presente nella terza colonna della tabella 13) il risparmio totale ricavabile dall'intero processo di riciclo.

- La quantità di acciaio considerata risulta essere pari alla somma delle diverse forme di acciaio presenti nelle prime righe della tabella 8 (prendendo solo la percentuale del materiale riciclabile sopra espressa), non facendo quindi distinzioni, e recuperando il valore dell'acciaio riciclato, considerato sul mercato europeo pari a 0.875 euro/kg [56]. Per quanto riguarda la cifra del costo di riciclo si aggira intorno ai 200 euro per tonnellata [57].
- Il valore recuperato della ghisa, dell'alluminio e del rame si è ipotizzato essere esattamente pari al valore di mercato dello stesso materiale ma allo stato grezzo; quindi, sono stati inseriti gli stessi valori presenti nella tabella 8, sempre scontati per il tasso percentuale di materiale riciclabile corrispondente [56-57].
- Gli pneumatici sono riciclati tutti quelli utilizzati dei 10 anni di vita del mezzo agricolo. Questi sono sottoposti ad un processo con recupero di energia, dal quale c'è produzione di cenere e recupero di energia. In questo caso il guadagno del riciclo è quantificato considerando la seguente equazione: 1 kg di pneumatico bruciato produce 7.5 MJ di energia elettrica [58]. I kilogrammi totali di pneumatici riciclati sono 800 (corrispondente a 4 set di gomme, necessari per tutta la vita del mezzo), e l'energia è quantificata a valore di 0.1 euro /MJ. La stessa conversione è stata utilizzata nel processo di riciclo dei polimeri termoidurenti.

- I polimeri termoplastici e il vetro sono stati riciclati ipotizzando che recuperino tutto il loro valore di acquisto iniziale della materia grezza.
- Il riciclo dei componenti elettronici di un trattore può essere un processo interessante, ma complesso e soprattutto costoso. Il guadagno netto potrebbe oscillare tra una piccola perdita e un guadagno contenuto (es. -100 a +100 euro per trattore). Tuttavia, se fatto su larga scala e con efficienza, il riciclo può diventare economicamente vantaggioso, soprattutto considerando gli incentivi ambientali o le politiche di responsabilità sociale delle imprese agricole.

Oltre questi costi e risparmi sono da aggiungere altre voci di costo, che sono analizzate qui di seguito:

Costi di smaltimento, che comprendono tutte le spese legate alla rimozione, al trasporto e alla gestione dei rifiuti o dei materiali dismessi. Questi possono includere anche i costi per l'affitto o l'uso di discariche o impianti di smaltimento specializzati. La quantificazione dei costi di smaltimento di un trattore agricolo varia in base a numerosi fattori, tra cui il tipo di materiali da smaltire, i costi di trasporto e manodopera. Una stima accurata richiede un'analisi specifica delle componenti del trattore, della loro condizione e delle normative locali, ma per la seguente analisi è considerata una media dei dati ricavati dalle fonti [52-54]. Costo totale stimato: **500-1360 euro**.

Costi ambientali e di conformità: molte normative richiedono procedure specifiche per il trattamento e lo smaltimento di determinati materiali, soprattutto se pericolosi. Questo può aumentare i costi complessivi, includendo sanzioni o multe se le normative non vengono rispettate. Queste tasse possono ammontare a **50-300 euro**, a seconda della regione e del tipo di materiali.

Certificazioni di smaltimento: In alcuni casi, è necessario ottenere certificazioni che dimostrino che il trattore è stato smaltito in conformità con le normative ambientali. Queste certificazioni possono comportare costi amministrativi e legali. Si assume che in tale analisi questi non siano presenti.

Audit e ispezioni ambientali: Le aziende agricole o i proprietari di macchinari potrebbero essere soggetti a controlli o ispezioni per verificare la corretta gestione e smaltimento dei rifiuti. I costi associati a queste ispezioni possono variare, ma generalmente si aggirano attorno a **100-500 euro** per ispezione.

Tutti questi eventuali costi aggiuntivi sono riportati nella seguente tabella, nella quale sono stati inseriti anche i costi di trasporto necessari per raggiungere il centro di riciclo, e i costi di energia necessaria allo smantellamento dei singoli componenti dal trattore:

Costi eventuali	Prezzo	Costi espressi in FU
Costi di smaltimento	930	0.0372
Costi ambientali	175	0.007
Ispezioni ambientali	300	0.012
Costi di trasporto	2350	0.09396
Costi energia per smontare il trattore	12500	0.5
Totale	16255	0.65016

Tab 14: Fase di fine vita: ulteriori costi

3.3 TRATTORE CON COMPONENTE IBRIDA: PRODUZIONE, VITA UTILE E FINE VITA

L'attività di valutazione si basa sul confronto tra un ICET (trattore con combustione interna diesel), che presenta il veicolo tradizionale attualmente utilizzato, e un HET (trattore ibrido elettrico, dotato sia di motore termico diesel che elettrico) della stessa potenza (75KW) e avente la stessa dimensione.

3.3.1 HET- Fase di produzione.

I due veicoli tra di loro sono uguali in tutto, al netto della power unit (unità che genera la potenza all'interno del veicolo). La power unit dell'ICET è composta solo dal motore termico di 75 kW, con il suo serbatoio di diesel, mentre nel HET è composta da un motore di 55kW, un motore elettrico da 20 kW, un pacco batterie di 6 kW/h e l'inverter, indispensabile per il corretto funzionamento del motore elettrico. Il motore elettrico è di tipo PMSM, che sta per motore sincrono a magneti permanenti, noto per la sua elevata efficienza e prestazioni, quali una densità di potenza maggiore rispetto ai motori asincroni e a induzione, che li rende più compatti e leggeri, l'elevata stabilità di velocità e controllo preciso e un altro vantaggio

di questo tipo di motore elettrico così come la produzione di meno calore che permette minori perdite e maggior durata del sistema di raffreddamento. È importante sottolineare perché a differenza di altri tipi di motori elettrici questo è più costoso, e a livello economico questa scelta genera una consistente differenza.

Power unit	ICET	HET
Motore diesel a combustione interna	Da 75 kW	Da 55 kW
Motore elettrico PMSM	-	Da 20 kW
Pacco batteria agli ioni di litio	-	6 kW/h
Inverter	-	Da 40 kW

Tab 15: I due diversi sistemi analizzati [2]

Come possibile osservare dalla tabella 15, la parte elettrica del veicolo HET in questo caso è composta da 3 elementi che sono inseriti come se fossero un'aggiunta in più al veicolo ICET, perché, come detto prima, i due veicoli sono uguali al netto della parte di generazione di stoccaggio e di potenza. Da una parte si ha solo serbatoio e motore termico (ICET), dall'altra si ha un motore diesel di potenza più piccola, e unito a questo c'è un motore elettrico di 20 kW (la somma delle due potenze è uguale a quella del motore termico del trattore tradizionale), più il pacco batteria e l'inverter.

Sulla base di questo è stata fatta la stima dei costi. Attualmente il prezzo di un motore elettrico dipende dalla potenza, dal tipo di motore e dalle caratteristiche tecniche. In questa analisi, considerando un motore sincrono a magneti permanenti, il costo è di circa 200-300 euro/kW [62] (250 euro/ kW * 20kW).

La batteria agli ioni di litio può variare a seconda del tipo, della qualità delle celle, della densità energetica, e delle condizioni di utilizzo. Le batterie di fascia alta per applicazioni intensive, come nel caso in analisi per veicoli elettrici, ha un costo tra i 600 e gli 800 € per kW/h, ossia un costo totale stimato per lo scenario ipotizzato che varia dai 3600 e i 4.800 euro [63-64].

Il costo di un inverter di media potenza (20-50 kW) va dai 2000 ai 5.000 euro. Inverter di questa classe sono tipicamente usati per trattori e mezzi agricoli di dimensioni medio

grandi con sistemi ibridi, dove devono gestire una parte significativa della potenza del veicolo [65-66].

Per quanto riguarda il motore diesel a combustione interna, il prezzo considerato nello scenario precedente è stato di circa 300 € per kW [67-68]. Avendo nel trattore ICET un motore di potenza 75 kW il costo registrato era di circa 22.500 €, in questo caso invece la potenza è minore, per questo anche il relativo costo risulta più basso, 16500 euro. Nella tabella 16 questa voce di costo è riportata in negativo, poiché il totale calcolato risulta essere i costi che sono sostenuti in più nella fase di produzione del secondo scenario, quello del trattore HET, rispetto allo scenario precedente, dove si è analizzato il trattore di tipo ICET.

Componente della Power Unit di HET	Costo (euro)
Motore elettrico PMSM	5000
Batteria agli ioni di litio	4200
Inverter	3500
Motore diesel a combustione interna (55 kW)	-6000
TOT COSTI AGGIUNTIVI	6700

Tab 16: Costi di produzione aggiuntivi del trattore HET rispetto a quelli del mezzo di tipo ICET

3.3.2 HET-Manutenzione e fase d'uso.

Andando ad analizzare questa seconda fase, si può osservare, dai dati sottoindicati, che la tecnologia ibrida introduce particolari vantaggi (risparmio di carburante, minori emissioni) ma anche sfide legate ai costi di manutenzione straordinaria, associati alla parte elettrica del trattore. In questo studio però si è ipotizzato che la durata di questi componenti sia garantita per 10 anni, e quindi gli eventuali costi legati ad essi (come la necessità di sostituire l'inverter o il pacco batteria a causa di un guasto) rientrano in quella che è la manutenzione straordinaria, voce di costo non inclusa in questa analisi (poiché si è ipotizzato uno scenario semplificato dove si considera solo i costi di manutenzione ordinaria).

In questa analisi vengono considerate le seguenti voci di costo [2-3]:

Flusso in ingresso	Unità di misura	Quantità totale	Prezzo di mercato (euro/unità)	Costo totale (usando FU)
Olio Lubrificante motore	[L]	200	12.5	0.1
Olio idraulico	[L]	100	6.5	0.026
Pneumatici	[Kg]	800	7	0.224

Tab 17: Flussi elementari di manutenzione di servizio totale del motore diesel (HET) [8]

Come si nota dalla tabella 17, si lasciano invariati i costi relativi alla manutenzione del motore diesel. Ipotizzando uno scenario semplificato, nel quale la batteria riesca a durare per tutto il periodo di servizio (la scelta di considerare 10 anni come intervallo di tempo di vita utile è stata fatta appositamente per evitare di considerare anche queste voci di costo).

