

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dip. AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E AMBIENTE**

**Dip. TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI**

**Corso di Laurea in SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE**

**ANALISI TECNICA SULL'ELETTRIFICAZIONE DELLE  
MACCHINE AGRICOLE SEMOVENTI**

**RELATORE:**

Dott. Francesco Marinello

**LAUREANDO:**

Marco Torresan

Matricola n. 2007444

**ANNO ACCADEMICO 2022/2023**



# RIASSUNTO

L'elettrificazione dei veicoli, incluse le macchine agricole, è in atto nel tentativo di raggiungere la neutralità carbonica per mitigare il cambiamento climatico. Usare le risorse naturali in modo efficiente sarà sempre più importante in futuro e l'elettrificazione potrebbe essere un modo per aumentare l'efficienza d'uso dell'energia dei veicoli.

In questo lavoro il possibile impatto e i benefici dell'elettrificazione delle macchine agricole sono stati analizzati, così come alcuni svantaggi. Sono stati considerate differenti tipologie di elettrificazione e sono state comparate con le prestazioni di trattori convenzionali. È stata creata una descrizione di tutti i modelli di macchine agricole elettrificate presentate fino ad oggi e alcune di esse sono state valutate in termini di efficienza energetica nel loro contesto di applicazione.

I risultati di questo lavoro sono che l'elettrificazione delle macchine agricole è possibile e porta alcuni benefici. Dev'essere sviluppata, così come i combustibili alternativi, ma non dovrebbe essere una delle priorità nel settore agricolo.

# ABSTRACT

Electrification of vehicles, including agricultural machinery, is undergoing in an attempt to become carbon neutral to mitigate climate change. Using natural resources in an efficient way will be increasingly important and electrification might be the best way to increase energy use efficiency in vehicles.

In this work the possible impact and the benefits of agricultural machinery electrification have been analyzed, as long as some disadvantages. Different types of electrification have been considered and compared to conventional tractors performances. A description of all the electrified agricultural machinery ever presented has been created and some of them have been evaluated in terms of energy efficiency in their context of application.

The outcome of this work is that agricultural machinery electrification is possible and has some benefits. It needs to be developed, as well as alternative fuels, but it shouldn't be a priority in the agricultural sector.

# SOMMARIO

RIASSUNTO .....	1
ABSTRACT .....	2
SOMMARIO.....	3
Capitolo 1.....	4
INTRODUZIONE.....	4
1.1 Introduzione .....	4
1.2 Il presente lavoro.....	5
Capitolo 2.....	6
L'ELETTRIFICAZIONE .....	6
2.1 L'elettrificazione dei veicoli .....	6
2.2 Le diverse tipologie di veicoli elettrificati .....	7
2.3 L'elettrificazione delle automobili e del trasporto pesante.....	8
2.4 L'elettrificazione delle macchine agricole.....	9
2.5 Confronto tra macchine agricole convenzionali ed elettrificate .....	10
Capitolo 3.....	13
APPLICAZIONE DI MACCHINE AGRICOLE SEMOVENTI ELETTRIFICATE .....	13
3.1 Modelli sviluppati .....	13
3.1.1 Trattori da campo aperto .....	13
3.1.2 Trattori specializzati.....	15
3.1.3 Trattori compatti .....	17
3.1.4 Carri miscelatori.....	18
3.2 Applicazione in vari contesti.....	21
3.2.1 Aziende cerealicole estensive.....	21
3.2.2 Aziende viticole/frutticole .....	23
3.2.3 Aziende agricole zootecniche .....	24
3.2.4 Applicazione di trattori compatti elettrificati .....	25
Capitolo 4.....	27
CONCLUSIONI .....	27
Appendice.....	29
BIBLIOGRAFIA .....	38
Articoli scientifici e siti web consultati .....	38
RINGRAZIAMENTI .....	46

# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

### 1.1 Introduzione

A livello globale le emissioni di gas ad effetto serra (GHG) derivanti dall'agricoltura sono dovute principalmente alle fermentazioni enteriche dei ruminanti, alla gestione del suolo, alla gestione degli effluenti zootecnici e alla coltivazione del riso. Le emissioni legate all'uso di energia da combustibili fossili per alimentare le macchine agricole sono meno del 2% delle emissioni globali di GHG (Ritchie et al., 2020).

Nonostante l'impatto dei combustibili fossili utilizzati in agricoltura sia basso se confrontato con il settore dei trasporti e del riscaldamento, i combustibili fossili costituiscono un input fondamentale per la produzione agricola perché sono necessari per la produzione dei fertilizzanti e per lo svolgimento delle operazioni colturali per mezzo di macchine agricole. In un contesto di tentativo di mitigazione del cambiamento climatico, la sostenibilità di un processo produttivo dovrebbe essere misurata sottoforma di rapporto output/input di carbonio come proposto da (Lal, 2004). L'agricoltura svolge un'importante azione di sequestro di carbonio (o carbon sink) che può essere ulteriormente aumentata e una delle strade percorribili per massimizzare il rapporto output/input di carbonio del settore agricolo, è quella di sfruttare la tecnologia attuale per diminuire l'uso degli input, tra cui i combustibili fossili.

Per diminuire l'uso di combustibili fossili nel settore agricolo, si può agire su più ambiti. Tra le operazioni colturali, le lavorazioni del terreno e l'irrigazione sono quelle più energivore. Un cambio delle strategie agronomiche, ad esempio il passaggio da lavorazioni intensive del terreno a lavorazioni conservative può consentire una diminuzione delle emissioni da combustibili fossili (Lal, 2004); così come l'applicazione di tecniche di agricoltura di precisione e l'aumento dell'efficienza delle macchine agricole. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, ovvero il miglioramento dell'efficienza, il settore agricolo utilizza motori diesel che sono una tecnologia consolidata e utilizzata nei trattori fin dagli albori della meccanizzazione grazie alle loro

caratteristiche di coppia, affidabilità ed efficienza. Si sono evoluti per consumare meno combustibile e rispettare normative più stringenti sulle emissioni. Tuttavia, si scontrano con il limite dato dall'efficienza massima teorica raggiungibile da un motore termico.

Mentre agli albori della meccanizzazione agricola, il trattore serviva a fornire principalmente trazione, ora in quanto centrale mobile di potenza, serve a fornire potenza meccanica, idraulica ed elettrica agli attrezzi.

In questo contesto l'elettrificazione, ovvero la transizione dai motori termici ai motori elettrici, potrebbe permettere non solo di aumentare l'efficienza d'uso dell'energia ma anche di avere un controllo più preciso delle attrezzature in un contesto di applicazione di agricoltura di precisione e guida automatica/autonoma.

## **1.2 Il presente lavoro**

Il presente lavoro di tesi si è posto come obiettivo quello di capire i benefici che potrebbe avere l'elettrificazione delle macchine agricole semoventi e la creazione di una raccolta di tutti i modelli di macchine agricole semoventi elettrificate sviluppate dall'inizio degli anni 2000 ad oggi, valutandone la possibile convenienza economica di applicazione. La raccolta dei dati è stata effettuata attraverso ricerche su internet di articoli scientifici; riviste e forum di meccanica agraria; video-interviste e siti web dei costruttori e in alcuni casi contattando direttamente i costruttori. Le ricerche per questo lavoro sono state ristrette alle macchine agricole elettrificate con operatore, escludendo quindi i robot. Trattandosi nella maggior parte dei casi di prototipi, i dati raccolti sono parziali e quindi non permettono di fare confronti accurati tra tutti i modelli; tuttavia, è possibile avere una visione generale dello stato dell'arte dell'elettrificazione delle macchine agricole che può essere utile per chi opera in questo settore per valutare i futuri sviluppi.

# Capitolo 2

## L'ELETTRIFICAZIONE

### 2.1 L'elettrificazione dei veicoli

L'elettrificazione dei veicoli consiste nella transizione dall'utilizzo di combustibili fossili all'utilizzo dell'elettricità come fonte di energia. Questo processo è in atto in vari settori sotto la spinta della necessità di diminuire le emissioni per raggiungere la carbon neutrality entro il 2050. In generale, il beneficio principale dell'elettrificazione deriva dalla maggior efficienza che hanno i motori elettrici nel convertire l'energia in movimento; infatti, i motori elettrici hanno un'efficienza  $> 90\%$  ("High-efficiency motors and sustainability," 2017) mentre i motori diesel hanno un'efficienza massima del  $45\%$  ("Engine efficiency," 2023). Altri importanti benefici sono la minor necessità di manutenzione, la diminuzione della rumorosità, l'assenza di emissioni di gas di scarico in loco e la possibilità di utilizzare energia autoprodotta, realizzando un modello di economia circolare. Anche l'utilizzo di biocombustibili come biodiesel, biometano, bioetanolo, rappresenta un modello di economia circolare, tuttavia la loro produzione risulta meno efficiente rispetto alla conversione diretta della luce solare in elettricità attraverso l'uso di pannelli fotovoltaici, infatti la fotosintesi è meno efficiente rispetto al processo fotovoltaico. L'efficienza della fotosintesi nella maggior parte delle piante è attorno all' $1\text{-}2\%$  (percentuale di luce solare intercettata dai cloroplasti che viene convertita in energia chimica) mentre quella di un pannello fotovoltaico è attorno al  $15\text{-}20\%$  (percentuale di luce solare convertita in energia elettrica). Da un punto di vista teorico, quindi, risulta quindi più efficiente la conversione diretta della luce del sole in elettricità per alimentare veicoli rispetto alla conversione della luce in biomassa e successivamente in combustibile.

Mettere in atto l'elettrificazione totale dei veicoli è imprescindibile dall'aumento di produzione di energia elettrica. Ipotizzando che tutti i veicoli siano elettrificati nei prossimi anni, si possono auspicare due scenari. Il primo scenario vede tutti i veicoli elettrificati e alimentati con energia proveniente da fonti rinnovabili con un abbandono quasi totale dei combustibili fossili. Il secondo scenario, più realistico, vede tutti i veicoli



elettrificati e alimentati con energia proveniente in parte da energie rinnovabili e in parte da combustibili fossili. Anche in questo secondo scenario, teoricamente si otterrebbe una diminuzione del consumo totale di combustibili fossili in quanto una centrale termoelettrica a ciclo combinato ha un'efficienza d'uso del combustibile attorno al 50-60% grazie alla possibilità di cogenerazione ("Combined cycle power plant," 2022). Questa efficienza è superiore rispetto all'efficienza ottenibile utilizzando un qualsiasi combustibile nei motori termici dei veicoli.

Mettere in atto l'elettrificazione è imprescindibile anche dallo sviluppo di accumulatori economici che consentano di immagazzinare quantità di energia tali da permettere ai veicoli di percorrere distanze di qualche centinaio di chilometri o di compiere un giorno di lavoro senza la necessità di essere ricaricati. Inoltre, è importante fare in modo che il processo di produzione dei componenti necessari ai veicoli elettrificati non produca più CO<sub>2</sub> rispetto alla diminuzione potenziale ottenibile attraverso l'aumento di efficienza. L'elettricità per alimentare i veicoli potrà essere stoccata in batterie o prodotta attraverso celle a combustibile a partire da combustibili fluidi che non emettano CO<sub>2</sub> come idrogeno o ammoniaca. L'elettrificazione può passare attraverso l'adozione di soluzioni ibride, ovvero la presenza contemporanea nei veicoli di motori termici, motori elettrici e accumulatori che funzionano in sinergia con l'obiettivo di aumentare l'efficienza totale del sistema.

## **2.2 Le diverse tipologie di veicoli elettrificati**

I veicoli elettrificati possono essere inquadrati all'interno di diverse categorie. Una possibile classificazione si basa sui componenti che costituiscono il veicolo. I veicoli ibridi (HEV) sono veicoli che montano sia un motore termico (ICE) che motori elettrici (EM) e accumulatori (ESS) per immagazzinare l'energia elettrica. Nel caso in cui non sia presente un ESS, ma solamente l'ICE diesel e 2 o più EM, si parla di veicoli diesel-electric. In base al modo in cui trasmettono la potenza alle ruote, gli HEV vengono classificati in: ibridi in serie, ibridi in parallelo e ibridi power-split. Negli ibridi in serie l'ICE non è collegato meccanicamente alle ruote, le quali sono collegate solamente all'EM di trazione. Negli ibridi in parallelo, sia l'ICE che l'EM sono collegati meccanicamente alle ruote mentre negli ibridi power-split, ICE ed EM sono collegati alle ruote attraverso uno o più rotismi epicicloidali che permettono all'ICE di tramettere potenza alle ruote sia direttamente, sia passando per il motore elettrico. Una

descrizione più approfondita delle possibili architetture dei veicoli elettrificati, si può trovare in (Mocera and Soma, 2021).

