

# ELETTRIFICAZIONE OFF-HIGHWAY: APPLICAZIONI E PROSPETTIVE DEI MACCHINARI E VEICOLI AGRICOLI

In collaborazione con:

MASTER   
II LIVELLO  
MOBILITÀ ELETTRICA  
E ECONOMIA CIRCOLARE

# Chi siamo

**Motus-E** è l'associazione italiana costituita su impulso dei principali operatori **industriali** dei settori **automotive** ed **energia** e del **mondo accademico** per favorire la transizione energetica nel mondo dei trasporti, promuovendo la mobilità elettrica e divulgandone i **benefici economici, sociali e ambientali**. L'associazione riunisce oggi **oltre 100** tra associati e partner lungo l'intera catena del valore della e-mobility e rappresenta il più autorevole **interlocutore** del comparto per le **istituzioni** a tutti i livelli.

Il presente studio nasce come tesi del **Master di II livello in Mobilità Elettrica ed Economia Circolare - MEEC dell'Università della Calabria**, un percorso dedicato all'e-mobility e ai nuovi modelli di sostenibilità. L'elaborato rappresenta l'applicazione pratica delle competenze sviluppate durante il master e approfondisce un ambito ancora poco esplorato, ovvero l'eletttrificazione dei mezzi agricoli.

Grazie al contributo congiunto di Motus-E e del master MEEC, il lavoro offre una **visione integrata del potenziale dell'eletttrificazione nel settore agricolo** e delle condizioni necessarie per favorirne la diffusione. Lo studio intende **colmare il divario informativo attualmente presente e fornire elementi utili a istituzioni, imprese e operatori** che guardano a una trasformazione sostenibile della meccanizzazione agricola.

Si ringrazia inoltre **Omnitrattore**, testata di **riferimento** nel comparto agricolo, per il **prezioso contributo** offerto in diverse fasi dello studio. La collaborazione ha consentito di approfondire le **caratteristiche del mercato** e di individuare i principali **trend tecnologici** e le più recenti **evoluzioni** del settore.

# Co-Autore dello studio



**Ezequiel Rodriguez Thomas** è laureato in Scienze Economiche presso l'Università La Sapienza di Roma e ha successivamente intrapreso il **Master di II livello in Mobilità Elettrica ed Economia Circolare (MEEC)** presso l'Università della Calabria. Il suo percorso formativo si è focalizzato sui temi della sostenibilità, della transizione energetica e dell'innovazione tecnologica.

Il presente studio è stato sviluppato nell'ambito della **collaborazione** tra **Motus-E** e il **Master MEEC**, con l'obiettivo di analizzare le prospettive di **elettificazione dei mezzi off-highway** nel settore agricolo e il loro **contributo** ai processi di decarbonizzazione e modernizzazione del **settore primario**.

La ricerca è stata condotta attraverso un **approccio integrato**, che ha combinato **analisi della letteratura** scientifica e di settore, **approfondimenti tecnici** e **confronto diretto** con operatori della filiera. In particolare, lo studio ha beneficiato del contributo di **Omnitrattore** e del confronto con esperti di aziende del

Settore quali **ABB E-mobility**, **Bonfiglioli** e **CNH Industrial**, consentendo di validare i risultati ottenuti e di individuare i principali **trend tecnologici** del settore.

L'analisi è stata inoltre supportata da **approfondimenti sviluppati ad hoc**, volti a integrare le evidenze della letteratura con una lettura applicativa del **contesto operativo**, con particolare attenzione alle **dinamiche di adozione** delle soluzioni elettriche nel settore agricolo.

Nel complesso, il lavoro propone una **lettura sistemica** dell'elettificazione in ambito agricolo, evidenziandone il **ruolo nella transizione** verso modelli produttivi più sostenibili e innovativi.