Carburante (diesel)	Unità di misura	Quantità
Consumo orario di carburante per giornata lavorativa	[L/h]	6.8
Costo unitario carburante	[Euro/L]	1.680
Costo totale annuale carburante per FU	[Euro]	0.45696

Tab 18: Costo totale annuale carburante 2024 per il mezzo agricolo HET [54]

Il consumo di carburante annuale è stato ricavato considerando i dati forniti [2]

- 6.8 è il consumo orario del veicolo
- 1000 sono le ore lavorative annuali
- 1.68 costo unitario del carburante
- 25000 fattore di riduzione utilizzato per avere il risultato secondo FU

Energia elettrica	Unità di misura	Quantità
Consumo giornaliero di energia per giornata lavorativa	[kWh]	6
Costo unitario energia	[euro/kWh]	0,12298
Costo totale annuale energia per FU	[euro]	0.0036894

Tab 19: Costo totale annuale energia elettrica 2024 per il mezzo agricolo HET [51-54]

Il consumo di energia annuale è stato ricavato considerando i dati forniti [28]

- 6 kWh è il consumo giornaliero del mezzo agricolo
- 1000 sono le ore lavorative annuali (assumendo 8 ore al giorno, sono 125 giornate lavorative all'anno)
- 0,12298 costo unitario dell'energia
- 25000 fattore di riduzione utilizzato per avere il risultato secondo FU

Anche qui, a differenza della fase di manutenzione, dove il costo complessivo riguarda tutta la vita del prodotto, nella fase di utilizzo si arriva ad un costo annuale sia del carburante che dell'energia, che non può essere semplicemente moltiplicato per il numero di anni di vita del mezzo ipotizzati nello scenario (10 anni), poiché si deve tener conto della variazione dei prezzi futuri. Questo fattore sarà considerato e calcolato poi nel capitolo successivo.

3.3.3 Fine vita di un trattore HET.

Per quanto riguarda la fase di smaltimento anche in questo caso è stato considerato uno scenario di elevato riciclo. Tutti i processi considerati per modellare la fase di smaltimento sono gli stessi utilizzati per il veicolo ICET tradizionale, mentre per i componenti elettrici: il motore elettrico, essendo composto principalmente da acciaio, alluminio e rame, si può riciclare recuperando i materiali principali [3], l'inverter si può considerare come se fosse un insieme di schede elettroniche, così da poterne stimare costi e ricavi relativi al suo riciclo [3], la batteria agli ioni di litio, si ipotizza in questa analisi, andrà incontro ad un processo di rigenerazione per applicazioni di tipo "second life", e sarà riutilizzata in un altro ambito. Tale argomento è più approfondito nel successivo paragrafo.

Nella tabella 20 sono presenti i guadagni ricavati dal valore dei materiali riciclati e i costi del processo di riciclo dei singoli componenti elettronici, che vanno dallo smantellamento e separazione dei materiali, al trattamento e smaltimento dei materiali pericolosi, fino al recupero e alla rivendita dei materiali stessi [71-77]. Questi costi e ricavi sono da aggiungere a quelli già presenti nello scenario di trattore ICET per avere i costi e i ricavi totali del mezzo agricolo HET.

Componente	Guadagno dal processo di riciclo/second life (euro)	Costo del processo di riciclo (euro)	Totale risparmio (euro in FU)
Motore elettrico PMSM	+65	-425	-0.0144
Batteria agli ioni di litio	+2400	-3050	-0.026
Inverter	+90	-485	-0.0158
TOT			-0.0562

Tab 20: Guadagni e costi del riciclo della parte elettrica del trattore HET

Oltre alle voci di costo e di risparmio dovuti allo smaltimento e al riciclo dei materiali, in questo scenario, essendo il mezzo in questione un trattore ibrido elettrico, ci sono degli aspetti da tenere in considerazione. Il più importante è il second life della batteria agli ioni di litio. Le relative voci di costo e di risparmio presenti nella tabella 20 sono esplicate nel successivo paragrafo.

3.4 BATTERIA AGLI IONI DI LITIO: SCENARIO DI RICICLO E SCENARIO DI SECOND-LIFE

La batteria agli ioni di litio, detta anche pacco batteria, può essere sia riciclata, sia avere una seconda vita. In questa tesi lo scenario di second life è quello ipotizzato per la batteria agli ioni di litio.

Il riutilizzo delle batterie agli ioni di litio, chiamato “second life” (seconda vita), è un processo in cui le batterie esauste, ma ancora funzionali, vengono riconvertite per altri scopi, generalmente meno impegnativi rispetto al loro utilizzo originario. Per un pacco batterie come quella considerata nell’analisi in questione da 6 kWh, la seconda vita offre potenziali risparmi e guadagni significativi, anche se comporta costi specifici. Ecco i principali aspetti economici [88-89]:

1. Raccolta e Trasporto

- La raccolta e il trasporto delle batterie agli ioni di litio sono regolati da normative di sicurezza per il trattamento di materiali potenzialmente pericolosi.
- I costi possono oscillare intorno ai 50 euro per Kw/h per pacco batteria.

2. Ispezione e Valutazione dello Stato della Batteria

- La batteria deve essere valutata per capire la capacità residua e la possibilità di reimpiego. Questo processo include test diagnostici per valutare degrado, sicurezza e funzionalità.
- Il costo medio per l'ispezione e la valutazione è intorno ai 50 euro per kWh, anche se può essere più elevato per le batterie che necessitano di test approfonditi.

3. Ricondizionamento e Riparazione

- In questa fase, le celle degradate vengono sostituite, i moduli danneggiati vengono riparati e la batteria viene riassemblata per adattarsi al nuovo utilizzo.
- Per una batteria da 6 kWh, questo può costare tra 1000 e 2000 euro in base alla quantità di riparazioni e al tipo di componenti sostituiti.

4. Riassemblaggio e Aggiornamento del Sistema di Gestione della Batteria (BMS)

- Le batterie vengono dotate di un nuovo sistema di gestione (Battery Management System, o BMS) che le rende compatibili con la nuova applicazione, come stoccaggio per energia domestica o stazioni di ricarica.
- Il costo del nuovo BMS parte da 320 euro, e, considerando anche il costo del riassemblaggio, si può arrivare anche sui 400 euro circa.

5. Costi di Certificazione e Conformità Normativa

- Le batterie riqualificate devono rispettare normative di sicurezza specifiche, che richiedono certificazioni.
- Questi costi sono variabili, ma per una batteria possono arrivare a circa 200-400 euro per test e certificazione.

3.4.3 Guadagni Potenziali: Vendita delle Batterie di Seconda Vita

- Una batteria agli ioni di litio da 6 kWh ricondizionata può essere venduta per 400-600 euro per kWh, con un prezzo che varia in base alla capacità residua e alla qualità del ricondizionamento.

3.4.4 Calcolo Economico Complessivo

In generale, la batteria da 6 kWh del trattore HET di seconda vita può comportare costi di circa **3300 euro** (inclusi trasporto, diagnosi, riparazione, riassettaggio e certificazione). Con un prezzo di vendita di circa **2400 euro** il margine di guadagno, che risulta negativo quindi rappresenta il costo finale del riciclo della batteria, può aggirarsi intorno ai **900 euro per pacco batteria**, a seconda dell'efficienza del processo [81-82].

In conclusione, il processo di second Life di batterie agli ioni di litio può risultare economicamente svantaggioso per i produttori di mezzi agricoli (maggiori costi di smaltimento). Per i compratori invece, i quali beneficiano di un sistema di accumulo a costo inferiore rispetto a una batteria nuova, può essere un'ottima alternativa all'acquisto di una nuova sicuramente più costosa, oltre ad essere importante per l'ambiente: riutilizzare la batteria invece di smaltirla contribuisce a ridurre i rifiuti e l'estrazione di materie prime, generando risparmi indiretti legati alla sostenibilità.

QUARTO CAPITOLO

ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

4.1 RISULTATI DELLE VARIE FASI

In questa sezione verranno esposti, analizzati e discussi i risultati della valutazione economica. La suddivisione dell'analisi LCC nelle diverse fasi del ciclo di vita permette di ottenere una valutazione economica dettagliata e di lungo periodo. Questo approccio supporta decisioni più consapevoli, permettendo di considerare l'intero ciclo di vita di un sistema o prodotto, piuttosto che focalizzarsi unicamente sui costi iniziali o su una singola fase.

Si parte dai risultati della **fase di produzione**, che si ricorda essere la fase che tiene conto di tutti i processi, dall'estrazione delle materie prime all'assemblaggio finale del veicolo, necessari per ottenere l'ICET (trattore tradizionale) e il HET (mezzo con componente ibrida). I costi iniziali di acquisto di un trattore agricolo rappresentano una parte importante dell'investimento, ma l'analisi LCC evidenzia che non sono l'unico fattore critico. La scelta di un trattore più economico potrebbe sembrare vantaggiosa nel breve termine, ma nel lungo periodo potrebbe comportare costi maggiori legati alla manutenzione, ai consumi energetici o all'affidabilità. Come si può osservare dalla tabella 16, la differenza dei costi tra i due scenari in questa fase (nella tesi qui presente, in cui sono state fatte considerazioni per snellire il lavoro) è rappresentata dall'acquisto dei componenti della power unit del mezzo HET, ossia dal costo del motore elettrico, di quello della batteria agli ioni di litio e dell'inverter. Il motore a diesel invece, rappresenterà una spesa inferiore nel secondo scenario, poiché la sua potenza nel trattore ibrido è minore (50 kW rispetto ai 75 kW del trattore ICET).