I veicoli ibridi dotati di ESS che possono essere ricaricati attraverso una presa elettrica vengono definiti ibridi plug-in (PHEV) e possono operare in modalità esclusivamente elettrica per periodi più o meno lunghi a seconda della capacità dell'ESS. I veicoli che montano esclusivamente EM ed ESS sono definiti veicoli elettrici a batteria (BEV). Un'altra interessante tipologia di veicoli elettrificati sono i veicoli a celle a combustibile (FCEV) che convertono combustibili fluidi come idrogeno o ammoniaca in elettricità per azionare EM.

Per classificare i veicoli HEV e PHEV è utile introdurre il coefficiente di ibridazione (HF) calcolato come segue:

$$HF = \frac{P_{EM}}{P_{ICE} + P_{EM}}$$

Dove:

$P_{EM}$  è la potenza dei motori elettrici;  $P_{ICE}$  è la potenza del motore a combustione interna.

In base al grado di ibridazione, si distinguono veicoli full hybrid e mild hybrid:

per  $HF < 0,1$  si parla di mild hybrid, mentre per  $HF > 0,1$  si parla di full hybrid.

I veicoli full hybrid possono funzionare solo con ICE, solo con EM o con una combinazione dei due, mentre nei veicoli mild hybrid l'EM è presente ma la sua potenza non è sufficiente a far funzionare il veicolo senza il contributo dell'ICE.

Come proposto da (Somà et al., 2016), per le macchine operatrici è necessario introdurre un coefficiente di ibridazione diverso ( $HF_{WM}$ ) che tenga conto anche degli assorbimenti di potenza per scopi diversi dalla trazione, calcolato come segue:

$$HF_{WM} = \frac{1}{2} (HF_{Drive} + HF_{Work})$$

Dove:

$HF_{Drive}$  è il coefficiente di ibridazione dei componenti che trasmettono potenza alle ruote;

$HF_{Work}$  è il coefficiente di ibridazione dei componenti deputati a tramettere potenza ad altri organi (PTO, pompe idrauliche...).

## 2.3 L'elettrificazione delle automobili e del trasporto pesante

Nel settore delle automobili il processo di elettrificazione è in atto da più di 20 anni anche se le automobili elettrificate hanno avuto una grande espansione solo negli ultimi anni.

L'elettrificazione delle automobili ha inizio più di 25 anni fa, nel 1997, quando il gruppo Toyota iniziò a commercializzare su larga scala la prima auto ibrida, la Toyota Prius ("A Brief History Of Hybrid Cars," 2022). Attualmente le automobili elettrificate (HEV+PHEV+BEV) rappresentano il 44% delle auto vendute nel primo trimestre del 2023 in EU ("New car registrations," 2023). A partire dal 2012, l'azienda statunitense Tesla ha iniziato a produrre su larga scala BEV con autonomia superiore a 300 km. Si stima che entro la fine del 2022 siano state vendute più di 2,5 milioni di Tesla ("How Many Teslas Are On The Road in 2022?," 2022). Sotto la spinta di Tesla, anche i principali costruttori di automobili hanno iniziato a produrre BEV. Alla fine del 2021 erano presenti nel mondo più di 16,5 milioni di BEV ("Global electric car sales have continued their strong growth in 2022 after breaking records last year - News," n.d.). Questi dati mostrano come il settore delle automobili si stia progressivamente trasformando. Anche il trasporto pesante è interessato da una spinta verso l'elettrificazione, seppur con numeri di vendite molto inferiori rispetto al settore delle auto. Quasi tutti i costruttori nel 2023 propongono versioni HEV, PHEV, BEV o FCEV dei loro autocarri e trattori stradali.

## **2.4 L'elettrificazione delle macchine agricole**

L'elettrificazione riguarda varie tipologie di macchine agricole e ha obiettivi e strategie di attuazione differenti a seconda delle tipologie di macchine interessate: trattori da campo aperto, trattori specializzati, trattori compatti, sollevatori telescopici e carri miscelatori semoventi. Queste categorie di macchine agricole sono quelle di cui si trova traccia dell'esistenza di modelli elettrificati allo stadio di prototipo o già in commercio.

L'elettrificazione delle macchine agricole semoventi va dal livello minimo, ovvero l'elettrificazione degli organi ausiliari dell'ICE, fino al livello massimo, ovvero l'elettrificazione totale con modelli BEV. L'elettrificazione riguarda anche le attrezzature che in futuro necessiteranno sempre più di potenza elettrica (Rahe and Resch, 2017). L'energia elettrica necessaria alle attrezzature attualmente può essere prodotta anche da un generatore supplementare collegato alla PTO, tuttavia, l'elettrificazione delle macchine agricole semoventi consentirebbe il trasferimento di energia elettrica alle attrezzature senza ricorrere a generatori supplementari.

Parallelamente alle macchine agricole semoventi elettrificate, si stanno sviluppando una serie di macchine autonome elettrificate (robot elettrici). Non è ancora chiaro se il processo di elettrificazione avverrà contestualmente ad un passaggio diretto da

macchine convenzionali a robot oppure se ci sarà una fase intermedia di diffusione di macchine agricole semoventi elettriche che prevedono un operatore. Attualmente in alcuni settori come quello zootecnico, sta avvenendo il passaggio diretto.

A seconda della categoria di macchine agricole elettrificate, l'elettrificazione ha obiettivi diversi. Gli obiettivi comuni a tutte le categorie di veicoli sono: aumento dell'efficienza d'uso dell'energia e riduzione delle emissioni.

Per quanto riguarda gli obiettivi specifici delle macchine agricole, nei trattori da campo aperto, l'obiettivo principale dell'elettrificazione è la tractor-implement-electrification (TIE), ovvero la trasmissione di potenza elettrica alle attrezzature o "electric power off-boarding" (Pickel P., 2019). Nei trattori specializzati, gli obiettivi principali sono il soddisfacimento dei requisiti di emissioni mantenendo contenuti gli ingombri oltre alla TIE. Per quanto riguarda i trattori compatti invece, l'elettrificazione è relativamente più semplice da attuare date le minori potenze in gioco e l'obiettivo principale è quello di trasmettere un'immagine di maggior sostenibilità ambientale attraverso l'uso di veicoli a zero emissioni locali.

I carri miscelatori (macchine utilizzate nella quasi totalità delle aziende zootecniche di bovini per la preparazione dell'unifeed o TMR - Total Mixed Ration) si prestano più di tutte le altre macchine agricole ad essere elettrificati perché lavorano per tempi relativamente brevi e ad intervalli prestabiliti in contesti aziendali, per cui risulta semplice la pianificazione dei tempi di lavoro e di ricarica.

John Deere più di altri costruttori si sta dedicando allo sviluppo di soluzioni elettrificate (John Deere, 2023), tuttavia, oltre ai costruttori storici di macchine agricole, si stanno affacciando sul mercato dei trattori elettrificati nuovi costruttori.

## **2.5 Confronto tra macchine agricole convenzionali ed elettrificate**

Una macchina agricola convenzionale con motore diesel ha la possibilità di stoccare nel serbatoio del carburante 38 MJ o 10 kWh per ogni litro di volume del serbatoio. In una macchina agricola con architettura diesel-electric questa capacità non viene meno, vengono montanti componenti aggiuntivi che fanno necessariamente aumentare i costi ma a fronte di una maggior efficienza. In un HEV o PHEV la presenza dell'ESS fa alzare ulteriormente il costo rispetto ad un diesel-electric anche se il costo dell'ICE potrà essere più basso. La presenza dell'ESS permette di recuperare e stoccare energia che altrimenti andrebbe dissipata (ad es: decelerazioni durante operazioni di trasporto) ottenendo un ulteriore incremento di efficienza rispetto ad un diesel-electric.

Attualmente molti costruttori di motori agricoli (Kohler, FPT, Perkins) offrono modelli di motori diesel downsized mild hybrid o full hybrid per rispettare la normativa Stage V senza dover utilizzare SCR (Agronotizie, 2023). Lo sviluppo recente di questi modelli è stato incentivato dall'introduzione di norme sulle emissioni.

Eliminando completamente l'ICE e passando ad una configurazione BEV tutta l'energia necessaria per un giorno di lavoro dovrà essere immagazzinata nell'ESS. Dal punto di vista economico, nel caso dei BEV il costo dell'ESS è molto elevato ma viene meno il costo dell'ICE e si ha una notevole semplificazione costruttiva. Il problema principale per la realizzazione di trattori BEV è tuttora volume, peso e costo degli ESS. In media un pacco batterie Li-ion ha una densità energetica di  $0,45 \text{ kWh/dm}^3$ ; un peso specifico di  $0,16 \text{ kWh/kg}$  e un costo di  $132 \text{ US\$/kWh}$  ("Lithium-ion battery," 2023). Prendendo ad esempio il trattore di alta potenza John Deere 8R, esso ha un serbatoio del diesel da 727 l. Volendo dimensionare un pacco batterie che contenga la stessa energia utile ( $255 \text{ l}$  o  $2.550 \text{ kWh}$  considerando un'efficienza media del motore diesel del 35%), sarebbe necessario un pacco batterie da più di  $3.000 \text{ kWh}$  con volume di  $6.700 \text{ dm}^3$ , peso di quasi  $19.000 \text{ kg}$  e costo di  $370.000 \text{ €}$ . Anche se per molte operazioni è necessaria l'applicazione di zavorre e la presenza del pacco batterie aiuterebbe ad assolvere questa funzione, in questo caso il peso sarebbe troppo elevato e rischierebbe di causare eccessivo compattamento. Considerando invece un trattore specializzato come Fendt 200 V/F/P Vario con serbatoio da 68 l, l'eventuale pacco batterie per garantire  $24 \text{ l}$  o  $240 \text{ kWh}$  di energia utile (efficienza del 35%) avrà una capacità di circa  $300 \text{ kWh}$  con volume di  $670 \text{ dm}^3$ , peso di  $1.900 \text{ kg}$  e costo di  $37.000 \text{ €}$ . Questi valori riferiti ad un trattore specializzato evidenziano come l'elettrificazione totale sia per il momento attuabile solo per i trattori specializzati o di bassa potenza, mentre per i trattori di alta potenza sia più utile investigare altre opzioni come i combustibili alternativi, soprattutto il biometano come evidenziato da ("CEMA - European Agricultural Machinery - The role of agricultural machinery in decarbonising agriculture," 2022).

I FCEV uniscono i vantaggi dei veicoli full electric con la relativa semplicità di stoccaggio dei combustibili fluidi a scapito dell'efficienza. Anche se rappresentano un sistema a bassa efficienza, l'utilizzo di idrogeno o ammoniaca per alimentare macchine agricole FCEV dovrebbe essere tenuto in considerazione. Molte aziende agricole producono energia elettrica tramite pannelli fotovoltaici, tuttavia, per utilizzare l'energia elettrica autoprodotta per ricaricare BEV durante la notte sono necessari sistemi di

accumulo pari o superiori alla sommatoria delle capacità dei BEV da ricaricare. Una soluzione a questo problema potrebbe essere quella di produrre idrogeno o ammoniaca verdi da stoccare. L'ammoniaca verde risulta particolarmente interessante perché può avere un duplice utilizzo in ambito agricolo, sia come fertilizzante che come combustibile per FCEV.

## Capitolo 3

# APPLICAZIONE DI MACCHINE AGRICOLE SEMOVENTI ELETTRIFICATE

### 3.1 Modelli sviluppati

Di seguito viene proposta una sintesi delle informazioni attualmente reperibili riguardo ai modelli di macchine agricole semoventi elettrificate presentate alle fiere internazionali dall'inizio degli anni 2000 ad oggi.

In appendice si trova una descrizione accurata modello per modello.

Trattandosi nella maggior parte dei casi di prototipi, non sono disponibili tutti i dati tecnici; tuttavia, si è cercato di sintetizzare le informazioni disponibili sul web, verificate quando possibile da più fonti.

Le macchine vengono divise in 5 categorie: trattori da campo aperto, trattori specializzati, trattori compatti, sollevatori telescopici e carri miscelatori.

#### 3.1.1 Trattori da campo aperto

Come si può notare dalla Figura 3.1, nel segmento dei trattori da campo aperto, vi è una predominanza di modelli diesel-electric.