# Executive Summary

La **transizione energetica** dell'agricoltura rappresenta una **leva strategica** per il raggiungimento degli **obiettivi climatici** europei e nazionali, il rafforzamento della **competitività** e la **modernizzazione** delle aree rurali. In questo contesto, l'elettrificazione dei mezzi impiegati in ambito agricolo si configura come una direttrice di **innovazione ad alto potenziale**, ancora in **fase iniziale** rispetto ad altri segmenti della mobilità, ma già capace di generare **benefici ambientali, economici e industriali** lungo la filiera.

Il settore agricolo italiano, tra i principali in Europa per valore aggiunto, dispone di un **parco macchine prevalentemente diesel**, con **elevata età media** e ampi margini di miglioramento in termini di efficienza energetica ed emissioni. L'introduzione progressiva di macchinari e trattori elettrici consente di **ridurre l'uso diretto di combustibili fossili, contenere le emissioni climalteranti e migliorare le prestazioni** operative, favorendo l'integrazione con **digitalizzazione, automazione e agricoltura di precisione**.

Lo studio analizza lo stato dell'arte dell'elettrificazione dei mezzi impiegati in ambito agricolo, esaminandone **applicazioni**, soluzioni tecnologiche e **tendenze evolutive** a livello internazionale, con particolare attenzione al **contesto italiano**, e approfondisce l'integrazione tra mezzi elettrici, infrastrutture di ricarica rurali e sistemi di produzione e accumulo dell'energia.

Le soluzioni attualmente disponibili trovano applicazione soprattutto nei segmenti a **bassa e media potenza** e nelle lavorazioni svolte in **prossimità del centro**

**aziendale**, dove l'elettrificazione consente maggiore **precisione** nei sistemi di trazione e controllo e contribuisce alla **riduzione delle emissioni** locali.

Sul **piano economico**, a fronte di un investimento iniziale più elevato, la **riduzione dei costi operativi** legati all'energia e alla manutenzione può generare **competitività nel medio periodo**, soprattutto nei casi di utilizzo intensivo e programmabile. La convenienza dipende dalle ore annue di impiego, dal costo dell'energia e dall'organizzazione delle lavorazioni.

Le modalità di **ricarica** costituiscono un elemento distintivo rispetto alla mobilità stradale. L'operatività in **contesti privati** e la **pianificazione dei cicli di lavoro** favoriscono **soluzioni dedicate**, pur richiedendo **adeguamenti infrastrutturali** che rappresentano una delle principali sfide per la diffusione su larga scala.

Permangono **criticità tecnologiche e operative** legate all'autonomia energetica, alla gestione dei fabbisogni di potenza più elevati e all'adattamento delle infrastrutture aziendali. Nel complesso, l'elettrificazione dei mezzi agricoli non rappresenta una soluzione universale, ma una **traiettoria evolutiva graduale**, capace di contribuire alla riduzione delle emissioni e all'innovazione del settore primario. Il suo sviluppo richiede **politiche** coerenti che accompagnino **investimenti, sperimentazione** e **sviluppo** infrastrutturale, favorendo una **trasformazione strutturale e sostenibile** dell'agricoltura italiana.

# Call to Action

L'**elettrificazione** dei mezzi agricoli rappresenta una **leva strategica** per la **transizione energetica** e la **modernizzazione** del settore primario. In un contesto di crescente pressione ambientale ed economica, queste soluzioni offrono l'opportunità di ridurre le emissioni, migliorare l'efficienza dei processi produttivi e favorire una maggiore **integrazione tra agricoltura ed energia** rinnovabile.

Perché tale **potenziale** possa esprimersi pienamente, l'elettrificazione dell'agricoltura deve essere riconosciuta come **parte integrante delle politiche** sulla mobilità elettrica e sulla transizione ecologica. È necessario un quadro di **intervento coordinato** che tenga conto delle specificità operative ed economiche del settore agricolo.

Le azioni proposte mirano a **migliorare le condizioni abilitanti** affinché i mezzi agricoli elettrici possano passare da soluzioni sperimentali a strumenti strutturali per **la competitività, la sostenibilità e l'innovazione del sistema agricolo italiano**.