Voci (euro)	ICET	HET	Differenza % (HET rispetto a ICET)
Costi in FU	1.5789	1.8469	
Costi in termini assoluti	39 473.5	46 173.5	+17%

Tab 21: Costi totali della fase di produzione

Uno degli aspetti chiave dell'analisi LCC riguarda i costi di **gestione e manutenzione**. Spesso i trattori più avanzati tecnologicamente possono avere costi operativi e di manutenzione inferiori grazie a sistemi più efficienti dal punto di vista energetico e a una progettazione che richiede interventi di manutenzione meno frequenti. Tuttavia, i costi delle riparazioni e dei pezzi di ricambio potrebbero aumentare in trattori più complessi e tecnologicamente sofisticati. Come detto in precedenza, in questa analisi si ipotizza uno scenario semplificato, nel quale i componenti elettrici, elettronici e la batteria riescano a durare per tutto il periodo di servizio.

Voci (euro)	ICET	HET	Differenza % (HET rispetto a ICET)
Costi in FU	0.35	0.35	
Costi in termini assoluti	8 750	8 750	+0%

Tab 22: Costi totali di manutenzione

La fase finale di **smaltimento e riciclo**, invece, porta ad avere un'uscita di denaro dovuta a tutta la parte dei costi di smaltimento, maggiore dell'entrata agevolata dal riciclo dei materiali, ma comunque importante per poter portare avanti un'economia di sviluppo sostenibile. In questa fase è meglio visibile la differenza tra i due scenari. Partendo dalle spese del trattore agricolo ICET, si aggiungono voci sia di costo che di risparmio per quanto riguarda il caso del trattore HET. Come mostrato nella tabella 20, i costi da aggiungere sono quelli relativi al riciclo del motore elettrico e dell'inverter, oltre che alla preparazione della batteria agli ioni di litio per una seconda vita. Ma il grande vantaggio, che è qui visibile, presente nel caso di mezzo agricolo ibrido, è nella voce dei risparmi. Questi aumentano grazie al margine potenziale di guadagno dalla vendita della batteria di second life (tutti i dati per i relativi calcoli sono stati presi dalle voci di costo del paragrafo 3.4).

Voci (euro)	ICET	HET	Differenza % (HET rispetto a ICET)
Costi in FU	(-) 0.6502	(-) 0.8186	
Costi in termini assoluti	(-)16 255	(-)20 465	+26%
Risparmi in FU	(+) 0.0548	(+) 0.157	
Risparmi in termini assoluti	(+)1 370	(+)3 925	+285%

Tab 23: Costi e risparmi totali dell'end-of-life

Le voci di costo relative ai **consumi** sono invece trattate come ultime poiché sono voci di costo annuali, a differenza di tutte le altre considerate fino ad ora. Queste risentono della variazione di prezzo negli anni, ed è per questo che non possono essere semplicemente moltiplicate per gli anni di servizio del mezzo (10), ma devono assorbire l'incremento di valore previsto nei prossimi anni. Questo argomento sarà ripreso in modo più approfondito nel paragrafo successivo.

L'efficienza del consumo di carburante è un fattore cruciale nel ciclo di vita del trattore. Trattori che consumano meno carburante non solo riducono le spese operative, ma possono anche avere un impatto ambientale inferiore, ed è quello che accade utilizzando un trattore HET, che si alimenta di una quantità inferiore di diesel necessitando però della componente energetica. Come è osservabile dalla tabella 24, il costo totale annuale della fase di utilizzo del mezzo agricolo HET, anche se composti da due voci di costo, è inferiore di più di 2000 euro annuali rispetto a quello tradizionale. Questo dimostra che non solo ci sarà un minor impatto ambientale nell'utilizzare un mezzo di tipo ibrido, ma anche un risparmio dei costi.

Voci (euro)	ICET	HET	Differenza % (HET rispetto a ICET)
Costi in FU - carburante	0.55104	0.45696	
Costi in termini assoluti - carburante	13 776	11 424	-17%
Costi in FU -energia	-	0.0036894	
Costi in termini assoluti - energia	-	92.5	+100%

Tab 24: Costi annuali (2024) del carburante e dell'energia

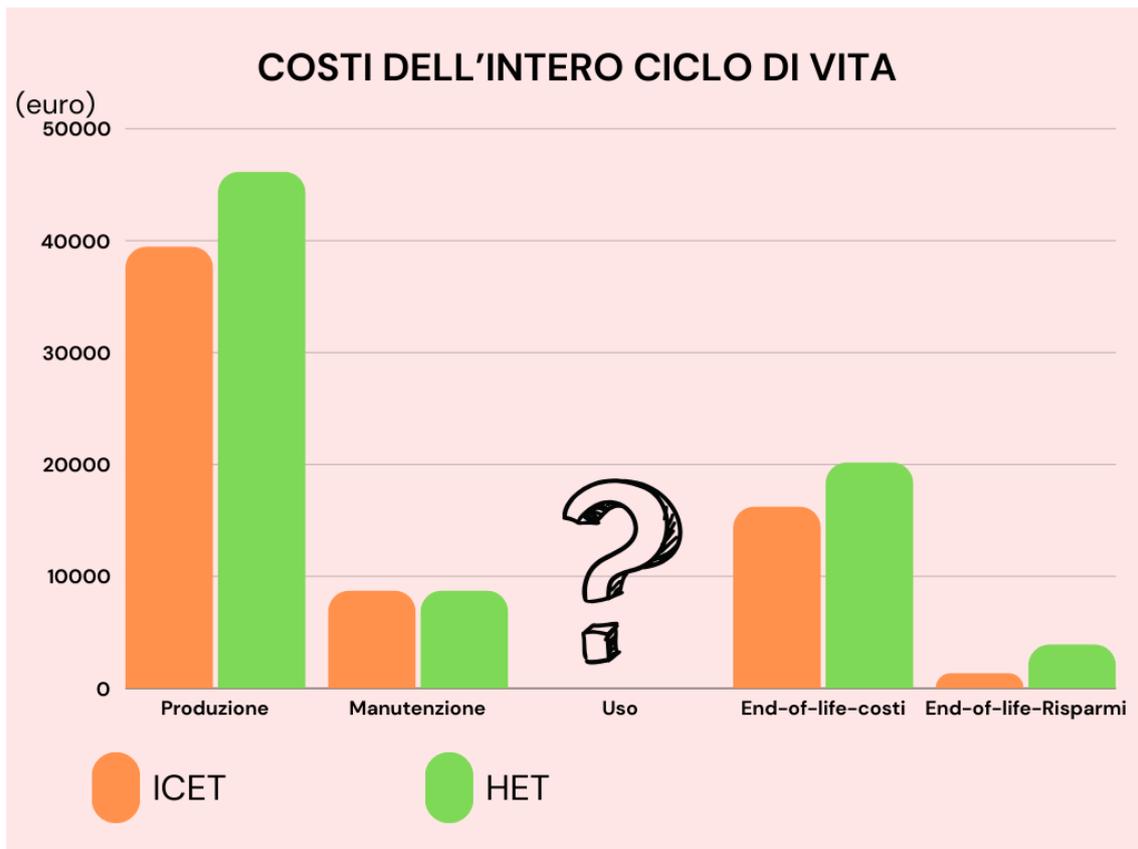


Grafico 1: Confronto dei costi tra i due scenari (grafico realizzato dall'autrice della tesi)

4.2 ANALISI DI SENSITIVITA'

Nel grafico 1, presente nel paragrafo precedente, gli unici dati mancanti sono quelli relativi ai costi d'uso. Questo perché, come si è già detto in precedenza, il mercato del carburante e dell'energia non rimarrà invariato nel corso degli anni; perciò, in questa analisi si è deciso di porre attenzione anche a questo fattore.

L'andamento del mercato del carburante è un fenomeno complesso causato da una serie di fattori globali, economici, politici e ambientali che influenzano la domanda e l'offerta di petrolio e gas. Inoltre, questa volatilità è motivo di preoccupazione per molte industrie e consumatori. Di seguito i principali elementi che contribuiscono a questa incertezza [90-93]:

4.2.1 Fattori Geopolitici

Le tensioni internazionali, come conflitti in aree chiave di produzione (ad esempio, il Medio Oriente o la Russia), possono influire sull'offerta di petrolio, spingendo i prezzi verso l'alto.

Sanzioni economiche o instabilità politica in paesi produttori possono ridurre l'offerta, contribuendo a un aumento dei costi del diesel.

4.2.2. Domanda e Offerta di Petrolio

Il diesel, derivato dal petrolio, è fortemente influenzato dal rapporto domanda-offerta globale di greggio. Se la domanda globale di energia dovesse aumentare, ad esempio per la ripresa economica o lo sviluppo di paesi emergenti come Cina e India, questo potrebbe portare a un aumento dei prezzi del carburante. Invece, una diminuzione della domanda causata da crisi economiche o cambiamenti nelle abitudini di consumo potrebbe ridurre i prezzi.

4.2.3. Politiche Energetiche e Decarbonizzazione

Le politiche climatiche e la transizione energetica verso fonti rinnovabili hanno un impatto significativo. Molti governi stanno introducendo normative più severe per ridurre le emissioni di carbonio, il che potrebbe comportare tasse aggiuntive o maggiori costi di produzione per i carburanti fossili, compreso il diesel. Allo stesso tempo, se le tecnologie verdi (come veicoli elettrici) diventeranno più diffuse, la domanda di diesel potrebbe diminuire, abbassando i prezzi.

4.2.4. Tecnologie e Innovazioni nell'Energia

Innovazioni tecnologiche, come il miglioramento delle tecniche di estrazione (fracking) o l'introduzione di biocarburanti, potrebbero influenzare l'offerta e il prezzo del diesel. Le tecnologie che permettono di estrarre petrolio a costi inferiori potrebbero far scendere il prezzo del diesel, mentre tecnologie di carburanti alternativi potrebbero ridurre la dipendenza dal diesel tradizionale.

4.2.5. Tasse e Regolamentazioni

Le politiche fiscali nei vari paesi influenzano direttamente il prezzo del diesel. Aumenti delle accise sul carburante, ad esempio, vengono spesso adottati per disincentivare l'uso di combustibili fossili, specialmente nei paesi europei. Questo potrebbe portare a un aumento dei prezzi del diesel per i consumatori.

4.2.6. Cambiamenti Climatici ed Eventi Estremi

Gli eventi climatici estremi, come uragani o inondazioni, possono danneggiare le infrastrutture petrolifere e di raffinazione, causando interruzioni nella catena di approvvigionamento e improvvisi aumenti dei prezzi. Anche le misure di risposta ai

cambiamenti climatici, come l'introduzione di normative più severe sulle emissioni, possono aumentare il costo della produzione del diesel.