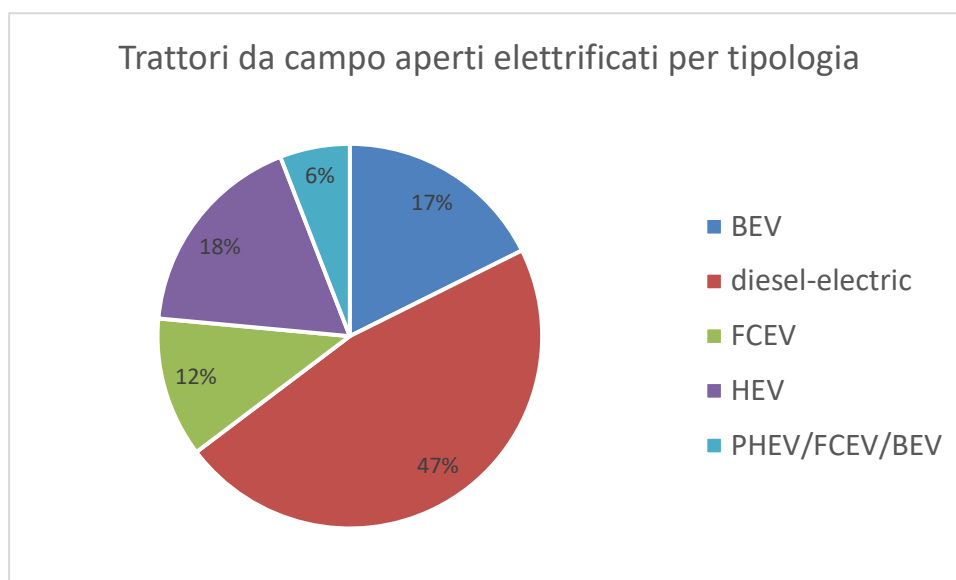


Figura 3.1 Trattori da campo aperti elettrificati per tipologia

I trattori da campo aperto sono la prima tipologia di macchine agricole che ha visto la nascita di prototipi elettrificati perché in questa categoria di macchine da molti anni ormai si sta investigando il miglioramento dell'efficienza e l'attuabilità della trasmissione di potenza elettrica alle attrezzature. Il primo costruttore a mettere in commercio un trattore diesel-electric è stato John Deere con il modello 7430/7530 E-Premium che tuttavia non ha avuto un'ampia diffusione. Sono seguiti altri modelli commercializzati fino ad arrivare all'attuale modello di punta della serie John Deere 8R dove è montata una trasmissione a variazione continua in cui la componente idraulica è stata sostituita da motori elettrici, rappresentata in Figura 3.3.

N°	Anno	Società	Modello	Classe di potenza (cv)	Tipologia	Commercializzato	Note
1	2005	Case IH	ProHybrid EECVT	160	HEV	No	Sostituzione della componente idraulica della trasmissione CVT con EM e batteria al posto della zavorra anteriore
2	2007	John Deere	7430/7530 E-Premium	190/210	diesel-electric	Sì (fuori produzione)	Elettrificazione ausiliari: aumento prestazioni con diminuzione dei consumi
3	2009	New Holland	NH2	100	FCEV	No	Basato sul modello T6000
4	2009	Belarus	3023	300	diesel-electric	Sì (solo in Russia)	Tramissione elettromeccanica ed elettrificazione della PTO frontale
5	2011	Rigitrac	EWD 120	120	diesel-electric	No	4 motori elettrici, uno per ruota. Aumento di efficienza del 15-20% rispetto ad una trasmissione idrostatica.
6	2011	John Deere	6210RE	210	diesel-electric	Sì (fuori produzione)	Power off-boarding fino a 20 kW
7	2013	Fendt	X Concept	200	diesel-electric	No	Power off-boarding fino a 130 kW ed elettrificazione ausiliari
8	2017	John Deere	SESAM	350	BEV	No	Monta 2 EM da 130 kW ciascuno. La durata della batteria da 150 kWh è di 3100 cicli
9	2019	John Deere	8R 410 eAutoPowr	400	diesel-electric	Sì	Sostituzione della componente idraulica della trasmissione CVT con EM e power off-boarding fino a 100 kW
10	2019	Steyr	Konzept	?	HEV	No	È seguito lo sviluppo di STEYR HYBRID DRIVETRAIN KONZEPT che promette risparmi di carburante dell'8%
11	2020	Jacto	Uniport Planter 500	470	diesel-electric	No	Seminatrice semovente con 1 EM per ruota
12	2021	EOX	175	175	PHEV/FCEV/BEV	Sì	Ha più configurazioni elettrificate possibili. 1 EM per ruota. Costruito con carreggiata variabile per attuare CTF
13	2021	AUGA	M1	400	HEV	No	Ibrido biometano-elettrico sviluppato da AUGA che è la più grande azienda europea produttrice di prodotti biologici
14	2022	Kalverkamp Innovation	NEXAT	1100	diesel-electric	Sì	Porta-attrezzi con 1 EM per ruota.
15	2022	John Deere	SESAM 2	680	BEV	No	Evoluzione del progetto SESAM e GridCON. Batteria da 1000 kWh.
16	2022	New Holland	T4 Electric Power	75	BEV	Sì (entro la fine del 2023)	Batteria da 95 kWh. Sviluppato in collaborazione con Monarch.
17	2023	Fendt	Hydrogen tractor	?	FCEV	No	Sviluppato nell'ambito del progetto H2Agrar per investigare l'uso di idrogeno in ambito agricolo

Figura 3.2 Tabella riassuntiva dei modelli di trattori da campo aperto elettrificati



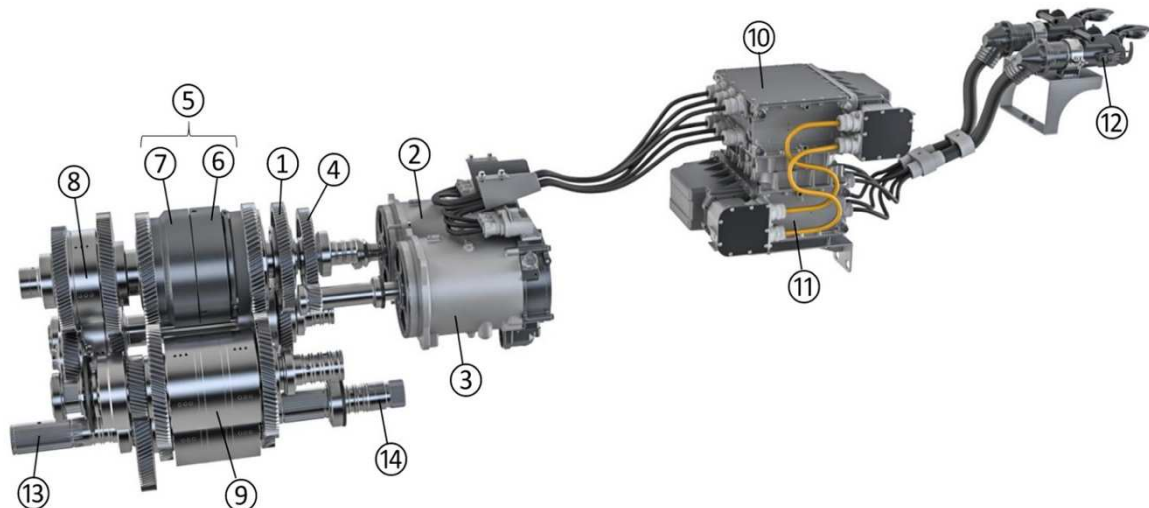


Figure 13: New eAutoPowr transmission of John Deere (① drive through and gear stage from diesel engine to MG1, ② first electric machine (MG1), ③ second electric machine (MG2), ④ gear stage from MG2 to double planetary gear, ⑤ double planetary gear, ⑥ "LO" planetary gear with sun and ring drive, ⑦ "HI" planetary gear with carrier and sun drive, ⑧ reversing circuit, ⑨ switching group module, ⑩ double inverter for MG1 and MG2, ⑪ double inverter for external attachments, ⑫ AEF-interfaces for coupling external attachments, ⑬ mechanical output front axle differential, ⑭ mechanical output Rear axle differential)

Figura 3.3 La trasmissione EVT montata sui John Deere 8R 410 - Peter Pickel (John Deere GmbH)

### 3.1.2 Trattori specializzati

Per quanto riguarda i trattori specializzati, la suddivisione per tipologia è evidenziata in Figura 3.4.

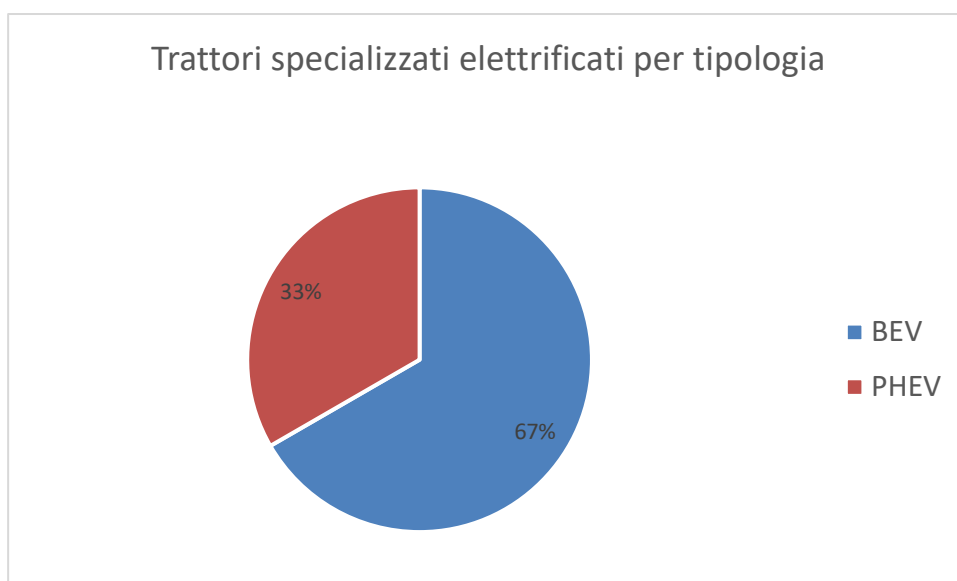


Figura 3.4 Trattori specializzati elettrificati per tipologia

I modelli elettrificati di specializzati sono quasi tutti abbastanza recenti. Il loro sviluppo è stato indotto soprattutto come soluzione tecnica per ottemperare alla normativa anti-emissioni Stage V introdotta nell'UE a partire da ottobre 2022 su tutte le classi di potenza (Agronotizie, 2022). I costruttori europei hanno sviluppato principalmente soluzioni PHEV mentre quelli statunitensi (tutti nuovi costruttori) hanno sviluppato soluzioni BEV.

N°	Anno	Società	Modello	Classe di potenza (cv)	Tipologia	Commercializzato	Note
1	2013	Kremer	T4E	110	BEV	Sì (fuori produzione)	Trattore scavallante con autonomia di 8 ore.
2	2017	Fendt	e100 Vario	70	BEV	No	Batteria Li-ion da 100 kWh. Autonomia dichiarata di 5 ore
3	2018	Carraro Tractors	ibrido	105	PHEV	No	Sviluppato in collaborazione con 4E-Consulting. Tutti gli ausiliari dell'ICE sono elettrificati.
4	2020	Monarch	MK-V	40	BEV	Sì	Prodotto da Foxconn in USA. Autonomia dichiarata di 14 ore. Può funzionare in modo autonomo.
5	2020	Hummingbird EV	tractor	65	BEV	Sì	Pensato per ricarica vehicle to vehicle tramite veicolo di supporto
6	2021	Solectrac	e70N	70	BEV	Sì	Il ciclo di vita della batteria dichiarato è di 3000 cicli con DoD (Depth of Discharge) dell'80%
7	2021	Antonio Carraro	SRX Hybrid	100	PHEV	No	Architettura del sistema con brevetto industriale ACHybrid. Risparmio di CO2 corrispondente ad un risparmio di diesel del 25% dichiarato
8	2022	Landini	REX4 Full Hybrid	110	PHEV	No	Evoluzione del modello REX4 Electra
9	2022	Goldoni Keestrack	B1E	70	BEV	Sì	Monta una batteria da 50 kWh che garantisce 4-6 ore di utilizzo

*Figura 3.5 Tabella riassuntiva dei modelli di trattori specializzati elettrificati*



Figura 3.6 Il trattore elettrico Fendt e100 Vario

### 3.1.3 Trattori compatti

In quest'analisi per trattori compatti si intendono trattori di piccole dimensioni e potenza inferiore o uguale a 40 kW. I trattori di questa categoria possono essere utilizzati in piccole aziende agricole e soprattutto per la manutenzione del verde urbano. Alcuni di questi modelli si rivolgono principalmente al mercato dei paesi in via di sviluppo, soprattutto l'India. Sono quasi tutti di tipologia BEV.