- Inserimento esplicito dei mezzi agricoli elettrici nei **piani nazionali di decarbonizzazione**.
- **Integrazione tra incentivi** alla modernizzazione agricola e transizione energetica, collegando acquisto del mezzo elettrico, infrastruttura di ricarica aziendale, impianti di fonti rinnovabili e sistemi di accumulo energetico.
- **Integrazione degli strumenti fiscali disponibili** (ammortamento, credito d'imposta, ecc.) per ridurre il **gap di CAPEX** iniziale tra elettrico e mezzo tradizionale.
- **Sviluppo di modelli di ricarica** per mezzi agricoli progettati sulle esigenze dei **contesti rurali**.
- **Promozione del dialogo** strutturato e continuativo tra associazioni agricole, costruttori e attori della filiera della mobilità elettrica.
- **Raccolta sistematica di dati reali di utilizzo** (cicli di lavoro, stagionalità, consumi, carichi operativi, ecc.).
- **Supporto a progetti di sperimentazione** su agricoltura di precisione, automazione e robotica, abilitate dall'elettrificazione.
- **Supporto alla diffusione di conoscenza tecnica** verso imprese agricole, contoterzisti e professionisti del settore.

# Indice

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>QUADRO NORMATIVO E STRATEGICO</b>	<b>2</b>
<b>TENDENZE INTERNAZIONALI NELL'ELETTTRIFICAZIONE</b>	<b>3</b>
<b>CONTESTO ITALIANO DELL'ELETTTRIFICAZIONE</b>	<b>4</b>
<b>INFRASTRUTTURE DI RICARICA E FILIERA ENERGETICA</b>	<b>5</b>
<b>BENEFICI DELL'ADOZIONE</b>	<b>6</b>
<b>FATTORI CRITICI DELL'ADOZIONE</b>	<b>7</b>
<b>OPPORTUNITÀ PER L'ITALIA</b>	<b>8</b>
<b>CONSIDERAZIONI FINALI</b>	<b>9</b>

# INTRODUZIONE

# 1



# Introduzione

La **sostenibilità** e la **transizione energetica** rappresentano oggi temi centrali per lo **sviluppo economico** europeo. L'agricoltura, considerata un pilastro della **sicurezza alimentare** e della gestione delle risorse naturali, si trova oggi al centro di un processo di profonda **trasformazione** che coinvolge **la produzione, la logistica e l'innovazione tecnologica**. Come rilevato dalla FAO, il futuro dei **sistemi agricoli** dipenderà dalla loro capacità di integrare innovazione tecnologica e sostenibilità, migliorando l'efficienza delle **risorse** senza compromettere la **redditività**.

A livello dell'Unione Europea, l'agricoltura rappresenta un comparto economico di rilievo, con una dimensione produttiva significativa e un **ruolo strutturale** nei sistemi territoriali. L'agricoltura europea impiega milioni di addetti e continua a svolgere una **funzione economica e sociale** rilevante, sostenuta da una dinamica di **investimenti** orientata al rinnovamento del **capitale produttivo**. Nel complesso, il settore si inserisce in un percorso di **trasformazione strutturale** in cui l'innovazione tecnologica e l'evoluzione dei sistemi di **meccanizzazione** assumono un ruolo crescente.

Valore Produzione  
Agricola UE 27



532 miliardi di €

Valore Aggiunto  
Lordo



234 miliardi di €



Oltre 9 milioni di  
addetti

La crescente attenzione verso la **riduzione dell'impatto** ambientale del settore agricolo ha messo in evidenza l'importanza delle **tecnologie a supporto dei processi produttivi**. L'innovazione nel settore agricolo è chiamata a svolgere un ruolo chiave non solo nella mitigazione dei cambiamenti climatici, ma anche nel miglioramento dell'efficienza energetica e nella **tutela della qualità ambientale**. In questo scenario, la **modernizzazione** del parco **macchine agricole** rappresenta un passaggio strategico per promuovere un **modello produttivo** più sostenibile, efficiente e in linea con gli obiettivi della **transizione ecologica**.