4.2.7. Speculazione e Mercati Finanziari

Il diesel, essendo un derivato del petrolio, è anche soggetto alla speculazione nei mercati finanziari. Eventuali crisi o fluttuazioni nei mercati delle materie prime possono causare improvvise variazioni di prezzo.

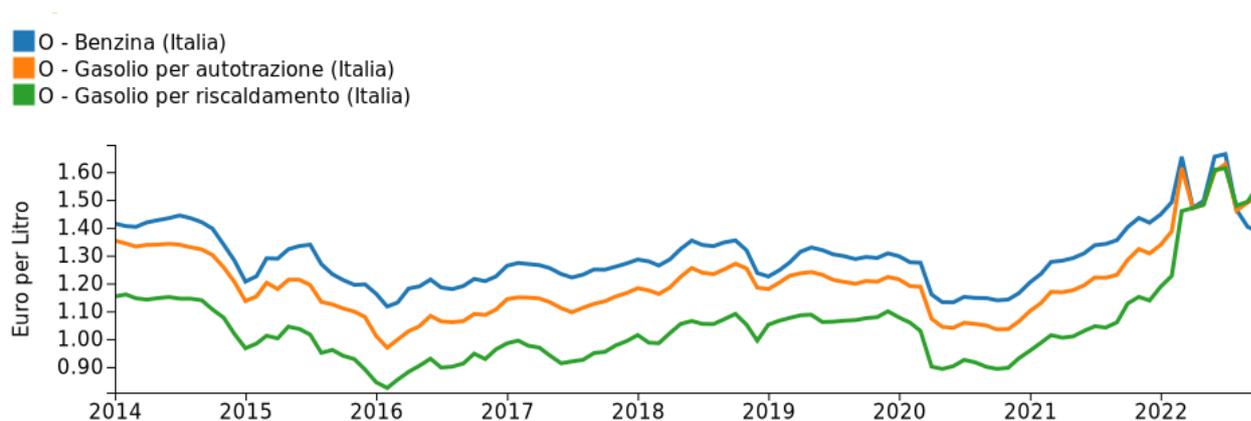


Grafico 2: Andamento del carburante negli ultimi 10 anni [89]

Analizzando tutti i dati presenti fino ad oggi, e considerando i fattori sopra elencati, è possibile ipotizzare delle tendenze future [90-93]:

- **Aumento a Medio-Lungo Termine:** A causa della crescente pressione per ridurre le emissioni di carbonio e della transizione verso energie rinnovabili, si prevede che il costo del diesel possa aumentare progressivamente. Le politiche di tassazione del carbonio e la riduzione della produzione di petrolio potrebbero portare a un aumento dei prezzi, anche se la domanda complessiva di carburanti fossili potrebbe diminuire.
- **Picchi Temporanei:** Eventi geopolitici, come conflitti o sanzioni, possono causare picchi improvvisi nei prezzi.
- **Riduzione a Lungo Termine:** Se la transizione verso veicoli elettrici e altre tecnologie sostenibili continuerà a crescere, la domanda di diesel potrebbe ridursi, causando una stabilizzazione o riduzione dei prezzi a lungo termine.

In sintesi, è probabile che il prezzo del diesel nel futuro sia caratterizzato da fluttuazioni, con una tendenza generale all'aumento a causa delle politiche climatiche, delle tasse e delle incertezze geopolitiche, bilanciata eventualmente da una diminuzione della domanda dovuta alla transizione energetica.

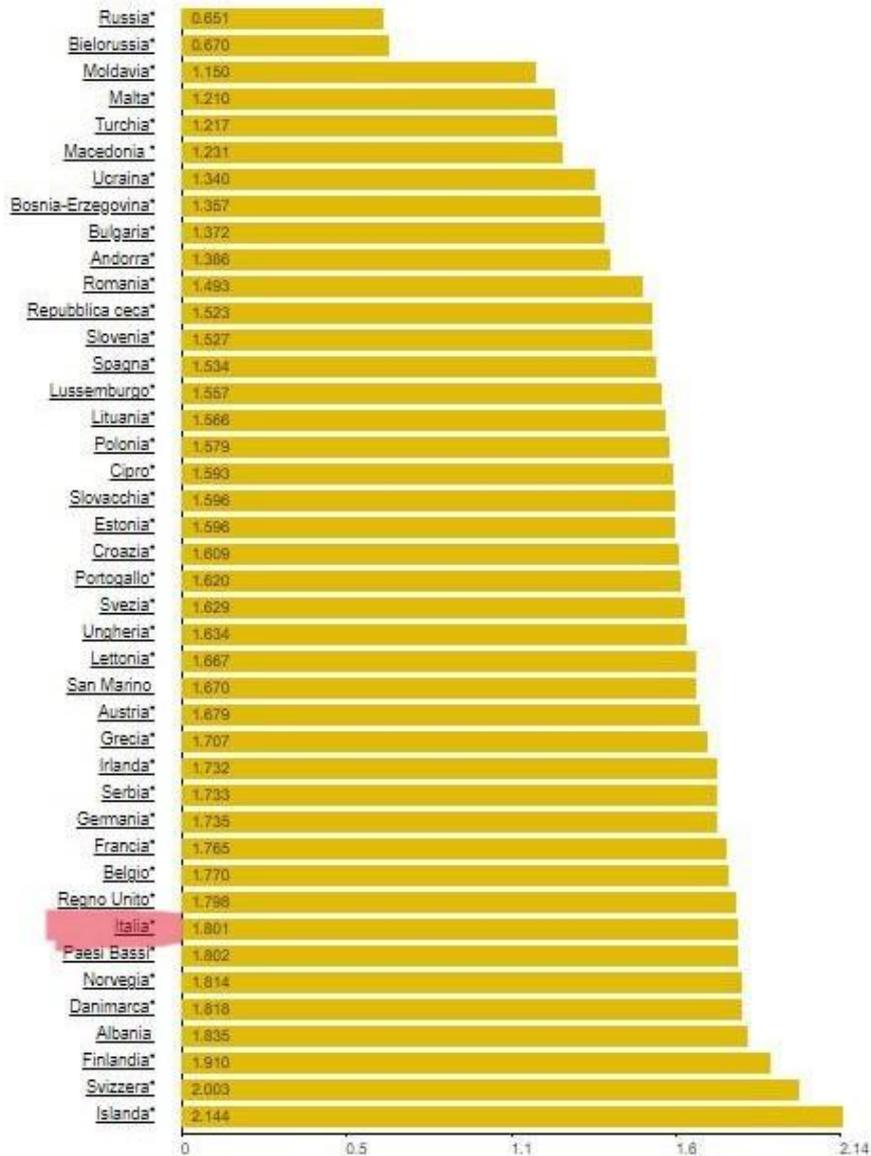


Figura 14: Prezzi del diesel in Europa oggi, 01/04/2024 (euro/litro) [94]

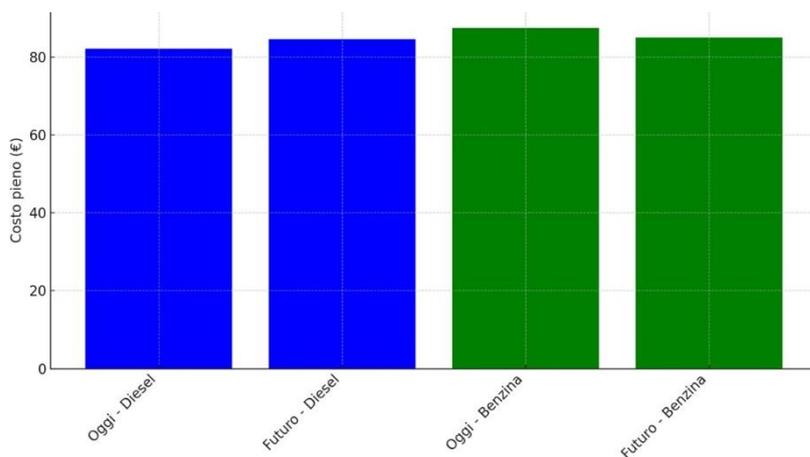


Figura 15: Costo di un pieno oggi, e tra 5 anni (Diesel e Benzina) [90-93]

Secondo l'Annual Energy Outlook della statunitense EIA (Energy Information Administration), entro il 2030 l'ancora crescente domanda mondiale di petrolio dovrebbe portare i prezzi a 89 dollari al barile. Entro il 2040, l'indice potrebbe toccare i 132 dollari. Per allora, infatti, le fonti di petrolio a basso costo saranno andate esaurite, rendendo più onerosa l'estrazione.

Entro il 2050, infine, si raggiungerà una soglia di 185 dollari al barile. Inoltre, per favorire la transizione alla mobilità elettrica, i governi di ciascun Paese (Italia inclusa) non esiteranno a gravare di tasse e accise il prezzo unitario di benzina e diesel: sebbene è impossibile formulare una stima esatta del costo finale dei carburanti, è tuttavia facile immaginare uno scenario in cui il gasolio e la benzina, così come anche il diesel, nel volgere di pochi anni, si assestino stabilmente ben al di sopra i 2 euro al litro.

Si procede ora con la stima del calcolo del carburante (€/litro) per l'orizzonte di tempo considerato, utilizzando i dati sopra forniti e rispettando la seguente modalità di calcolo [95-100]:

$$P_{\text{diesel}} = (P_{\text{petrolio}} \times \frac{1}{\text{resa della raffinazione}}) + \text{Tasse e Accise} + \text{Costi di distribuzione} + \text{Margine di profitto}$$

Supponiamo che:

- La resa della raffinazione sia 0,42 litri di diesel per ogni litro di petrolio.
- Tasse e accise siano 0,80 €/litro.
- I costi di distribuzione siano 0,15 €/litro.

- Il margine di profitto sia 0,10 €/litro.
- 159 litri è il volume medio di un barile di petrolio.
- Ipotizzando la realizzazione delle previsioni sopra indicate: il prezzo del petrolio arriverà a 81.5€/litro (89 dollari al barile) nel 2030 con una crescita lineare, e raggiungerà il prezzo di 121 €/litro (132 dollari al barile) nel 2040, sempre con una crescita lineare.
- Per il calcolo del costo annuale del carburante sono stati considerati i dati presenti nei paragrafi precedenti [2], ossia 8.2 è il consumo orario del veicolo ICET, 6.8 quello orario del mezzo HET, 1000 sono le ore lavorative annuali.