N°	Anno	Società	Modello	Classe di potenza (cv)	Tipologia	Commercializzato
1	2019	John Deere	1RE	?	BEV	No
2	2019	Farmtrac	25G	20	BEV	Sì
3	2019	Solectrac	e25	25	BEV	Sì
4	2020	Sonalika	Tiger Electric	15	BEV	Sì
5	2020	Cellestial	Electric tractor	27	BEV	No (?)
6	2021	Solis-Yanmar	5015 E Hybrid	50	PHEV	Sì
7	2022	Knegt	304/404 G2e	45/55	BEV	Sì
8	2022	Kubota	LXe-261	26	BEV	Sì (Aprile 2023)
9	2022	Solis	26 Electric	24	BEV	Sì (2024)

Figura 3.7 Tabella riassuntiva dei modelli di trattori compatti elettrificati

### 3.1.4 Carri miscelatori

I carri miscelatori elettrificati sono tutti di tipologia BEV. L'unico problema per la diffusione di questa categoria di macchine è rappresentato dal costo delle batterie che potrebbe scoraggiare l'acquisto.

N°	Anno	Società	Modello	Volume (m <sup>3</sup> )	Tipologia	Potenza elettrica totale (kW)	Capacità batteria (kWh)	Commercializzato	Note
1	2017	Siloking	TruckLine eTruck 1408	8/10/14	BEV	33	50/62	Si	Accumulatore Jungheinrich al piombo-acido con peso di 1200 kg e durata di 1600 cicli di ricarica.
2	2017	Siloking	eSilokamm	3,6/4,2	BEV	18	?	Si	Veicolo per desilamento e distribuzione insilati.
3	2020	Supertino	Electra 2	da 12 a 30	BEV	200	96/150	Si	Evoluzione di Electra presentato nel 2017. Dotato di fresa frontale. L'accumulatore è di tipo LiFePO4.
4	2022	Bravo	Rotomix Elettrico	?	BEV	?	?	?	Dotato di fresa frontale. Sviluppato assieme a COBO Spa.

*Figura 3.8 Tabella riassuntiva dei modelli di carri miscelatori elettrificati*

A questi modelli di carri miscelatori BEV si aggiungono vari carri miscelatori autonomi elettrici chiamati anche AFS (Automatic Feeding Systems) di vari costruttori: Lely, DeLaval, Wasserbauer e altri.



*Figura 3.9 Il carro miscelatore elettrico Siloking TruckLine eTruck 1408.*

### **3.1.5 Sollevatori telescopici**

I sollevatori telescopici sono quasi tutti di tipologia BEV e il loro sviluppo è legato principalmente alle richieste del settore delle costruzioni dove la richiesta di avere macchine silenziose e a zero emissioni locali per particolari contesti di lavoro urbano, ne ha favorito lo sviluppo. In ambito agricolo trovano il loro ambiente ideale di applicazione all'interno di ambienti chiusi quali serre o allevamenti avicoli grazie all'assenza di emissioni.



N°	Anno	Società	Modello	Capacità max. sollevamento (t)	Altezza max. sollevamento (m)	Tipologia	Potenza elettrica trazione (kW)	Potenza elettrica idraulica (kW)	Capacità batteria (kWh)	Commercializzato	Note
1	2013	Merlo	TF40.7 Hybrid	4	7	PHEV	60	40	?	No	Monta un ICE diesel da 55 kW.
2	2018	Faresin	6.26 Full Electric	2,6	6	BEV	30	18	23/32/43	Sì	Seconda versione, aggiornata nel 2023.
3	2020	JCB	525-60E	2,5	6	BEV	17	22	24	Sì	Pensato principalmente per l'edilizia.
4	2021	Merlo	eWorker 25.5-60/90	2,5	5	BEV	44/66	17	46	Sì	Potenza idraulica calcolata a partire da: portata idraulica massima di 42 l/min e pressione massima di 210 bar.
5	2022	Manitou	MT 625e	2,5	6	BEV	14	25	25	Sì	Pensato principalmente per l'edilizia.
6	2022	Dieci	Hybrid Boost System	?	?	HEV	?	?	?	?	Sostituisce un ICE da 79 kW con uno da 55 kW + EM da 10 kW, eliminando la necessità di SCR.
7	2022	Faresin	14.42/17.40/17.45 Full Electric	4,2/4/4,5	14/17	BEV	51	23	45	Sì	Pensato principalmente per l'edilizia.

Figura 3.10 Tabella riassuntiva dei modelli di sollevatori telescopici elettrificati



Figura 3.11 Il sollevatore telescopico elettrico JCB 525-60E testato dalla rivista Farmers Weekly.

## **3.2 Applicazione in vari contesti**

La diffusione di macchine agricole elettrificate è subordinata alla possibilità di trarne un qualche vantaggio economico (ad esempio la riduzione dei costi energetici) o gestionale (ad esempio la diminuzione dei tempi di manutenzione) da parte degli acquirenti. A differenza delle automobili e dei camion, le macchine agricole vengono utilizzate per una grande varietà di operazioni, dal trasporto al lavoro stazionario per cui è difficile stabilire un ciclo di lavoro standard. Nel dimensionamento è necessario tenere conto dei diversi contesti operativi.

Al fine dell'analisi è utile differenziare diverse tipologie di aziende agricole in cui potrebbero essere applicate macchine agricole semoventi elettrificate: aziende cerealicole estensive, aziende viticole/frutticole, aziende zootecniche.

### **3.2.1 Aziende cerealicole estensive**

Le aziende cerealicole estensive sono caratterizzate da appezzamenti di grandi dimensioni, per lo più lontani da insediamenti urbani. In questo contesto sono necessarie macchine di grandi dimensioni ed elevata potenza (> 200 cv) per poter lavorare grandi superfici nel minor tempo possibile (il cambiamento climatico fa sì che le finestre di tempo utile per svolgere le operazioni colturali nelle condizioni ottimali si riducano rispetto al passato; quindi, sono fondamentali macchine con elevata produttività oraria). L'adozione di BEV non è per il momento attuabile in quanto le dimensioni e il costo delle batterie sarebbero troppo elevati, senza contare che il rifornimento dei mezzi viene spesso effettuato in campo, senza ritornare nel centro aziendale. Per ricaricare un BEV di alta potenza in campo sarebbe necessaria la creazione di infrastrutture per il trasporto di energia elettrica in queste aree remote per cui risulta molto più praticabile l'utilizzo di combustibili fluidi, facilmente trasportabili. Tuttavia, in futuro come mostrato in (Schneider et al., 2023) l'agrivoltaico potrebbe consentire l'utilizzo in questo contesto di macchine agricole collegate via cavo alla rete elettrica o con ESS scambiabili che si ricaricano a bordo campo mentre la macchina lavora.

Al momento può risultare interessante l'implementazione di macchine agricole con architetture diesel-electric con l'obiettivo di aumentare l'efficienza e ridurre quindi i consumi energetici; oltre a permettere la TIE. Anche i veicoli FCEV potrebbero trovare applicazione.

Un'azienda cerealicola estensiva esegue verosimilmente le seguenti operazioni colturali nell'arco di 1 anno: preparazione del terreno, semina, concimazione, uno o più trattamenti con barra irroratrice, raccolta e trasporto. Non esistono attualmente macchine da raccolta elettrificate, tuttavia esistono prototipi elettrificati di trattori ad alta potenza utilizzabili per eseguire tutte le operazioni precedentemente descritte. A questo proposito, esistono due test reali di comparazione tra trattori elettrificati di tipo diesel-electric e trattori convenzionali.

(Pessina and Facchinetti, 2009) hanno comparato il trattore John Deere 7530 Premium con la sua versione elettrificata John Deere 7530 E Premium in operazioni di erpicatura con erpice rotante azionato da PTO e di trasporto su strada. Nei loro test, per quanto riguarda l'operazione di erpicatura, il consumo della versione diesel-electric è stato di 27,2 l/h contro 28,3 l/h della versione convenzionale con una produttività oraria per entrambi i modelli di 1,63 ha/h, realizzando un risparmio di carburante del 4% circa.

Per quanto riguarda l'operazione di trasporto, il consumo della versione diesel-electric è stato di 18,2 l/h contro 21,8 l/h della versione convenzionale, realizzando un risparmio di carburante del 16,5%.

Ipotizzando di utilizzare questa macchina per 1000 ore/anno per il 50% in operazioni di erpicatura e per il 50% in operazioni di trasporto, si ottiene un risparmio medio di combustibile del 10% circa (consumo orario medio per la versione diesel-electric di 22,7 l/h contro 25,1 l/h). Con il prezzo medio del gasolio agricolo che nel 2022 in Italia è stato pari a 1,35 €/l (CLAL, n.d.), un risparmio di combustibile del 10% nelle condizioni di lavoro sopra descritte si traduce in un risparmio nei costi energetici di 2.400 €/anno. Considerando un prezzo di listino per il modello E Premium superiore di 13.000 € rispetto alla versione convenzionale (Tractorum.it, n.d.), con i prezzi del gasolio agricolo riferiti al 2022, al 6° anno di utilizzo si ha l'ammortamento del costo aggiuntivo. Nel 2009 (anno in cui è stato effettuato il test) il prezzo del gasolio agricolo era di 0,60-0,70 €/l per cui con un risparmio di carburante medio del 10%, tenendo in considerazione esclusivamente i costi energetici, non era economicamente vantaggioso l'acquisto della versione E Premium.

(Florentsev et al., 2010) hanno comparato il trattore Belarus-3022 con il prototipo diesel-electric Belarus-3023 in un'operazione di aratura.

Nei loro test, il consumo della versione diesel-electric è stato di 31,7 kg/h pari a 37,3 l/h (peso specifico del gasolio assunto 0,85 kg/l) mentre quello della versione convenzionale è stato di 38,2 kg/h pari a 44,9 l/h con una produttività oraria di 2,93 ha/h



per Belarus-3023 contro 2,89 ha/h per il diesel-electric Belarus-3022. Il risparmio di carburante della versione diesel-electric rilevato dal test è stato del 17% (calcolato sul consumo orario). Considerando 500 ore/anno di aratura (1000 ore/anno di aratura sono improbabili e non vi sono dati relativi ad altre operazioni colturali) e prezzo del gasolio 1,35 €/l, si ha un risparmio nei costi del combustibile di 5.130 €/anno. Questi dati, se confermati da un test imparziale, verificherebbero la convenienza di applicazione di un trattore elettrificato come il Belarus-3023, almeno per quanto riguarda operazioni di lavorazione del terreno.

La trasmissione EVT montata sul trattore John Deere 8R 410 eAutoPowr potrebbe avere dei consumi che confermano la convenienza di applicazione dei trattori da campo aperto diesel-electric ma al momento non ci sono ancora dati disponibili.

### **3.2.2 Aziende viticole/frutticole**

Un'azienda agricola viticola/frutticola è caratterizzata da colture a filari per cui necessita di trattori specializzati, ovvero con carreggiata stretta per passare agevolmente tra i filari. Queste aziende hanno solitamente appezzamenti di piccole dimensioni (da meno di 1 ha a qualche decina di ha) posti in aree suburbane.

In questo contesto, un'eventuale operazione di ricarica di un trattore specializzato BEV sarebbe praticabile, tuttavia, sono implementabili tutte le tipologie di elettrificazione: BEV, HEV, PHEV, FCEV e diesel-electric anche se i principali costruttori europei si stanno dedicando principalmente allo sviluppo di modelli PHEV come evidenziato dai prototipi presenti alle ultime fiere di settore. La ragione è, probabilmente, perché la difficoltà ad applicare a questi mezzi sistemi di post-trattamento dei gas di scarico necessari per rientrare nei parametri stabiliti dalle normative antinquinamento, ha incentivato lo sviluppo di modelli ibridi con ICE sottodimensionato, in cui il post-trattamento dei gas di scarico non è più necessario per via della ridotta potenza dell'ICE.