# Introduzione

La **filiera della fabbricazione** di macchine agricole e per la silvicoltura rappresenta un segmento industriale significativo all'interno dell'industria **meccanica europea**, con **impatti economici** quantificabili a livello di produzione, occupazione e valore aggiunto.



Oltre 7.000  
produttori in  
Europa



Oltre 450 tipologie di  
macchine

Fatturato  
Aggregato Annuo



40 miliardi di €



Oltre 150.000  
addetti diretti

Il settore dei mezzi agricoli è ancora **dominato da veicoli diesel**, la cui **età media elevata** incide negativamente sui costi di gestione, sull'efficienza operativa e sull'impatto ambientale delle aziende agricole. L'introduzione e la diffusione di **mezzi agricoli elettrici** come trattori, macchine telescopiche e mini-pale, rappresenta una **leva cruciale** per accelerare la **transizione ecologica** dell'agricoltura, riducendo le emissioni climalteranti, migliorando la sostenibilità complessiva e **rafforzando la competitività** del sistema agricolo nazionale.

Nel contesto della transizione ecologica e digitale promossa a livello europeo e nazionale, l'elettrificazione dei mezzi agricoli emerge come una traiettoria di **innovazione del comparto**, anche se ancora poco esplorata in Italia rispetto ad altri settori della **mobilità**. L'evoluzione recente del dibattito scientifico e industriale mostra infatti un **crescente interesse** verso la riduzione della dipendenza dai carburanti fossili, la maggiore integrazione con le fonti rinnovabili e **l'efficienza complessiva** dei sistemi produttivi agricoli.

Proprio da queste dinamiche nasce la **motivazione del presente studio**. Il documento intende **rispondere a una necessità conoscitiva** crescente: comprendere in che misura l'elettrificazione dei macchinari e veicoli impiegati in ambito agricolo possa inserirsi nei **processi di modernizzazione e decarbonizzazione dell'agricoltura**, individuando opportunità, limiti e condizioni abilitanti.



# Introduzione

## Oggetto dello studio

Lo studio si focalizza sui veicoli e macchinari semoventi full-electric che operano in ambito agricolo e forestale, includendo trattori, macchine agricole e di movimento terra, classificate come NRMM (Non Road Mobile Machinery), e robot autonomi mobili (AMR). L'obiettivo è fornire una visione organica dell'evoluzione tecnologica, dei casi d'impiego e delle prospettive di diffusione delle piattaforme di lavoro elettrificate.

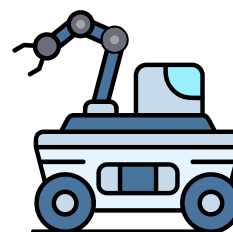
### Sono considerate tre famiglie tecnologiche



**Trattori elettrici  
agricoli e  
forestali**



**Macchine operatrici  
semoventi (NRMM)**



**Robot  
Autonomi  
Mobili AMR**

- **Trattori elettrici agricoli e forestali**, disciplinati dal Regolamento (UE) 167/2013 ("Mother Regulation"), che copre le categorie T e C.
- **Macchine agricole e macchine movimento terra destinate all'impiego in ambito agricolo**, entrambe full-electric, semoventi e rientranti nella categoria delle NRMM (Non-Road Mobile Machinery), tra cui carri miscelatori, escavatori, pale, sollevatori telescopici e altre macchine mobili non stradali. Il perimetro di analisi è coerente con il quadro normativo europeo di riferimento per le NRMM, definito dal Regolamento (UE) 2016/1628 ("Stage V"), assunto come contesto regolatorio generale, pur non essendo direttamente applicabile alle soluzioni full-electric in termini di limiti emissivi.
- **Robot autonomi mobili (AMR)**, comprendenti veicoli autonomi o semi-autonomi utilizzati per operazioni di campo, monitoraggio, trattamenti localizzati, movimentazione leggera e compiti ripetitivi di precisione. Questi sistemi, pur non ricadendo ancora in un quadro normativo unificato, rappresentano una componente emergente della meccanizzazione agricola elettrificata e sono pertanto considerati, ai fini dello studio, come una tipologia di veicolo a pieno titolo.