Anno	\$/ barile	€/litro	Costo annuale del carburante (€)
2024	68.1	2.06	16 892
2025	70.3	2.1	17 220
2026	72.7	2.14	17 548
2027	75	2.17	17 794
2028	77.3	2.2	18 040
2029	79.7	2.24	18 368
2030	81.5	2.27	18 614
2031	85.5	2.33	19 106
2032	89.4	2.4	19 680
2033	93.4	2.45	20 090
TOTALE			183 352

Tab. 25: Costi annuali di carburante per tutto il ciclo di vita del mezzo agricolo ICET

Anno	\$/ barile	€/litro	Costo annuale del carburante (€)
2024	68.1	2.06	14 008
2025	70.3	2.1	14 280
2026	72.7	2.14	14 552

2027	75	2.17	14 756
2028	77.3	2.2	14 960
2029	79.7	2.24	15 232
2030	81.5	2.27	15 436
2031	85.5	2.33	15 844
2032	89.4	2.4	16 320
2033	93.4	2.45	16 660
TOTALE			152 048

Tab. 26: Costi annuali di carburante per tutto il ciclo di vita del mezzo agricolo HET

ENERGIA. Anche i prezzi dell'energia nei prossimi anni saranno influenzati da un complesso mix di fattori, tra cui la transizione energetica verso le rinnovabili, le dinamiche geopolitiche e i progressi tecnologici.

Queste che si vedono nella figura 16 sono, in estrema sintesi, le “fotografie” del passato recente e del futuro prossimo dei prezzi energetici in Europa [101].

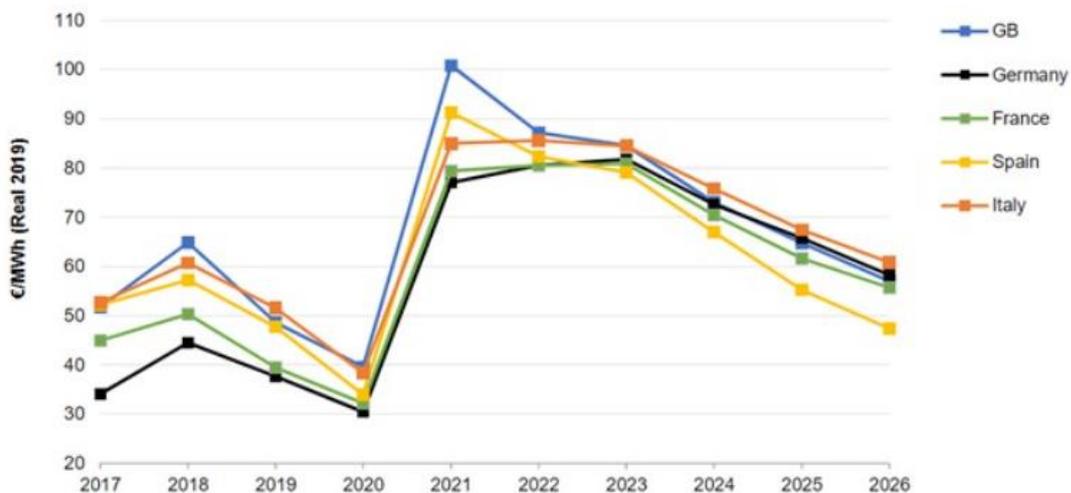


Figura 16: Il mercato dell'energia elettrica in Europa

I prezzi in Italia continueranno ad essere mediamente maggiori rispetto agli altri mercati continentali per tutto l'orizzonte di previsione, ma dal 2026 faranno registrare un lieve sconto rispetto alla Germania, dove le notevoli chiusure di centrali termiche sosterranno probabilmente i prezzi.

Da notare inoltre che parte dell'impatto dei rincari causati dal gas è mitigato da una revisione al rialzo della crescita delle rinnovabili in Italia, a seguito dei cambiamenti

apportati ai processi di autorizzazione, che nel passato avevano ostacolato maggiormente lo sviluppo delle energie verdi nel nostro paese [101].

Ciò nonostante, il gas rimane la spina dorsale delle forniture elettriche in Italia, in misura maggiore rispetto ad altri mercati, lasciando il nostro paese fortemente esposto ai movimenti dei prezzi del gas.

Perciò, per le stime future sul prezzo dell'energia elettrica, si fa riferimento a previsioni di fonti affidabili, come l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), la Commissione Europea, e vari modelli economici. Ecco una panoramica delle previsioni principali:

1. Proiezioni dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA)

- L'IEA pubblica regolarmente il World Energy Outlook, che fornisce scenari energetici globali fino al 2050. Nelle loro proiezioni, l'adozione di energie rinnovabili porterà a un calo dei costi a lungo termine, soprattutto per l'energia solare ed eolica, che sono sempre più competitive rispetto alle fonti fossili.
- Tuttavia, nel breve termine (fino al 2030), l'IEA prevede volatilità nei prezzi a causa dell'incertezza geopolitica, delle dinamiche del mercato del gas naturale e dell'espansione delle rinnovabili, che richiederà investimenti in infrastrutture di rete e accumulo

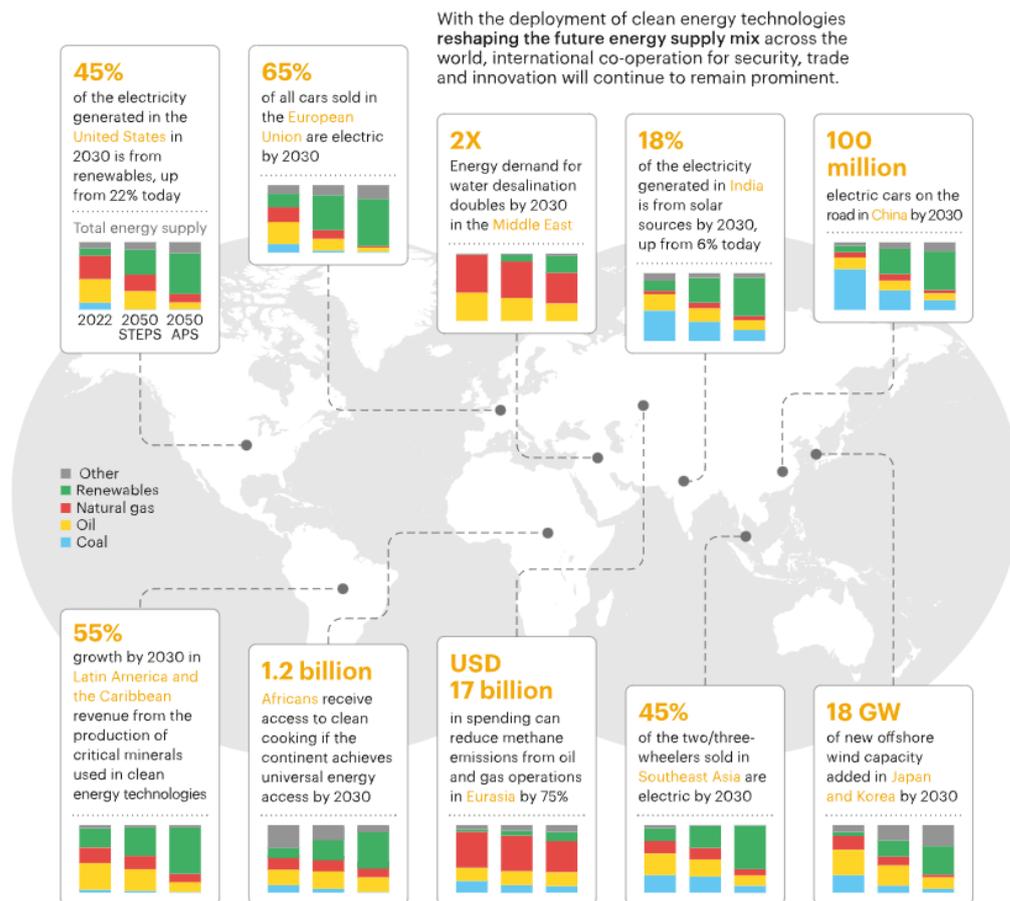


Figura 17: Risultati degli scenari energetici ipotizzati dall'IEA [102]

2. Previsioni europee

- Commissione Europea: Il report EU Energy Outlook prevede una riduzione graduale del prezzo dell'energia elettrica nei prossimi decenni, trainata dall'aumento della quota di rinnovabili nel mix energetico europeo e da una diminuzione dei costi tecnologici. Tuttavia, si nota una differenziazione tra i vari Paesi membri, con i mercati che dipendono maggiormente dal gas naturale (come l'Italia) esposti a oscillazioni di prezzo nel breve termine.
- Emission Trading System (ETS): L'aumento dei prezzi delle quote di carbonio inciderà sui prezzi dell'energia a breve termine, specialmente per gli impianti a carbone e gas.

3. Scenari nazionali e modelli di previsione

- Italia: Secondo i dati storici del Prezzo Unico Nazionale (PUN) e le previsioni degli esperti, il prezzo dell'energia elettrica potrebbe oscillare tra **80 e 150 €/MWh** nei prossimi 10 anni, in funzione di fattori come la crescita delle rinnovabili, i costi del

gas naturale e le politiche energetiche nazionali. Ad esempio, gli investimenti in energia solare ed eolica potrebbero portare a una graduale diminuzione dei prezzi dopo il 2025

4. Effetti a breve termine della transizione energetica

- L'aumento delle rinnovabili e gli investimenti nelle infrastrutture di rete (come i sistemi di accumulo e le smart grid) sono considerati elementi chiave per stabilizzare i prezzi a lungo termine.
- Tuttavia, nel breve termine (fino al 2030), ci si aspetta una certa volatilità legata ai costi del gas naturale e agli investimenti necessari per l'integrazione delle rinnovabili nei mercati energetici tradizionali

In sintesi, le stime disponibili suggeriscono che i prezzi dell'energia elettrica saranno influenzati da diversi fattori nei prossimi anni, con una tendenza generale verso una diminuzione a lungo termine grazie alle energie rinnovabili, ma con volatilità e potenziali picchi nel breve termine, soprattutto in mercati che dipendono fortemente dal gas naturale.