(Troncon et al., 2019) hanno simulato dei cicli di lavoro per valutare la differenza di consumi tra un trattore specializzato convenzionale e uno specializzato PHEV mild hybrid con architettura in parallelo. Il risultato della simulazione è stato un risparmio nei costi di esercizio del 44% del PHEV rispetto allo specializzato convenzionale (2.713 €/anno contro 4855 €/anno su 1000 ore di utilizzo; con prezzo del gasolio 0,85 €/l e prezzo dell'energia elettrica prelevata dalla rete 0,23 €/kWh). Questo risultato, anche se non ancora verificato in un contesto reale di applicazione, suggerisce la possibile convenienza economica dell'applicazione di trattori specializzati elettrificati nel

momento in cui verranno commercializzati, a condizione che il costo di ammortamento dei componenti aggiuntivi del PHEV sia inferiore al risparmio nei costi di gestione (in questo caso circa 2.000 €/anno).

(Mocera and Martini, 2022) hanno simulato dei cicli di lavoro per comparare i consumi di un trattore specializzato convenzionale con quelli di uno specializzato con architettura HEV power-split. Le simulazioni hanno evidenziato un risparmio di carburante del 20% in operazioni di trasporto e del 10% circa in operazioni che richiedono PTO (trinciatrice, atomizzatore ed erpice rotante).

### **3.2.3 Aziende agricole zootecniche**

Un'azienda agricola zootecnica che alleva bovini utilizza quotidianamente carri miscelatori per la preparazione dell'unifeed e sollevatori telescopici per la movimentazione degli alimenti e la pulizia della lettiera, oltre a uno o più trattori di media potenza. Sollevatori telescopici e carri miscelatori sono macchine particolarmente adatte ad essere elettrificate per via delle loro caratteristiche di utilizzo.

I carri miscelatori operano quasi sempre in un contesto aziendale, quindi con facilità di accesso alla rete elettrica. Inoltre, eseguono operazioni cicliche e prestabilite (l'unifeed viene preparato 1-2 volte al giorno, tutti i giorni) per cui una volta stabilito il ciclo di lavoro e dimensionata la batteria per consentire lo svolgimento del ciclo, l'utilizzo di carri miscelatori BEV risulta di facile applicazione.

Non esistono simulazioni di confronto tra carri miscelatori elettrici e carri miscelatori convenzionali; tuttavia, utilizzando i dati forniti da Siloking si può effettuare una stima approssimativa dei costi energetici. Siloking afferma che il suo carro miscelatore elettrico utilizza 3 kWh per miscelare 1000 kg di razione ("Electric TMR feed mixer SILOKING TruckLine e.0 eTruck," n.d.).

Considerando un carro miscelatore elettrico con volume di 14 m<sup>3</sup> (Siloking ETruck 1408-14) e una densità media della razione di 300 kg/m<sup>3</sup>, la massa di razione da miscelare è di circa 4200 kg per cui in base a quanto indicato da Siloking il consumo energetico sarebbe di circa 12,6 kWh per miscelata (escludendo le fasi di carico). A questi consumi vanno aggiunti i costi di carico degli alimenti tramite sollevatore telescopico o caricatore frontale del trattore. Un carro miscelatore convenzionale da 14 m<sup>3</sup> consuma in media 5 l di gasolio per miscelare 4200 kg di razione (dato reale raccolto presso un'azienda che alleva bovini da carne, esclusa la fase di carico). Da questi dati emerge che con i prezzi medi riferiti al 2022, pari a 1,35 €/l per il gasolio e 0,31 €/kWh per l'energia elettrica ("Electricity price statistics," n.d.), l'utilizzo di un carro

miscelatore elettrico consentirebbe un risparmio di 1 €/giorno in costi energetici (costo della miscelazione di 4 €/giorno per il carro miscelatore elettrico contro 5 €/giorno per quello convenzionale).

Si può affermare con sicurezza che il consumo energetico di un carro miscelatore elettrico è inferiore rispetto a quello di uno convenzionale per cui la loro diffusione è auspicabile. Per quanto riguarda la convenienza economica, essa può variare in base alla fluttuazione dei prezzi di gasolio ed energia elettrica. Il fatto che molte aziende zootecniche producano energia elettrica tramite impianti di biogas o pannelli fotovoltaici gioca a favore del carro miscelatore elettrico che permetterebbe di affrancare parte dei costi di alimentazione dalla fluttuazione dei prezzi del gasolio.

I carri miscelatori elettrici nonostante siano presenti sul mercato da qualche anno non hanno avuto un'ampia diffusione. Una possibile ragione è che molte aziende stanno adottando AFS (Automatic Feeding Systems) elettrici, che uniscono il risparmio nei costi energetici (Acerbis, 2022) alla possibilità di alimentare meglio gli animali poiché la razione viene somministrata con maggior frequenza grazie all'automazione. Per cui attualmente c'è una competizione tra carri miscelatori elettrici e AFS elettrici, a vantaggio dei secondi.

Anche i sollevatori telescopici operano per la maggior parte del tempo in un contesto aziendale e vi sono diversi costruttori che propongono modelli BEV attualmente in commercio. Al momento non ci sono dei confronti reali sui consumi e risulta complicato fare una stima dei costi energetici per stabilirne la convenienza di applicazione.

### **3.2.4 Applicazione di trattori compatti elettrificati**

Il mercato dei trattori compatti può rappresentare una sorta di “banco di prova” in cui i costruttori possono testare configurazioni BEV da espandere ai trattori da campo aperto e ai trattori specializzati. Questa categoria permette l'ingresso nel mercato di nuovi costruttori di trattori perché i costi per lo sviluppo di un trattore compatto sono minori. Molti dei trattori compatti elettrificati provengono da paesi in via di sviluppo, paesi dove la meccanizzazione è arrivata negli ultimi decenni e le macchine agricole sono mediamente piccole e tecnologicamente poco avanzate. Questi paesi costituiscono un mercato potenzialmente molto grande per i trattori compatti elettrificati nel momento in cui riescono a garantire costi di gestione minori, ad esempio, attraverso l'auto-produzione dell'energia elettrica. Nel contesto occidentale invece, i trattori compatti vengono utilizzati soprattutto nel settore della manutenzione del verde o per aziende agricole di piccolissime dimensioni (soprattutto aziende agricole orticole). A differenza

dei trattori specializzati o da campo aperto, questi trattori difficilmente raggiungono 1000 ore/anno di lavoro. In questo contesto l'adozione di un trattore compatto elettrificato non si basa necessariamente sulla sua possibile convenienza economica, bensì sulla scelta di trasmettere un'immagine di maggior sostenibilità ambientale.

# Capitolo 4

## CONCLUSIONI

Dopo aver elencato i modelli elettrificati esistenti di 5 categorie di macchine agricole ed averne descritto brevemente le caratteristiche e alcuni possibili vantaggi di applicazione, risulta evidente come l'elettrificazione delle macchine agricole sia ancora ad uno stadio preliminare perché il numero di modelli in commercio è molto contenuto. Considerando l'impatto modesto che questa categoria di veicoli ha sulle emissioni globali (< 2%) sorge spontanea la domanda se lo sforzo di alcuni costruttori di sviluppare soluzioni elettrificate sia realmente giustificato e da incentivare. È molto importante per il raggiungimento degli obiettivi di carbon neutrality che gli sforzi della politica si focalizzino sui settori più significativi in termini di emissioni: il trasporto su strada e il riscaldamento degli edifici; perché se paradossalmente tutte le macchine agricole del mondo diventassero istantaneamente a zero emissioni, l'impatto di questa rivoluzione sulle emissioni totali di GHG sarebbe quasi nullo. La scelta di applicare normative sulle emissioni anche alle macchine agricole sarebbe da mettere in discussione relativamente alla sua reale efficacia.

L'analisi tecnica di applicazione di trattori elettrificati, sia nelle simulazioni che nei test reali presi in considerazione ha evidenziato un risparmio più o meno marcato per quanto riguarda i costi energetici, soprattutto nelle operazioni di trasporto. La messa in commercio nei prossimi anni di macchine agricole elettrificate è auspicabile non tanto per la diminuzione potenziale delle emissioni quanto per il miglioramento dell'efficienza e del controllo delle attrezzature e per la possibilità da parte degli agricoltori di auto-produrre l'energia, affrancandosi da input esterni. Relativamente alla questione dell'auto-produzione di energia elettrica, è necessario valutare anche sistemi di stoccaggio dell'energia che prevedano la conversione dell'energia elettrica in combustibili fluidi, seppur meno efficienti.

Da qui al 2030 probabilmente verranno commercializzate più versioni BEV di trattori specializzati e trattori da campo aperto di bassa potenza e al contempo sarà possibile

acquistare trattori di media e alta potenza con architetture ibride e che sfruttano combustibili alternativi di produzione aziendale (soprattutto biometano).

Lo sviluppo di ESS con densità energetica maggiore e peso specifico e prezzo minori dovrà essere guidato dal settore automotive e del trasporto pesante mentre il settore delle macchine agricole potrà beneficiare indirettamente di questi progressi. Gli ESS montati sui BEV dovranno dimostrare affidabilità in ambienti di lavoro difficili come il campo e dovranno garantire un'adeguata durata economica prima di essere adottati nelle aziende agricole su larga scala.

L'elettrificazione delle macchine agricole, quindi, potrà sicuramente portare dei benefici nei prossimi anni ma questi non avranno una grande rilevanza a livello ambientale per cui è suggeribile concentrare gli investimenti economici per la decarbonizzazione su altri settori più impattanti.

# Appendice

Di seguito la descrizione dei trattori da campo aperto elettrificati:

1. Case IH ProHybrid EECVT presentato ad Agritechnica nel 2005. Si tratta di un HEV poiché costituito da ICE diesel da 120 kW, 2 EM da 50 kW e una batteria posizionata al posto della zavorra anteriore. Dalle informazioni disponibili, Case IH ha lavorato allo sviluppo di questo prototipo dal 1999 tuttavia non ha in programma di introdurlo sul mercato. Gli EM sostituiscono la componente idraulica della trasmissione CVT; possono fornire power boost e trasformare l'energia cinetica della decelerazione in energia elettrica da stoccare nella batteria. Il posizionamento della batteria al posto della zavorra anteriore risulta una soluzione interessante perché trasforma un componente passivo come una zavorra in un componente attivo che permette di aumentare l'efficienza del sistema ("Hybrid tractors - a look at the future?," 2005).
2. John Deere 7430/7530 E Premium presentato ad Agritechnica nel 2007. Si tratta di un diesel-electric con ICE diesel da circa 140/160 kW a seconda del modello e un generatore da 20 kW posizionato tra motore e frizione che fornisce energia elettrica per azionare gli organi ausiliari, più nello specifico: ventola di raffreddamento elettrica, pompa del liquido refrigerante elettrica, compressore del condizionatore elettrico e compressore dell'aria dei freni. Grazie all'azionamento elettrico questi componenti funzionano in modo indipendente dal regime di rotazione del motore, permettendo un miglioramento delle prestazioni del motore e una riduzione dei consumi medi del 5% ("John Deere E-Premium adds a bit of spark to 7430 and 7530 tractors," 2008; Pickel P., 2019).
3. New Holland NH2 presentato nel 2009. Si tratta di un FCEV con potenza di 75 kW che monta 2 EM, uno per la trazione e uno per PTO e ausiliari. È stato testato presso l'azienda agricola La Bellotta (Farmers Weekly, 2009; la Repubblica.it, 2011; New Holland, 2009).
4. Belarus 3023 presentato ad Agritechnica nel 2009. Si tratta di un diesel-electric con ICE diesel da 220 kW e un generatore da 175 kW che aziona la trasmissione

- elettromeccanica, la PTO frontale elettrica e la ventola di raffreddamento elettrica (“Agritechnica 09,” 2009) (Florentsev et al., 2010) (Wilson, 2018).
5. Rigitrac EWD 120 presentato ad Agritechnica nel 2011. Si tratta di un diesel-electric con ICE diesel da 91 kW e un generatore da 85 kW che aziona 4 motori elettrici da 33 kW, uno per ogni ruota. È possibile il power off-boarding fino ad 80 kW (“Agritechnica 2011,” 2011; Technische Universität Dresden, n.d.).
  6. John Deere 6210RE presentato ad Agritechnica nel 2011. Si tratta di un diesel-electric con ICE diesel da 160 kW che rappresenta l’evoluzione dei modelli E-Premium presentati 4 anni prima. Su questo modello è possibile effettuare power off-boarding fino a 20 kW (Grainews, 2012; John Deere, n.d.; *John Deere 6210RE promotional video*, 2013; “John Deere New 6R Series by A&S Agri Services Ltd - Issuu,” 2012; Stoss et al., 2013).
  7. Fendt X Concept presentato ad Agritechnica nel 2013. Si tratta di un diesel-electric con ICE diesel da 147 kW e un generatore posto tra motore e trasmissione che permette di effettuare power off-boarding verso le attrezzature fino a 130 kW oltre ad alimentare ventola di raffreddamento elettrica e pompa del liquido refrigerante elettrica (“Fendt X Concept | Fendt Future Farm | Fendt World,” n.d.; Spencer, 2016).
  8. John Deere SESAM (Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery) presentato al SIMA nel 2017. Si tratta di un BEV basato sul telaio dei trattori della serie 6R dove l’ICE diesel è stato sostituito da un pacco batterie da 150 kWh in grado di fornire potenza a due EM da 130 kW ciascuno, uno dedicato alla trazione e uno dedicato a PTO ed ausiliari. I due EM possono funzionare in modo accoppiato per fornire la potenza massima quando richiesto. Dalle informazioni disponibili l’autonomia è di 4 ore di lavoro con ricarica in 3 ore e durata della batteria di 3100 cicli (*SIMA 2017 | Prototype JOHN DEERE Sesam - Tracteur électrique*, 2017).
  9. John Deere 8R 410 eAutoPowr presentato ad Agritechnica nel 2019. Si tratta di un diesel-electric con ICE diesel da 300 kW e 2 EM che sostituiscono la componente idraulica della trasmissione IVT John Deere per realizzare una trasmissione EVT (Electric Variable Transmission) oltre a consentire power off-boarding fino a 100 kW (“John Deere 8R 410 now available with eAutoPowr,” n.d.; “John Deere offers new Electric Variable Transmission,” n.d.; *Stepless diventa elettrica*, 2022).