**Sono invece esclusi dall'analisi:** le motorizzazioni ibride, veicoli alimentati ad idrogeno, gli impianti operativi fissi, i sistemi stazionari di automazione, i robot industriali non mobili, i droni e in generale tutte le attrezzature che non possiedono caratteristiche assimilabili a un veicolo terrestre.

# QUADRO NORMATIVO E STRATEGICO

# 2



# Quadro di riferimento normativo e strategico

La transizione verso la **mobilità elettrica agricola** avviene all'interno delle **strategie europee di decarbonizzazione**, che richiedono una progressiva riduzione dell'impatto ambientale delle attività agricole. In questo contesto, il quadro normativo non rappresenta un semplice **insieme di regole tecniche**, ma uno **strumento** che indirizza l'evoluzione dei veicoli e stimola l'adozione di tecnologie a minore intensità emissiva.

Il sistema di norme oggi in vigore per le macchine mobili non stradali (NRMM) e per i veicoli agricoli elettrificati comprende **requisiti** su **emissioni**, **sicurezza** delle macchine, **efficienza** energetica, **digitalizzazione** e gestione del **ciclo di vita** delle batterie. Questi elementi agiscono in modo integrato e condizionano sia le **scelte progettuali** dei costruttori sia le **valutazioni** economiche delle aziende agricole, influenzando l'intero percorso di **sviluppo e adozione** dei mezzi elettrici.

Il risultato è un **contesto normativo** che non riguarda un singolo ambito, ma un **sistema coordinato** di misure che regolano **l'impatto** ambientale dei motori, **l'efficienza** energetica, **l'interoperabilità** dei sistemi elettronici, la **disponibilità** delle infrastrutture di ricarica e la **sostenibilità** del ciclo di vita delle tecnologie elettriche. È all'interno di questo insieme di obblighi e opportunità che si colloca **l'evoluzione** dei mezzi agricoli elettrici in Europa.



# Quadro di riferimento normativo e strategico

Il riferimento normativo e strategico è stato selezionato con cura per concentrarsi su aspetti essenziali, così da **mettere in relazione in modo chiaro le scelte progettuali e operative con gli obblighi di conformità**.

## COM (2021) 550 Final Pacchetto "Fit for 55"

Rende più stringenti gli obiettivi di riduzione per i settori non ETS come agricoltura e trasporti su strada tramite la revisione dell'Effort Sharing Regulation e il rafforzamento del quadro LULUCF. Per l'Italia ciò significa una riduzione ESR al 2030 pari al 43,7 per cento rispetto al 2005 e un obiettivo LULUCF al 2030 di assorbimenti pari a 35,8 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente. In questo contesto l'elettificazione dei mezzi agricoli è una leva concreta per tagliare i consumi fossili aziendali, contribuire ai traguardi nazionali e valorizzare l'integrazione con rinnovabili e ricarica intelligente in azienda.

## Direttiva (UE) 2024/2881

Fissa standard vincolanti di qualità dell'aria che Regioni e Comuni devono conseguire con piani e misure locali. Pur non disciplinando i macchinari agricoli, questa cornice incide indirettamente sul settore: in aree con superamenti di NO<sub>2</sub> e PM, le amministrazioni possono orientare incentivi, bandi e limitazioni d'uso verso soluzioni a minore impatto. In questo contesto, l'elettificazione dei mezzi agricoli diventa uno strumento pratico per ridurre le emissioni diffuse, agevolare l'operatività in zone sensibili e allineare le aziende agli obiettivi locali di qualità dell'aria.