Utilizzando i dati del PUN, sopra forniti, e considerando quello riportato dalle varie fonti, in questa analisi si ipotizza un aumento del prezzo fino al 2026 circa, arrivando a 150 €/MWh, seguito da un periodo di decrescita lineare fino al valore di 80 €/MWh.

Il consumo di energia annuale è stato ricavato considerando i dati forniti [2]

- 6 kWh è il consumo giornaliero del mezzo agricolo;
- 1000 sono le ore lavorative annuali (assumendo 8 ore al giorno, sono 125 giornate lavorative all'anno);

Anno	€/MWh	Costo annuale dell'energia (€)
2024	123	92.24
2025	137	102.75
2026	150	112.5
2027	140	105
2028	130	97.5
2029	120	90
2030	110	82.5
2031	100	75

2032	90	67.5
2033	80	60
TOTALE		885

Tab. 27: Costi annuali dell'energia per tutto il ciclo di vita del mezzo agricolo HET

L'evoluzione del mercato è quindi difficile da prevedere con precisione, ma la transizione verso energie alternative e le dinamiche geopolitiche avranno sicuramente un ruolo cruciale nel determinare i prezzi futuri.

Riprendendo il grafico 1, ora si può avere una panoramica totale di tutti i costi del ciclo di vita di entrambi gli scenari, secondo tutte le ipotesi fatte:

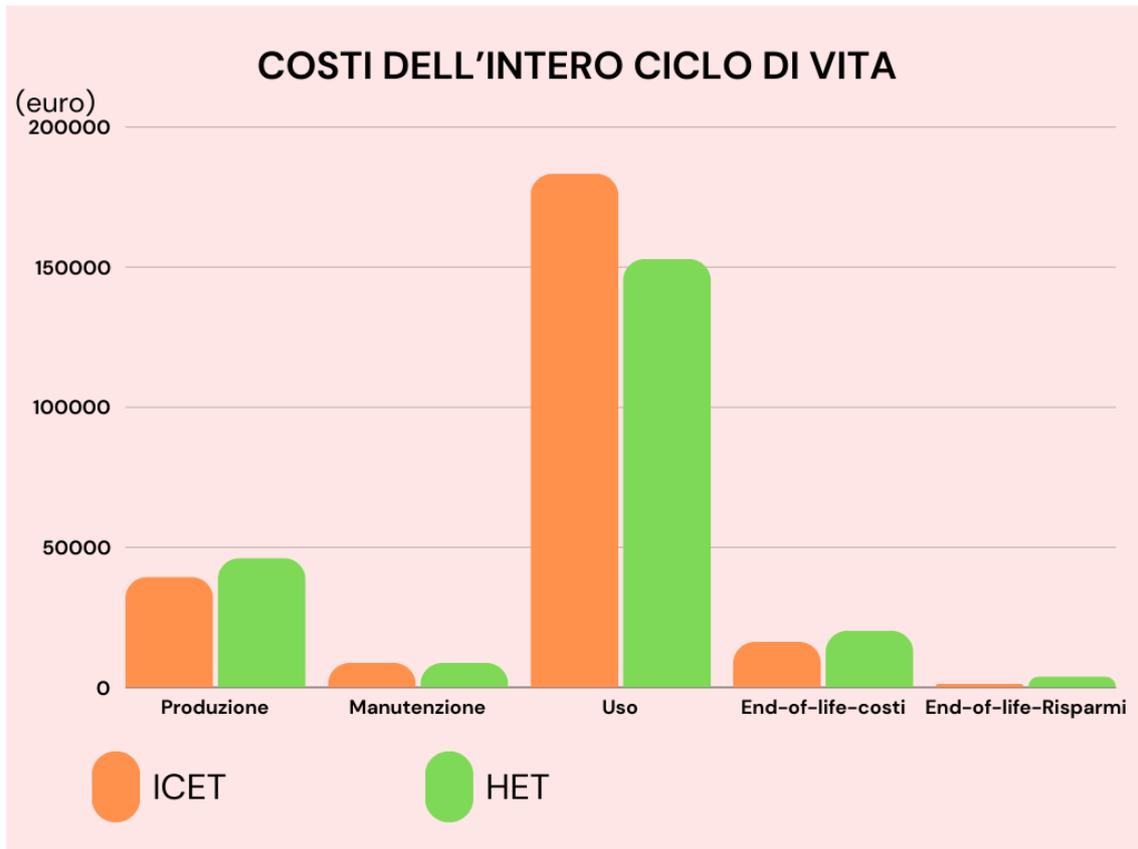


Grafico 3: Comparazione dei costi dell'intero ciclo vita tra i due scenari

Voci (euro)	ICET	HET	Differenza % (HET rispetto a ICET)
Produzione	39 474	46 174	+17%
Manutenzione	8 750	8 750	+0%
Uso	183 352	152 933	-16.5%
End of life-Costi	16 255	20 465	+26%
End of life-Risparmi	1 370	3 925	+285%
TOTALE	249 200	232 245	-7%

Tab 28: Riepilogo costi dell'intero ciclo di vita del trattore ICET e HET

QUINTO CAPITOLO

CONCLUSIONI

Lo scopo dello studio presentato è quello di effettuare un confronto dell'impatto economico tra un tradizionale motore a combustione interna (ICET) e un trattore da frutteto di medie dimensioni ibrido elettrico (HET), analisi utile per ottimizzare le decisioni di investimento, ridurre i costi operativi e aumentare l'efficienza complessiva delle macchine agricole.

Un aspetto rilevante è che i trattori con tecnologie ibride o alimentati da fonti alternative (come il biodiesel) possono presentare risparmi sul lungo periodo, anche se il loro costo iniziale è più elevato. Trovando interessante questo argomento, è stata effettuata l'analisi LCC di entrambi i trattori per capire, anche dal punto di vista economico, eventuali vantaggi e svantaggi che l'inserimento di una parte elettrica può comportare.

Il confronto è stato condotto utilizzando la metodologia di valutazione del ciclo di vita e considerando l'intero ciclo di vita dei due prodotti. Quest'ultimo comprende tre fasi principali: produzione, fase di utilizzo e fine vita.

Per quanto riguarda la produzione tiene conto di tutti i processi coinvolti dall'estrazione delle materie prime all'assemblaggio finale del veicolo. Sono stati presi tutti i materiali necessari alla realizzazione del mezzo, registrate le quantità, e ricercato il prezzo di mercato. Altro fattore importante è stata la manodopera, costo rilevante della prima fase, stimata sia per la realizzazione dei singoli componenti, sia per l'assemblaggio finale.

La fase di utilizzo considera i costi relativi alla vita operativa del trattore, quindi quello che riguarda il consumo di carburante/energia e la manutenzione. Sono stati stimati i costi di manutenzione ordinaria, per tutto il tempo di servizio del trattore, e il costo del carburante/dell'energia. Questo è l'unico costo espresso inizialmente in termini annuali invece che totali (per tutti i 10 anni di servizio), e successivamente calcolato per tutti i 10 anni di servizio del trattore.

Infine, la fase di fine vita mira a ridurre l'impatto complessivo del ciclo di vita attraverso il riciclaggio dei materiali e i processi di estrazione di energia. Sono stati evidenziati i dati di costo relativi allo smaltimento e riciclo, e si è notato che a volte, come nel caso in analisi, i

risparmi dovuti al riciclo non sono sufficienti a ricoprire i costi, anche se risulta vantaggioso dal punto di vista ambientale.

L'analisi è stata condotta definendo obiettivi e ambiti, confini del sistema e unità funzionale. Quindi sono stati sviluppati inventari del ciclo di vita per la fase di produzione e fine vita per i due sistemi di prodotto, prestando attenzione ai componenti principali. Per quanto riguarda la fase di utilizzo sono stati sfruttati modelli di previsioni per determinare il valore futuro sui mercati del carburante e dell'energia. Dall'analisi si può affermare che il trattore HET ha mostrato riduzioni di costi rilevanti nella fase di utilizzo, nella quale la spesa totale nell'arco dei 10 anni, nonostante le possibili volatilità dei prezzi, si prospetta di molto inferiore rispetto a quella del trattore ICET (16.5% in meno). Tutto ciò però richiede una spesa iniziale del 17% superiore rispetto a quella necessaria per la produzione del trattore ICET.

Infine, i risultati della fase di riciclo hanno evidenziato l'importanza del recupero di energia e dei materiali, soprattutto di alcuni componenti come la batteria, il cui processo di riutilizzo è particolarmente importante (la voce dei risparmi del trattore HET è aumentata, secondo l'analisi fatta, di circa 285%, anche se è importante ricordare che sono dati ricavati da molte ipotesi visto che la pratica del second life non è ancora molto diffusa). Tuttavia, ci sono delle aree che dovrebbero essere migliorate per ridurre l'impatto complessivo del HET, sia per quanto riguarda la progettazione del sistema a celle a combustibile, che prevede l'introduzione di nuovi materiali o lo sviluppo di sistemi più efficienti, sia per quanto riguarda l'affidabilità e la durata di tutti i componenti elettronici e della batteria stessa, i quali ad oggi richiedono molta manutenzione e frequenti ricambi; tutti fattori che causano inevitabilmente l'incremento dei costi.

In conclusione, l'analisi dimostra che i trattori ibrido-elettrici possono rappresentare una strategia efficace per sostituire i sistemi tradizionali nel settore delle macchine mobili non stradali non solo dal punto di vista dell'inquinamento ambientale, per la salute umana e l'esaurimento delle risorse, ma anche dal lato dei costi, e quindi dal punto di vista economico, portando un importante risparmio nella fase di utilizzo.

D'altronde, il trend verso il quale si sta dirigendo la società odierna mondiale sembra univoco: il prezzo di acquisto di una vettura con motore a combustione interna è destinato ad avvicinarsi sempre di più a quello di una full electric (che al contrario, a poco a poco scenderà).