10. Steyr Konzept presentato ad Agritechnica nel 2019. Non si tratta di un modello di trattore funzionante ma di un “modello concettuale” da esposizione. A questo modello è seguita nel 2021 la presentazione di una trasmissione elettrificata per HEV che promette risparmi di carburante dell’8% e il raggiungimento della velocità massima con il 25% di tempo in meno (“Agritechnica News,” n.d.; Karsten, 2021; STEYR, n.d.).
11. Jacto Uniport Planter 500 presentato nel 2020 non è propriamente un trattore bensì una seminatrice semovente diesel-electric pensata per i contesti di semina su sodo. Ha un ICE diesel da 350 kW collegato ad un generatore che alimenta 4 EM indipendenti, posizionati uno per ogni ruota (Azevedo, 2020; “Uniport Planter 500,” n.d.).
12. EOX-175 presentato nella sua versione attuale nel 2021 (anche se il primo prototipo è del 2015). È un trattore isodiametrico con carreggiata variabile da 2,25 a 3,20 m pensato per attuare la strategia CTF (Controlled Traffic Farming). È costituito da 6/7 EM di cui 4 EM per la trazione (posizionati uno per ruota), 1/2 EM per la/le PTO e 1 EM per la pompa idraulica. È un veicolo modulare che a seconda della configurazione può attingere energia elettrica da diverse fonti. In configurazione PHEV l’energia proviene da un ICE da 120 kW e da una batteria da 50 kWh. In configurazione FCEV l’energia proviene dall’idrogeno che viene convertito in energia elettrica tramite celle a combustibile da 120 kW mentre in configurazione BEV l’energia proviene da un pacco batterie da 100/200/300 kWh (“EOX - 175,” n.d.; *Paul Van Ham in Berlin 2022*, 2023).
13. AUGA M1 presentato nel 2021 è un HEV costituito da un ICE a biometano, 4 EM posizionati uno per ogni ruota e un ESS (“AUGA group presents the first batch of the AUGA M1 hybrid tractor,” n.d.; *AUGA M1 - world’s first hybrid biomethane and electric tractor for professional use.*, 2021).
14. Nexat presentato ad Agritechnica 2022. Non è propriamente un trattore bensì un porta-attrezzi modulare diesel-electric pensato per attuare la strategia CTF su larghezze da 6 a 24 m consentendo di ottenere un calpestamento minimo del 5% della superficie. Ha 2 ICE diesel indipendenti da 410 kW l’uno che forniscono energia elettrica agli EM di trazione. In futuro i due ICE diesel potranno essere sostituiti da celle a combustibile a idrogeno (Nexat, 2021, n.d.).
15. John Deere SESAM 2 è un BEV autonomo ma dotato di cabina per effettuare il trasporto su strada. È l’evoluzione del progetto SESAM e GridCON (trattore

elettrico alimentato via cavo (Hattum, 2019)). È dotato di un pacco batterie da 1000 kWh e ha una potenza di 500 kW (Erkelens, 2022).

16. New Holland T4 Electric Power presentato nel 2022. Ha una potenza elettrica di 55 kW in continuo e 89 kW di picco. È dotato di un pacco batterie da 95 kWh (“CNH New Holland T4 Electric T7 LNG Tractors,” n.d.; “Monarch’s Agtech Solutions Expand the Utility Tractor Market,” n.d.).
17. Fendt hydrogen tractor presentato nel 2023. È un FCEV sviluppato nell’ambito del progetto H2Agrar per la ricerca di un’infrastruttura a idrogeno per uso agricolo. Fendt ha consegnato i suoi due prototipi di prima generazione a delle aziende agricole della Bassa Sassonia nell’aprile 2023 (Fendt, 2023; “Fendt trials hydrogen fuel cell tractors,” 2023).

Di seguito la descrizione dei trattori specializzati elettrificati:

1. Kremer T4E è un trattore scavallante BEV presentato a SITEVI 2013. È l’evoluzione di un modello a 3 ruote presentato nel 2010 e denominato T3E. Monta un accumulatore Li-ion che secondo il costruttore garantisce un’autonomia di 8-16 ore con durata della ricarica di 8 ore. Ha 4 EM che forniscono una potenza complessiva di 110 cv pari a 81 kW (*Présentation du tracteur enjambeur électrique Kremer*, 2013). Attualmente l’azienda costruttrice non esiste più, tuttavia si trovano dei modelli usati in vendita.
2. Fendt e100 Vario presentato ad Agritechnica nel 2017. Si tratta di un trattore specializzato BEV basato sul modello dei trattori specializzati Fendt serie 200. La potenza elettrica è di 50 kW e la capacità della batteria Li-ion è di 100 kWh circa. Fendt indica un’autonomia in condizioni di lavoro reali di 5 ore (“Fendt e100 Vario | Fendt FutureFarm,” 2017).
3. Carraro Tractors ibrido è un trattore specializzato presentato ad EIMA 2018. Si tratta di un PHEV parallelo con: ICE da 56 kW e cilindrata di 2200 cc con tutti gli ausiliari elettrificati, EM da 20 kW di potenza e batteria LiFePO<sub>4</sub> (litio-ferro-fosfato) con una capacità di 25 kWh. La potenza complessiva è di 105 cv pari a 77 kW. Il trattore è stato sviluppato da Carraro Tractors in collaborazione con 4E-Consulting (“4E-Consulting e Carraro Ibrido,” 2018). Carraro Group di cui fa parte Carraro Tractors ha sviluppato nel 2020 diverse soluzioni elettrificate applicabili a vari modelli di trattori: Carraro Mild Hybrid Powertrain, eTransmission ed eAxle (“Carraro Group,” 2020).

4. Monarch MK-V è un trattore specializzato BEV presentato nel 2020. È in grado di fornire una potenza elettrica di 30 kW in continuo con picchi di 55 kW. L'autonomia massima dichiarata da Monarch è di 14 ore ed è possibile effettuare il cambio del pacco batteria. La caratteristica principale è che può funzionare in maniera autonoma ("Monarch Tractor Electric Tractor | MK-V Electric Tractor," n.d.).
5. Hummingbird EV tractor è un trattore specializzato BEV presentato al World Ag Expo nel 2020. Ha una potenza di 65 cv pari a 48 kW ed è pensato per essere ricaricato in campo per mezzo di un camion di supporto con pacco batterie da 88 kWh (ricarica vehicle-to-vehicle - V2V) che può caricare due trattori contemporaneamente in 30 minuti (*California Farms Go Green with Zero-Emission Electric Tractors*, 2021; World Ag Expo, 2021).
6. Solectrac e70N è un trattore specializzato BEV presentato nel 2021. Ha una potenza elettrica di 52 kW. Monta una batteria LiFePO4 (litio-ferro-fosfato) con una capacità di 60 kWh. L'autonomia è variabile da 3 a 8 ore a seconda dell'utilizzo ("e70N Electric Tractor," n.d.).
7. Antonio Carraro SRX Hybrid è un trattore specializzato PHEV presentato nel 2021. Ha un ICE diesel da 55 kW e un EM da 20 kW per una potenza massima complessiva di 75 kW. È frutto della collaborazione tra Antonio Carraro ed Ecothea, una startup del Politecnico di Torino specializzata nella progettazione di veicoli elettrici per applicazioni in agricoltura (Antonio Carraro, 2021; "Area Press | Antonio Carraro," 2021).
8. Landini Rex4 Full Hybrid è un trattore specializzato PHEV presentato nel 2022, evoluzione del prototipo Landini REX4 Electra – Evolving Hybrid presentato nel 2020. È dotato di ICE diesel da 55 kW e un EM da 50 kW. In modalità ibrida viene sfruttata la potenza massima dell'ICE e 25 kW dell'EM per una potenza complessiva di 80 kW. In modalità full electric, il trattore sfrutta la potenza massima dell'EM pari a 50 kW con picchi di potenza di 65 kW (Landini, 2022).
9. Goldoni Keestrack B1E è un trattore specializzato BEV presentato nel 2022. Monta 5 EM: uno per la trazione da 35 kW; 2 per le PTO da 14 e 9,5 kW; uno per i servizi idraulici da 15 kW e uno per la pompa di calore da 4,5 kW. Può generare una potenza massima di 80 kW. Monta una batteria da 50 kWh che assicura 4-6 ore di autonomia (*GOLDONI Keestrack B1e*, 2023).

Di seguito la descrizione dei trattori compatti elettrificati:

1. John Deere 1RE presentato nel 2019. Si tratta di un BEV che secondo il costruttore dovrebbe avere performance maggiori o uguali all'omologo diesel. È ancora allo stadio di prototipo (*Electric compact tractor - Future of Farming | John Deere, 2020*).
2. Farmtrac 25G presentato nel 2019. È un BEV con potenza di 15 kW caratterizzato da batteria Li-ion con autonomia di 8 ore circa, ricarica all'80% in 3 ore e ricarica al 100% in 5 ore. La vita della batteria è di 2500 cicli (*Could The Future Of Farming Be Electric?, 2023; "Farmtrac - Trattori," n.d.*).
3. Solectrac e25 presentato nel 2020. È un BEV con potenza di 19 kW e batteria Li-ion da 22 kWh che inizialmente è stato commercializzato con il nome di CET (Compact Electric Tractor). Presenta le stesse caratteristiche sia tecniche che visive del Farmtrac 25G. Non è chiaro se si tratti dello stesso trattore commercializzato con un marchio diverso oppure se monti componenti diversi (*"e25 Compact Electric Tractor," n.d.*).
4. Sonalika Tiger Electric è un BEV attualmente commercializzato in India (*Sonalika Tiger Electric Tractor, 2020*).
5. Celestial e-mobility è un BEV ancora allo stadio di prototipo (Groeneveld, 2022).
6. Solis-Yanmar 5015 E Hybrid è un PHEV con ICE diesel da 36 kW ed EM da 6 kW con funzione di Power Boost (*"Solis 5015 E Hybrid," n.d.*).
7. Knekt 304/404 G2e presentato nel 2022 è un BEV con potenza di 33 o 40 kW a seconda del modello. Monta una batteria Li-ion che assicura dalle 3 alle 5 ore di lavoro ed è possibile montare un pacco batterie esterno per estendere l'autonomia fino a 9 ore. Può essere ricaricato dal 30 all'80% in 2,5 ore. La vita della batteria è di 3500 cicli (*"Knekt 404G2E Electric tractor," n.d.; Knekt Electric Tractors, 2022*).
8. Kubota LXe-261 presentato nel 2022 è un BEV con potenza di 19,1 kW, autonomia di 3-4 ore di uso continuo e tempo di ricarica di 1 ora. È destinato al mercato europeo e più nello specifico a comuni ed enti pubblici. La commercializzazione è programmata a partire da aprile 2023 sottoforma di noleggio a lungo termine (*"Compact Electric Tractor LXe-261 Released in European Markets | News 2022," n.d.*).
9. Solis 26 Electric presentato nel 2022 è un BEV da 17,7 kW (*SOLIS 26 Electric, 2022*).