Al di là dei piani UE di abolizione progressiva dei motori termici, in realtà, lo sostengono studi autorevoli, benzina (e diesel) ci accompagneranno ancora per decenni. Ma, rispetto ad altre forme di alimentazione, il rapporto costi/benefici sarà assai più sfavorevole di oggi [103]. Abbandonare le abitudini in favore del *green deal* non sarà forse più una scelta: sarà una necessità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] <https://www.innochemservice.com/it/lca-per-migliorare-prodotti-e-processi/>
- [2] Carbon Footprint of an Orchard Tractor through a Life-Cycle Assessment Approach- S.Martelli, F. Mocera, A. Somà
- [3] Comparison of Orchard Tractors Powered by Diesel and Hydrogen Fuel Cell Salvatore Martelli * , Valerio Martini , Francesco Mocera * and Aurelio Soma'
- [4] Baumann, H., & Tillman, A.-M. The Hitchhiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application.
- [5] Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., & others. Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management.
- [6] <https://www.loccioni.com/it/waves/second-life/>
- [7] <https://corporate.enelx.com/it/question-and-answers/what-is-second-life-battery#:~:text=Le%20batterie%20di%20seconda%20vita,offre%20benefici%20economici%20e%20ambientali.>
- [8] STUDIO DEL POTENZIALE DI AUTOMAZIONE DEL DISASSEMBLAGGIO MECCANICO DI BATTERIE AGLI IONI DI LITIO PER L'AUTOMOTIVE- Tesi Universitaria di Simone Gallina
- [8.1] Agricultural Engineering International e Farm Machine and Power
- [8.2] HybridCars.com e EVDatabase.org
- [9] Valutazione sostenibilità progetto. Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali, Franco Angeli, Milano
- [10] E. Fregonara, Valutazione sostenibilità progetto, Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali, Franco Angeli 2015
- [11] E. Fregonara, Valutazione sostenibilità progetto, Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali, Franco Angeli 2015, p.119 sulla base di D. Langdon Management Consulting. "Life Cycle Costing (LCC) as a contribution to sustainable construction. A common methodology". May 2007
- [12] <https://transform-mpi.com/pelatihan-tentang-life-cycle-costing-lcc/>
- [13] <https://www.innochemservice.com/it/lca-per-migliorare-prodotti-e-processi/>
- [14] <https://www.motus-e.org/news-associative/infografica-dello-studio-lca-e-lcc-del-repurposing-di-batterie-di-veicoli-elettrici-nel-2nd-life/>
- [15] standard di emissione per le autovetture e i veicoli commerciali leggeri presenti nel regolamento UE 2019/631
- [16] Direttiva 2003/87/CE (Sistema Europeo di Scambio delle Quote di Emissioni - ETS)
- [17] Gerssen-Gondelach, S.J., & Faaij, A.P.C. Performance of batteries for electric vehicles on short and long term. Journal of Power Sources
- [18] Riba, J.R., López-Torres, C., Romeral, L., & García, A. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [19] Fries, M., Schmitt, F., Schmid, A., & Sauer, D.U. Retrofitting of combustion engine vehicles to battery electric vehicles by a low-cost method – A case study based on a light utility vehicle. Energy Procedia
- [20] Paffumi, E., De Gennaro, M., Martini, G., & Scholz, H. Assessment of the impact of electrified road transport in Europe: the role of the electric supply industry, the grid, and renewable energy sources. Energy
- [21] Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H.J., Del Duce, A., & Simons, A. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework. Applied Energy
- [22] Hunkeler, D., Lichtenvort, K., & Rebitzer, G. Environmental Life Cycle Costing. CRC Press
- [23] International Electrotechnical Commission, 2004
- [24] International Standards Organization, 2000-2001
- [25] Clarke, L.J. Machinery management: How to assess life cycle costs for machinery. Journal of Agricultural Engineering Research
- [26] Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. Optimization of energy consumption and input costs for apple production in Iran using data envelopment analysis. Energy, 36(2), 909-916.
- [27] Hoy, R.M. Cost evaluation of precision agriculture technologies for farm machinery. Computers and Electronics in Agriculture

- [28] SWARR T. E., HUKELER D., W. KLOPFER, CIROTH H.P.A., BRENT A.C., and PAGAN R., Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice, Cetac, 2011
- [29] OPENAIRE, piattaforma di pubblicazione di articoli scientifici finanziati dall'Unione Europea
- [30] Tesi di Giulia Porcaro, Politecnico di Torino, Valutazione della sostenibilità economica dei progetti in ottica Life Cycle Thinking
- [31] Schaltegger, S., & Burritt, R. (2000). Contemporary Environmental Accounting: Issues, Concepts, and Practice
- [32] United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific UNESCAP
- [33] Ribeiro, A. e Silva, R. (2022). Application of Life Cycle Costing for Sustainable Management of Agricultural Machinery
- [34] Yamamoto, T., & Kitagawa, T. (2021). A Life Cycle Cost Analysis of Agricultural Tractors: A Tool for Sustainable Decision-Making
- [35] Zhao, Y., et al. (2020). Evaluating the Life Cycle Costs of Agricultural Machinery: A Case Study of Tractors
- [36] Gómez, A., & Ceballos, M. (2019). Application of Life Cycle Costing in the Design of Agricultural Equipment.
- [37] Bloomberg Commodities
- [38] Reuters Commodities
- [39] MarketWatch Commodities
- [40] Inveting.com
- [41] Trading Economics
- [42] U.S. Energy Information Administration
- [43] CNBC Commodities, Financial Times Commodities
- [44] Agricultural Marketing Service
- [45] BLS Occupational Employment Statistics
- [46] Eurostat Statistics
- [47] "The Lean Six Sigma Pocket Toolbook": Michael L. George
- [48] "The Toyota Way"-Interviste e Report Aziendali
- [49] American Society of Mechanical Engineers
- [50] FederUnacoma (Federazione Nazionale Costruttori Macchine per l'Agricoltura) offrono statistiche e report annuali sui tempi e sui costi medi per la produzione di macchine agricole
- [51] banche dati specializzate, come Eurostat o Statista
- [52] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti
- [53] https://www.pneumatici.it/gomme/gomme_speciali/gomme_agricole- siti ufficiali di Shell, Mobil, Total, Castrol e Fuchs
- [54] MISE- ministero dello sviluppo economico
- [55] <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/ciclo-dei-rifiuti-economia-circolare/>
- [56] Jactio.com
- [57] Siderweb
- [58] isprambiente.gov.it
- [59] ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
- [60] Rete Nazionale per la Gestione dei Rifiuti
- [61] CNA - Confederazione Nazionale dell'Artigianato e della Piccola e Media Impresa
- [62] Mordor Intelligence, Grand View Research e MarketsandMarkets
- [63] Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) e l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA)
- [64] Tesla, CATL, LG Chem, Panasonic e Samsung SDI
- [65] Danfoss, Delta Electronics, Siemens, Parker Hannifin, e Bosch

- [66] International Electrotechnical Commission (IEC)
- [67] Caterpillar, Cummins, Perkins, Yanmar e John Deere
- [68] Machinery Trader, Diesel Engine Trader
- [69] Selectra.net
- [70] Luce-gas.it
- [71] Mordor Intelligence, Grand View Research e MarketsandMarkets
- [72] Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) e l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA)
- [73] Tesla, CATL, LG Chem, Panasonic e Samsung SDI
- [74] Danfoss, Delta Electronics, Siemens, Parker Hannifin, e Bosch
- [75] International Electrotechnical Commission (IEC)
- [76] Caterpillar, Cummins, Perkins, Yanmar e John Deere
- [77] Machinery Trader, Diesel Engine Trader
- [78] Piano Transizione 4.0
- [79] Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza.
- [80] Incentivi europei, PAC e PNRR
- [81] Piano Transizione 4.0
- [82] Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza.
- [83] Incentivi europei, PAC e PNRR
- [84] www.re-bat.it e altri siti specializzati del mercato in questione
- [85] Journal of Cleaner Production e Waste Management
- [86] International Lead Association (ILA) e Battery Council International (BCI)
- [87] Associazione Europea dei Produttori di Batterie (Eurobat)
- [88] Rapporti dell'International Renewable Energy Agency (IRENA), European Battery Alliance (EBA)
- [89] Journal of Energy Storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [90] Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA): fornisce analisi delle tendenze energetiche globali, incluso il mercato dei combustibili fossili, e previsioni basate su diversi scenari di domanda e offerta.
- [91] OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries)
- [92] Commissione Europea e Governi Nazionali: impongono normative sempre più stringenti sulle emissioni di carbonio e sui carburanti fossili. Questo influenza la produzione e il consumo di diesel a livello locale e globale.
- [93] U.S. Energy Information Administration (EIA)
- [94] <https://www.sicurauto.it/news/attualita-e-curiosita/prezzo-benzina-e-diesel-in-europa-dove-conviene-di-piu/>
- [95] International Energy Agency (IEA)
- [96] Organizzazione dei Paesi Esportatori di Petrolio (OPEC)
- [97] borse di riferimento come il NYMEX o il Brent Crude
- [98] Energy Information Administration (EIA)
- [99] sito dell'Agenzia delle Dogane e dei Monopoli
- [100] International Road Transport Union (IRU)
- [101] S&P Global Ratings
- [102] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/regional-insights#abstract>
- [103] <https://www.greenplanner.it/2023/04/19/emissioni-gas-serra-aumento-2021/>

RINGRAZIAMENTI

Volevo informare il lettore che questa parte sarà più lunga del solito, perché ho la fortuna di avere e di aver avuto vicino tantissime persone speciali, che mi hanno sostenuto e accompagnato in questi ultimi anni, e ci tengo a ringraziarle tutte quante!

Sono tante le conoscenze che ho fatto in questo percorso, le amicizie che ho coltivato, i rapporti che ho stretto. Vorrei dedicare queste ultime pagine per ringraziare tutte le persone che in me hanno sempre creduto e che mi hanno sempre sostenuto, sia nei momenti di difficoltà sia in quelli felici e spensierati. Vorrei che questi ringraziamenti siano un punto di arrivo da una parte, ma anche un punto di inizio, perché credo che non si finisca mai di crescere e spero di poter raggiungere nuovi traguardi importanti nella mia vita con tutte loro ancora al mio fianco, ovunque sia io e ovunque siano loro.

Vorrei ringraziare in primo luogo i miei migliori amici Matteo, Gabri e Lety, perché insieme ci siamo tenuti per mano ogni singolo giorno, affrontando e vivendo tutte le emozioni che questa esperienza ha portato, non lasciando mai nessuno indietro, e camminando sempre insieme, dal momento in cui inconsciamente siamo saliti su quel treno per provare il test fino ad oggi, dove siamo amici della vita.

Grazie Gabri, perché in questi anni mi hai permesso di conoscere il tuo cuore, mostrandomi tutta la tua dolcezza e perseveranza, insegnandomi il vero significato della forza della vita. Sei riuscito sempre a lasciare stupore e affetto negli occhi di chi ti ha incontrato. Ti ammiro, ti stimo, ti voglio bene.

Grazie Lety, perché hai deciso di crescere insieme a me in questi anni, continuando ad approfondire ancora di più quel rapporto di amicizia che è iniziato tanti anni fa, e che il caso ha voluto concludessimo proprio oggi insieme. Ci siamo date forza, ci siamo confrontate e sempre abbiamo ricordato l'una all'altra quanto valiamo e quanto abbiamo fatto fino ad oggi, condividendo tutto il tempo più prezioso, e creando ricordi ed emozioni che terremo sempre nel nostro cuore, a qualsiasi distanza saremo.

Grazie Matteo, per la tua tenacia, per la tua immensa conoscenza e per tutti i sorrisi che abbiamo condiviso insieme, per la sicurezza che mi hai sempre trasmesso nell'andare avanti senza mai mollare, facendomi sempre sentire una persona speciale e regalandomi ogni volta un abbraccio grande e caloroso.

Un grande ringraziamento va a miei compagni di corso, Fede, Chiara e i due Gabri e Leda, con i quali ho condiviso la maggior parte delle ore di lezione, rendendole piacevoliA Fede, l'amicizia più importante che il Poli mi ha regalato, conosciute al primo laboratorio di chimica del primo anno, siamo riuscite a costruire la nostra amicizia durante i 2 anni di pandemia, nonostante i 500 km di distanza. Non dimenticherò mai che non è passato un singolo giorno in cui non ci siamo sentite. Ci siamo sostenute e ti ho sempre sentita così vicina, sei stata fondamentale per non mollare in un momento così difficile, anzi, di trarre energia e approfittare di quel momento per mettere lo sprint e non mollare.

Grazie Gabri, a tutte le ore passate insieme a ripetere e farci compagnia per i mille esami alla fine superati insieme. Ci siamo sentiti squadra, e dandoci motivazione l'uno all'altra.

Grazie a Chiara, con cui ho passato gli ultimi mesi da “studentessa”, tagliando insieme il traguardo dell’ultimo e faticoso esame.

Un ringraziamento doppio va ad Ale e Salvo, che mi hanno sempre fatto sentire parte della loro immensa famiglia Siciliana, con la loro grande ospitalità, la loro perenne presenza, e la loro stravolgente simpatia. Grazie ragazzi perché siete l’esempio di come l’amore e la tenacia possano realizzare tutti i sogni della vita, di quanto possa essere forte e bello il dono dell’amicizia che dà e riceve. Non dimenticherò mai le numerose cene a casa vostra, tra cene con delitto ed escape room, giochi da tavolo e mangiate siciliane super! Grazie Ale, per aver condiviso con me ogni singolo passo della tua vita, concedendomi un posto speciale all’interno della tua famiglia e donandomi un amore sincero e puro. Rimarremo sempre unite, te lo prometto, ovunque sarò.

Un grazie speciale al dono più grande che potessi trovare a Torino: il meraviglioso CUSB. Ci tengo a ringraziare tutti i ragazzi e le ragazze che ne hanno fatto parte e che si sono aggiunti negli anni. Siete ciò che più mi fa dolore lasciare, perché sin dal primo giorno quello che ci ha uniti tutti non è stata la passione per la musica, o la fede, ma la gioia nello stare insieme, nel condividere momenti speciali al di fuori delle prove, organizzando concerti, cene, pick nick, e momenti in aula studio. Mi avete fatto conoscere la bellezza dell’amicizia di un grande gruppo come il nostro, la felicità di trascorrere momenti insieme, senza invidia, cattiveria e pregiudizi, accogliendo sempre tutti e gioire ad ogni traguardo, perché quello di ognuno è stato sempre vissuto come traguardo di tutti. Grazie ai frati che ci hanno permesso di legarci così tanto. Grazie a tutti ragazzi, perché per me siete stati davvero speciali, mi sono sempre sentita apprezzata per quella che sono, facendo uscire la me più solare e allegra che ci sia mai stata. Non voglio perdervi mai, e sappiate che vi romperò le scatole per organizzare gite e super, per continuare a creare altri ricordi insieme. Vi voglio bene.

Un ringraziamento anche a tutti gli amici di qui, in particolare al mitico Zio Frank, Sara, Richi, Serena e Franci, con i quali è nata una complicità che ci ha permesso di conoscerci in modo più profondo, accompagnando le giornate e le serate con chiacchiere, condivisioni, pensieri. A tutti gli amici di qui, ma anche a tutte le amiche di giù, Alice, Chiara, Stephanie e alla mia carissima prof di matematica Chiara, che mi hanno sempre accolta a braccia aperte ad ogni mio ritorno, aggiornandoci su quello che era accaduto e ricordando il passato vissuto insieme. Grazie perché la nostra amicizia è stata così forte da rimanere viva anche stando lontane.

Un grazie enorme anche ai mitici Renzo e Daniela, che con la loro energia e vitalità sono sempre stati super disponibili nei miei confronti, e mi hanno permesso di esplorare il Piemonte ma soprattutto le Marche!

Alla mia seconda famiglia, il Judo Yawara, che è stato così difficile lasciare e che mi riempie di gioia il poter riabbracciare. Quella palestra, quei ragazzi, sono ciò che più mi fa sentire me stessa e dove mai mi sono sentita sbagliata, dove, anche negli anni più difficili, ho trovato conforto, grinta, affetto. Grazie Ragazzi, che in questi anni abbiamo creato un rapporto formato non solo da amicizia, ma anche di stima, confidenza e grande affetto. Mi accompagnate in ogni mio grande traguardo, mi avete fatto sentire sempre accolta,

apprezzata....insomma, come direbbe qualcuno, mi fate sentire sempre una principessa. Grazie Maestro, per essere stato il secondo padre di molti tuoi allievi e anche il mio. Grazie per avermi insegnato questa disciplina che mi ha formata, delineando la personalità tenace e ambiziosa che oggi fa parte di me. Grazie per avermi insegnato a non mollare, a rialzarsi anche quando fa male, a capire che non è importante essere migliori di qualcun altro, ma essere migliori di ieri. Un ringraziamento dal cuore va a te Agni, per così tanti motivi che mi è impossibile ricordarli ed elencarli tutti. La nostra non è mai stata un'amicizia, è sempre stato qualcosa di più, sei la mia sorellina, ce lo siamo sempre dette. Abbiamo sempre avuto un pensiero l'una per l'altra, in qualsiasi fase della vita ci siamo trovate, e a qualsiasi distanza fosse presente tra noi, e questo ci ha permesso di stare insieme da oltre vent'anni. Grazie, grazie perché ci sei sempre stata, sempre, e ogni volta mi doni parole e abbracci che mi trasmettono tutto il bene che mi vuoi, e mi fanno commuovere perché un sentimento di amicizia così forte è qualcosa di prezioso che non vorrò mai perdere. Credo fortemente che quelli che ci si apriranno davanti saranno anni altrettanto belli e ricchi di esperienze, nei quali potremo fare errori o raggiungere nuovi traguardi, ma che condivideremo l'una con l'altra.

Un ringraziamento va anche ai miei nonni, perché li porto sempre nel mio cuore per tutti i momenti passati insieme, e per tutti i racconti che mi hanno regalato. È duro vedervi sofferenti, ma so che siete fieri di me e ci tengo a dedicarvi il risultato che ho raggiunto oggi, perché la pazienza di accudire quella bimba tanto bionda quanto vivace l'avete avuta voi.

Un abbraccio forte a mio fratello Matteo, un pezzo della mia vita importante e fondamentale. È sempre stato silenziosamente al mio fianco, forse soffrendo anche la mia lontananza improvvisa, così come io ho sentito la sua. Ti ho lasciato ragazzino e ti ritrovo ora un grande Uomo. Mi sei mancato così tanto Matty.

A Luca, che mi ha fatto capire di non poter fare tutto da sola: sa che posso ma non mi ha lasciata mai sola. Mi sei entrato nel cuore e hai deciso di abitarci, donandomi sempre il tuo sorriso sincero e facendomi sentire nell'aria il bene più profondo. Mi hai insegnato ad amare e a sentirmi amata, ogni singolo giorno e a qualsiasi distanza, proteggendo e avendo cura di questo sentimento che cresce ogni giorno tra noi. Ci siamo fidati l'uno dell'altra, ci siamo incoraggiati e abbiamo compreso che in due la fatica diventa circostanza. Non smettiamo mai di sognare. Continuiamo a crescere insieme. Sei importante. Ti voglio bene, ti amo.

Le prime persone a cui devo dire grazie per questo traguardo sono i miei genitori, fonte di sostegno e di coraggio, che mi sono sempre stati accanto e non mi hanno fatto mai mancare il loro aiuto durante tutti questi anni. Senza di loro non sarei mai diventata quella che sono e non avrei potuto coronare i miei molteplici sogni. Un grazie speciale lo voglio fare a te, mamma, perché mi sei sempre stata accanto, aiutandomi e confortandomi nei momenti difficili, cercando sempre di darmi consigli nelle mie scelte, ricordandomi quanto valgo e che posso arrivare dove voglio perché ho i poteri e la perseveranza per poterlo fare. Grazie papà, perché mi hai sempre coccolato e continui a farlo, perché ogni volta che torno da te per te è festa, perché mi insegni ogni giorno che il modo migliore per vivere è quello di preservare la gioia del bambino che è in noi. Grazie ad entrambi perché siete l'ancora della mia vita, perché ogni giorno mi avete la forza di volontà di arrivare fin qui, perché il desiderio di rendervi orgogliosi ha sempre prevalso su qualsiasi difficoltà.