Di seguito la descrizione dei carri miscelatori elettrificati:

1. Siloking TruckLine eTruck 1408 è un carro miscelatore BEV presentato nel 2017 e attualmente in commercio con vasca di carico da 8, 10 o 14 m<sup>3</sup>. Ha 2 EM: 1 EM per la trazione da 18 kW e 1 EM da 15 kW per azionare gli organi di miscelazione. Le versioni da 8 e 10 m<sup>3</sup> hanno una batteria da 620 Ah e 80 V che corrispondono a circa 50 kWh mentre la versione da 14 m<sup>3</sup> ha una batteria da 775 Ah e 80 V che corrispondono a 62 kWh. Secondo il costruttore i consumi medi sono 3 kWh/t di razione miscelata (“Electric TMR feed mixer SILOKING TruckLine e.0 eTruck,” n.d.; “Emission-free and easy charging - Futtermischwagen Futtermischtechnik 4.0 | SILOKING,” n.d.; “SILOKING TruckLine e.0,” n.d.). L’accumulatore è al piombo-acido, costruito dalla Jungheinrich, con peso di 1200 kg con durata di 1600 cicli di ricarica, circa 4,5 anni con ciclo di ricarica giornaliero (al termine di questi cicli, la capacità della batteria si riduce al 60% della capacità originale). Il costo per la sostituzione della batteria è di circa 4000 € (*Siloking-Vertriebsleiter über den elektrischen Futtermischwagen e.0 eTruck 1408*, 2017).
2. Siloking eSilokamm non è propriamente un carro miscelatore bensì un veicolo per il desilamento e la distribuzione dell’insilato. Ha 1 EM per la trazione da 6,9 kW e 1 EM per la componente idraulica da 11,5 kW. Sfrutta la stessa tecnologia del Siloking TruckLine eTruck 1408.
3. Supertino Electra 2 è un carro miscelatore BEV attualmente in commercio con vasca di carico fino a 30 m<sup>3</sup>, evoluzione del modello Electra presentato nel 2017. Ha una potenza elettrica di 200 kW e due pacchi batterie a seconda delle esigenze: 96 kWh oppure 150 kWh. I consumi a valle dell’EM non variano significativamente rispetto al semovente con ICE in quanto tutta la trasmissione della potenza è la medesima (idraulica e meccanica). Al momento dell’acquisto la batteria viene dimensionata in modo da avere almeno il 20% di carica residua al termine del lavoro per preservare la vita della batteria. L’autonomia varia in base al tipo di prodotto che deve essere miscelato e soprattutto in base al tempo di impiego della fresa che è l’organo con maggior assorbimento di potenza. I tempi di ricarica dal 20 al 100% a 12 kW di potenza sono circa 10 ore per il pacco batterie da 150 kWh e circa 6,5 ore per il pacco batterie da 96 kWh (dati forniti dall’ufficio tecnico Supertino ad aprile 2023). Il target per questo carro

miscelatore sono principalmente le aziende agricole che producono energie rinnovabili.

4. Bravo Rotomix Elettrico è un carro miscelatore BEV presentato ad EIMA 2022. Monta 6 EM e 2 pacchi batterie da circa 600 kg l'uno che consentono un'autonomia di lavoro di 2,5-3 ore (*Intervista Bravo - Carro miscelatore semovente Rotomix Elettrico, 2022*).

Di seguito la descrizione dei sollevatori telescopici elettrificati:

1. Merlo TF40.7 Hybrid presentato ad Agritechnica 2013 è un sollevatore telescopico PHEV con capacità massima di sollevamento di 4000 kg e altezza massima di sollevamento di 7 m. Può funzionare in modalità diesel, ibrida oppure full electric per 2-4 ore. Monta un ICE diesel da 55 kW e 2 EM, uno da 40 kW per l'idraulica e uno da 60 kW per la trazione e un ESS. Secondo il costruttore, consente una riduzione dei consumi e delle emissioni inquinanti fino al 30% (Somà et al., 2016).
2. Faresin 6.26 Full Electric presentato nel 2018 è un sollevatore telescopico BEV con capacità massima di sollevamento di 2600 kg e altezza massima di sollevamento di 6 m. È attualmente alla sua seconda versione, aggiornata nel 2023. Monta 2 EM, uno da 18 kW per l'idraulica e uno da 30 kW per la trazione e un ESS da 23/32/43 kWh. Nella configurazione da 43 kWh l'autonomia è fino a 6 ore con utilizzo intensivo e fino a 11 ore con utilizzo non intensivo ("6.26 Full Electric | Faresin Industries," n.d.; "6.26 Full Electric, Faresin svela gli aggiornamenti 2023 del telescopico," 2023).
3. JCB 525-60E è un sollevatore telescopico BEV presentato nel 2020 con capacità massima di sollevamento di 2500 kg e altezza massima di sollevamento di 6 m. Monta 2 EM, uno da 22 kW per l'idraulica e uno da 17 kW per la trazione e una batteria Li-ion da 24 kWh. ("On test," 2021).
4. Merlo eWorker 25.5-60/90 è un sollevatore telescopico BEV presentato nel 2021 con capacità massima di sollevamento di 2500 kg e altezza massima di sollevamento di 5 m. Nella versione 4 ruote motrici (25.5-90), monta 4 EM di cui 3 EM da 22 kW per la trazione, un EM (da 17 kW circa) per l'idraulica. Ha un ESS al piombo-acido da 46 kWh ("eWorker | THL | Merlo S.p.A.," n.d.).
5. Manitou MT 625e presentato nel 2022 è un sollevatore telescopico BEV con capacità massima di sollevamento di 2500 kg e altezza massima di sollevamento

di 6 m circa. Monta 2 EM, uno da 25 kW per l'idraulica e uno da 14 kW per la trazione e un ESS Li-ion da 25 kWh ("MT 625 e," n.d.).

6. Dieci Hybrid Boost System presentato ad EIMA 2022 è un sistema ibrido per sollevatori telescopici che permette di sostituire un ICE diesel da 79 kW con un ICE diesel da 55 kW e un EM da 10 kW, diventando un HEV (Dieci, 2022).
7. Faresin 14.42/17.40/17.45 Full Electric presentato nel 2022 è un sollevatore telescopico BEV con capacità massima di sollevamento di 4200/4000/4500 kg a seconda del modello e altezza massima di sollevamento di 14/17 m a seconda del modello. Monta 2 EM, uno da 23 kW per l'idraulica e uno da 51 kW per la trazione e un ESS da 45 kWh ("Big Range Full Electric | Faresin Industries," n.d.).

# BIBLIOGRAFIA

## Articoli scientifici e siti web consultati

- 4E-Consulting e Carraro Ibrido [WWW Document], 2018. . Powertrain - Tutte le novità sui motori diesel. URL <https://www.powertrainweb.it/4e-consulting-e-carraro-ibrido/> (accessed 4.18.23).
- 6.26 Full Electric | Faresin Industries, n.d. URL <https://www.faresin.com/full-electric/6-26-full-electric/> (accessed 4.23.23).
- 6.26 Full Electric, Faresin svela gli aggiornamenti 2023 del telescopico [WWW Document], 2023. . TRATTORI Web - News sui trattori. URL <https://www.trattoriweb.com/6-26-full-electric-faresin-svela-gli-aggiornamenti-2023-del-telescopico/> (accessed 4.23.23).
- A Brief History Of Hybrid Cars [WWW Document], 2022. . CarsDirect. URL <https://www.carsdirect.com/green-cars/a-brief-history-of-hybrid-cars> (accessed 7.14.22).
- Acerbis, L., 2022. Costi energetici per fare l'unifeed, vince il robot [WWW Document]. Steaming-Up. URL <https://steaming-up.com/costi-energetici-per-fare-lunifeed-vince-il-robot/> (accessed 4.11.23).
- Agritecnica 09: Belarus sports electric front pto [WWW Document], 2009. . Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/machinery/agritecnica-09-belarus-sports-electric-front-pto> (accessed 2.4.23).
- Agritecnica 2011: Rigitrac shows novel diesel-electric tractor [WWW Document], 2011. . Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/machinery/agritecnica-2011-rigitrac-shows-novel-diesel-electric-tractor> (accessed 2.8.23).
- Agritecnica News: Into the future, with STEYR Traktoren [WWW Document], n.d. URL <https://www.steyr-traktoren.com/en-distributor/agriculture/News-Site/Pages/2019-11-10-AGRITECHNICA-NEWS.aspx> (accessed 2.13.23).
- Agronotizie, 2023. Motori agricoli: avanti tutta per l'ibrido e l'elettrico [WWW Document]. Motori agricoli: avanti tutta per l'ibrido e l'elettrico. URL



<https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2023/04/06/motori-agricoli-avanti-tutta-per-l-ibrido-e-l-elettrico/78786> (accessed 6.12.23).

Agronotizie, 2022. Motori Stage V: date confermate [WWW Document]. URL <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2022/05/09/motori-stage-v-date-confermate/74742> (accessed 6.21.23).

Antonio Carraro, 2021. Antonio Carraro SRX Hybrid: il futuro è verde brillante [WWW Document]. URL <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2021/11/05/antonio-carraro-srx-hybrid-il-futuro-e-verde-brillante/73048> (accessed 4.18.23).

Area Press | Antonio Carraro [WWW Document], 2021. URL [https://www.antoniocarraro.it/it/press/cartella\\_stamp/prodotti/SRX\\_HYBRID](https://www.antoniocarraro.it/it/press/cartella_stamp/prodotti/SRX_HYBRID) (accessed 4.18.23).

AUGA group presents the first batch of the AUGA M1 hybrid tractor [WWW Document], n.d. . AUGA. URL <https://auga.it/en/media/auga-group-presents-the-first-batch-of-the-auga-m1-hybrid-tractor/> (accessed 2.10.23).

AUGA M1 - world's first hybrid biomethane and electric tractor for professional use., 2021.

Azevedo, D., 2020. Jacto launches hybrid self-propelled seed drill [WWW Document]. Future Farming. URL <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/jacto-launches-hybrid-self-propelled-seed-drill/> (accessed 2.13.23).

Big Range Full Electric | Faresin Industries, n.d. URL <https://www.faresin.com/full-electric/big-range-full-electric/> (accessed 4.23.23).

California Farms Go Green with Zero-Emission Electric Tractors, 2021.

Carraro Group [WWW Document], 2020. . Carraro. URL <https://www.carraro.com/it/prodotti-e-servizi/e-carraro/elettrificazione> (accessed 4.18.23).

CEMA - European Agricultural Machinery - The role of agricultural machinery in decarbonising agriculture [WWW Document], 2022. URL <https://www.cema-agri.org/publication/position-papers/916-the-role-of-agricultural-machinery-in-decarbonising-agriculture> (accessed 6.12.23).

CLAL, n.d. TESEO - Milan: Agricultural Diesel Price [WWW Document]. URL [https://teseo.clal.it/?section=gasolio\\_agricolo](https://teseo.clal.it/?section=gasolio_agricolo) (accessed 4.9.23).

CNH New Holland T4 Electric T7 LNG Tractors [WWW Document], n.d. URL <https://www.sae.org/site/news/2022/12/cnh-tech-day-new-tractors> (accessed 4.16.23).

Combined cycle power plant, 2022. . Wikipedia.

Compact Electric Tractor LXe-261 Released in European Markets | News 2022 [WWW Document], n.d. . Kubota Global Site. URL <https://www.kubota.com/news/2022/20220905.html> (accessed 1.29.23).

Could The Future Of Farming Be Electric? | Everything Electric Show, 2023.

Dieci, 2022. EIMA 2022: Hybrid Boost System di DIECI conquista con la tecnologia green. Dieci srl. URL <https://dieci.com/web/eima-2022-hybrid-boost-system-di-dieci-conquista-con-la-tecnologia-green/> (accessed 2.13.23).

e25 Compact Electric Tractor [WWW Document], n.d. . Solectrac. URL <https://solectrac.com/cet-electric-tractor> (accessed 4.22.23).

e70N Electric Tractor [WWW Document], n.d. . Solectrac. URL <https://solectrac.com/e70n-electric-tractor> (accessed 4.18.23).

Electric compact tractor - Future of Farming | John Deere, 2020.

Electric TMR feed mixer SILOKING TruckLine e.0 eTruck [WWW Document], n.d. URL <https://old.siloking.com/en/siloking-feed-mixing-products/electric-tmr-feed-mixer-siloking-truckline> (accessed 3.1.23).

Electricity price statistics [WWW Document], n.d. URL [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics) (accessed 3.9.23).

Emission-free and easy charging - Futtermischwagen Futtermischtechnik 4.0 | SILOKING [WWW Document], n.d. URL <https://www.siloking.com/en/products/siloking-truckline-e-0> (accessed 3.1.23).

Engine efficiency, 2023. . Wikipedia.

EOX - 175 [WWW Document], n.d. URL <https://www.e-ox.nl/eox-175> (accessed 2.10.23).

Erkelens, J.V., 2022. VIDEO | John Deere shows autonomous electric tractor [WWW Document]. Future Farming. URL <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/autonomous-semi-autosteering-systems/video-john-deere-shows-autonomous-electric-tractor/> (accessed 4.22.23).

- eWorker | THL | Merlo S.p.A. [WWW Document], n.d. URL <https://www.merlo.com/ITA/ita/prodotti/telescopici-compatti/eworker/eworker-25.5-90-4wd> (accessed 4.23.23).
- Farmers Weekly, 2009. New Holland's fuel cell tractor [WWW Document]. Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/news/environment/now-in-video-new-holland-s-fuel-cell-tractor> (accessed 6.13.23).
- Farmtrac - Trattori [WWW Document], n.d. URL <https://www.farmtracitalia.it/trattori> (accessed 4.22.23).
- Fendt, 2023. Fendt shows first hydrogen tractor at German Hydrogen Summit [WWW Document]. URL <https://www.fendt.com/int/fendt-shows-first-hydrogen-tractor-at-german-hydrogen-summit> (accessed 6.13.23).
- Fendt e100 Vario | Fendt FutureFarm [WWW Document], 2017. URL <https://www.fendt.com/it/e100-vario> (accessed 4.16.23).
- Fendt trials hydrogen fuel cell tractors [WWW Document], 2023. . Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/machinery/technology/fendt-trials-hydrogen-fuel-cell-tractors> (accessed 6.10.23).
- Fendt X Concept | Fendt Future Farm | Fendt World [WWW Document], n.d. URL [https://www.fendt.com/int/page\\_804\\_web\\_en](https://www.fendt.com/int/page_804_web_en) (accessed 2.8.23).
- Florentsev, S., Izosimov, D., Makarov, L., Baida, S., Belousov, A., 2010. Complete traction electric equipment sets of electro-mechanical drive trains for tractors, in: 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON). Presented at the 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), pp. 611–616. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON.2010.5555368>
- Global electric car sales have continued their strong growth in 2022 after breaking records last year - News [WWW Document], n.d. . IEA. URL <https://www.iea.org/news/global-electric-car-sales-have-continued-their-strong-growth-in-2022-after-breaking-records-last-year> (accessed 4.24.23).
- GOLDONI Keestrack B1e: il primo trattore full elettric, 2023.
- Grainews, 2012. Electric drive is on the horizon. Grainews. URL <https://www.grainews.ca/machinery/electric-drive-is-on-the-horizon/> (accessed 2.8.23).

Groeneveld, R., 2022. Celestial E-Mobility presents India's first electric tractors [WWW Document]. Future Farming. URL <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/celestial-e-mobility-presents-indias-first-electric-tractors/> (accessed 4.22.23).

Hattum, B.V., 2019. John Deere releases video of GridCON electric tractor [WWW Document]. Future Farming. URL <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/john-deere-releases-video-of-gridcon-electric-tractor/> (accessed 4.22.23).

High-efficiency motors and sustainability, 2017. . Electric Motor Engineering. URL <https://www.electricmotorengineering.com/high-efficiency-motors-and-sustainability/> (accessed 7.13.22).

How Many Teslas Are On The Road in 2022? - EarthWeb, 2022. URL <https://earthweb.com/how-many-teslas-are-on-the-road/> (accessed 7.15.22).

Hybrid tractors - a look at the future? [WWW Document], 2005. . Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/business/hybrid-tractors-a-look-at-the-future> (accessed 2.4.23).

Intervista Bravo - Carro miscelatore semovente Rotomix Elettrico, 2022.

John Deere, 2023. Electrification [WWW Document]. URL <https://www.deere.com/en/our-company/electrification/> (accessed 2.8.23).

John Deere, n.d. 6R Series Tractors.

John Deere 8R 410 now available with eAutoPowr [WWW Document], n.d. URL <https://www.deere.co.uk/en/our-company/news-and-media/press-releases/2022/news-8r410-e-autopowr.html> (accessed 2.9.23).

John Deere 6210RE promotional video, 2013.

John Deere E-Premium adds a bit of spark to 7430 and 7530 tractors [WWW Document], 2008. . Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/news/john-deere-e-premium-adds-a-bit-of-spark-to-7430-and-7530-tractors> (accessed 2.4.23).

John Deere New 6R Series by A&S Agri Services Ltd - Issuu [WWW Document], 2012. URL [https://issuu.com/tracyalexander/docs/6r\\_series\\_brochure](https://issuu.com/tracyalexander/docs/6r_series_brochure) (accessed 4.18.23).

John Deere offers new Electric Variable Transmission [WWW Document], n.d. URL <https://www.deere.com/en/news/all-news/electric-variable-transmission/> (accessed 2.10.23).

Karsten, B., 2021. Steyr develops hybrid tractor [WWW Document]. Future Farming. URL <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/steyr-develops-hybrid-tractor/> (accessed 2.13.23).

Knegt 404G2E Electric tractor [WWW Document], n.d. . Knegt - Quality Tractors Europe. URL <https://knegt-international.com/products/electric-tractors/na/knegt-404g2e-electric-tractor/> (accessed 4.22.23).

Knegt Electric Tractors, 2022.

la Repubblica.it, 2011. Il trattore va a idrogeno nella fattoria del futuro - la Repubblica.it [WWW Document]. Archivio - la Repubblica.it. URL <https://ricerca.repubblica.it/repubblica/archivio/repubblica/2011/04/05/il-trattore-va-idrogeno-nella-fattoria-del.html> (accessed 6.13.23).

Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. Environment International 30, 981–990. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>

Landini, 2022. Landini REX4 Full Hybrid è Novità Tecnica Eima 2022. Landini. URL <https://www.landini.it/landini-rex4-full-hybrid-e-novita-tecnica-eima-2022/> (accessed 4.18.23).

Lithium-ion battery, 2023. . Wikipedia.

Mocera, F., Martini, V., 2022. Numerical Performance Investigation of a Hybrid eCVT Specialized Agricultural Tractor. Applied Sciences 12, 2438. <https://doi.org/10.3390/app12052438>

Mocera, F., Soma, A., 2021. A Review of Hybrid Electric Architectures in Construction, Handling and Agriculture Machines. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99132>

Monarch Tractor Electric Tractor | MK-V Electric Tractor [WWW Document], n.d. URL <https://www.monarchtractor.com/mk-v-electric-tractor> (accessed 4.16.23).

Monarch's Agtech Solutions Expand the Utility Tractor Market [WWW Document], n.d. URL <https://www.monarchtractor.com/news/agtech-solutions-expand-utility-tractor-market> (accessed 4.23.23).

MT 625 e [WWW Document], n.d. URL <https://www.manitou.com/it-IT/le-nostre-macchine/telescopici-per-ledilizia/mt-625-e> (accessed 4.24.23).

New car registrations: +28.8% in March, battery electric 13.9% market share, 2023. . ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. URL <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-28-8-in-march-battery-electric-13-9-market-share/> (accessed 4.24.23).

- New Holland, 2009. LeafletNH2 [WWW Document]. URL [https://web.archive.org/web/20090902205513/http://agriculture.newholland.com/PublishingImages/cnhimg/we/Hydrogen/NH2\\_90014\\_INB.pdf](https://web.archive.org/web/20090902205513/http://agriculture.newholland.com/PublishingImages/cnhimg/we/Hydrogen/NH2_90014_INB.pdf) (accessed 6.13.23).
- Nexat, 2021. NEXAT wins gold medal at the DLG Innovation Award 2022.
- Nexat, n.d. The system | NEXAT. URL <https://www.nexat.de/en/the-system/> (accessed 2.13.23).
- On test JCB's debut battery-electric Loadall - the 525-60E [WWW Document], 2021. . Farmers Weekly. URL <https://www.fwi.co.uk/machinery/telehandlers/on-test-jcbs-debut-battery-electric-loadall-the-525-60e> (accessed 4.23.23).
- Paul Van Ham in Berlin 2022, 2023.
- Pessina, D., Facchinetti, D., 2009. Gemelli diversi. *Macchine Agricole* Luglio 2009, 44–51.
- Pickel P., 2019. Electricity for tractors and tractor-implement systems [WWW Document]. URL <https://www.clubofbologna.org/en/meetings-proceedings.php?ANNO=2019> (accessed 6.21.23).
- Présentation du tracteur enjambeur électrique Kremer, 2013.
- Rahe, F., Resch, R., 2017. Electrification of Agricultural Machinery From the Perspective of an Implement Manufacturer. Presented at the 9th AVL International Commercial Powertrain Conference 2017, pp. 2017-01–1935. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1935>
- Ritchie, H., Roser, M., Rosado, P., 2020. CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data.
- Schneider, A.-K., Klabunde, F., Buck, L., Ohlhoff, M., Reis, L., Olvermann, M., Kauffeld, S., Engel, B., Glatzel, G., Schröder, B., Frerichs, L., 2023. Drawing transformation pathways for making use of joint effects of food and energy production with biodiversity agriphotovoltaics and electrified agricultural machinery. *Journal of Environmental Management* 335, 117539. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117539>
- SILOKING TruckLine e.0 [WWW Document], n.d. URL <https://www.siloking.com/en/products/siloking-truckline-e-0> (accessed 3.1.23).
- Siloking-Vertriebsleiter über den elektrischen Futtermischwagen e.0 eTruck 1408, 2017.
- SIMA 2017 | Prototype JOHN DEERE Sesam - Tracteur électrique, 2017.
- SOLIS 26 Electric, 2022.

- Solis 5015 E Hybrid [WWW Document], n.d. URL <https://solis-yanmar.com/tractor/Solis-5015-e-hybrid> (accessed 4.23.23).
- Somà, A., Bruzzese, F., Mocera, F., Viglietti, E., 2016. Hybridization Factor and Performance of Hybrid Electric Telehandler Vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications* 52, 5130–5138. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2595504>
- Sonalika Tiger Electric Tractor, 2020.
- Spencer, J., 2016. X Concept tractor by Fendt [WWW Document]. *Farmer's Weekly*. URL <https://www.farmersweekly.co.za/agri-technology/machinery-and-equipment/x-concept-tractor-by-fendt/> (accessed 2.8.23).
- Stepless diventa elettrica: TRASMISSIONE eAutoPowr I JOHN DEERE, 2022.
- STEYR, n.d. STEYR HYBRID DRIVETRAIN KONZEPT TOP-EFFICIENCY AHEAD [WWW Document]. URL <https://www.steyr-traktoren.com/en-distributor/agriculture/technologie/steyr-hybrid-drivetrain-konzept> (accessed 2.13.23).
- Stoss, K.J., Shi, B., Sobotzik, J., Kreis, E.R., 2013. Tractor Power for Implement Operation—Mechanical, Hydraulic, and Electrical: An Overview.
- Technische Universität Dresden, n.d. Rigitrac EWD120.
- Tractorum.it, n.d. John Deere 7530 E-Premium [WWW Document]. URL <https://tractorum.it/119-john-deere-7530-e-premium?showall=1> (accessed 4.2.23).
- Troncon, D., Alberti, L., Mattetti, M., 2019. A Feasibility Study for Agriculture Tractors Electrification: Duty Cycles Simulation and Consumption Comparison, in: 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Presented at the 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2019.8790502>
- Uniport Planter 500 [WWW Document], n.d. . Jacto. URL <https://jacto.com/northamerica/products/planter/uniport-planter-500> (accessed 2.13.23).
- Wilson, K., 2018. Belarus goes electric [WWW Document]. *Farm Weekly*. URL <https://www.farmweekly.com.au/story/5670924/belarus-goes-electric/> (accessed 7.16.22).
- World Ag Expo, 2021. URL <https://www.worldagexpo.com/the-first-hummingbird-dev-all-electric-vehicle-to-vehicle-charging-tender-truck-arrives-in-the-san-joaquin-valley/> (accessed 4.18.23).

## RINGRAZIAMENTI

*Ringrazio la mia famiglia che mi ha sempre dato la possibilità di studiare e di viaggiare. Ringrazio in particolare il nonno Luigi che mi ha trasmesso la passione per l'Agricoltura*