## Regolamento (UE) 167/2013 ("Mother Regulation")

È la base per l'omologazione UE e la vigilanza del mercato di trattori e mezzi agricoli (categorie T, C, R, S) e dei loro sistemi e componenti. Definisce campo di applicazione, procedure e modelli documentali unificati in tutta l'UE, sostituendo i regimi nazionali e garantendo il riconoscimento reciproco delle approvazioni. Pur essendo una norma tecnologicamente neutrale rispetto al tipo di alimentazione, il regolamento è oggi utilizzato come quadro di riferimento per l'introduzione delle architetture elettriche, poiché stabilisce le condizioni strutturali entro cui devono operare le macchine e i limiti di sicurezza ai quali devono conformarsi i componenti elettrici ed elettronici integrati nei trattori di nuova generazione.

## Regolamento (UE) 2016/1628 ("Stage V")

Stabilisce i limiti alle emissioni dei motori destinati alle macchine mobili non stradali, inclusi i macchinari agricoli. Estende la copertura a quasi tutte le classi di potenza e introduce valori più stringenti per NO<sub>x</sub>, PM e numero di particelle, oltre a requisiti rafforzati di durabilità, conformità in esercizio e fasi di transizione per l'immissione sul mercato. I mezzi con trazione esclusivamente elettrica non sono soggetti ai limiti allo scarico previsti dallo Stage V; tuttavia, il regolamento costituisce un riferimento normativo di contesto per l'analisi delle NRMM e agisce come fattore abilitante indiretto della transizione, perché innalza la complessità tecnica ed economica dei motori termici e rende più competitive, quando tecnicamente praticabile, le soluzioni full-electric nei profili d'uso compatibili.

# Quadro di riferimento normativo e strategico

Regolamento (UE)  
2025/14  
(Omologazione  
armonizzata NRMM  
circolanti su strade  
pubbliche)

Introduce un quadro unico di omologazione a livello europeo per le macchine mobili non stradali che circolano occasionalmente su strade pubbliche, ad esempio per spostarsi tra appezzamenti, raggiungere l'azienda, l'officina o i punti di rifornimento e ricarica. In precedenza, tali spostamenti non erano regolati in modo armonizzato nell'Unione, con differenze significative tra Stati membri: alcuni richiedevano l'immatricolazione, altri no. Per il settore agricolo, il nuovo regolamento comporta procedure più chiare e uniformi per l'immissione sul mercato e l'utilizzo delle macchine semoventi, con riferimenti tecnici coerenti anche in materia di requisiti elettrici, alta tensione, compatibilità elettromagnetica e sicurezza funzionale. Il regolamento è entrato in vigore nel gennaio 2025, ma si applicherà pienamente a partire dal 29 gennaio 2028, prevedendo un periodo transitorio che consente ai costruttori e agli Stati membri di adeguare progressivamente progettazione, omologazione e infrastrutture.

Regolamento (UE)  
2023/1230  
("Regolamento  
Macchine")

Sostituisce la Direttiva 2006/42/CE e, dal 20 gennaio 2027, diventa direttamente applicabile in tutti gli Stati membri. Per i macchinari agricoli semoventi elettrici è lo standard di riferimento orizzontale per gli aspetti non coperti dall'omologazione veicolistica (es. dove non si applica il Reg. 167/2013 o per requisiti di sicurezza della macchina). Introduce requisiti essenziali rafforzati su: rischi elettrici/alta tensione ed energia residua (batterie, condensatori, sezionamento e interlock), sicurezza funzionale dei controlli (incluso software), cybersicurezza e gestione degli aggiornamenti/OTA, informazioni e istruzioni digitali, marcatura CE e responsabilità di fabbricante/importatore/distributore. Prevede inoltre categorie di macchine ad alto rischio con valutazione di conformità da terza parte.

Regolamento (UE)  
2023/1804 "AFIR -  
Alternative Fuels  
Infrastructure  
Regulation"

Sostituisce la normativa AFID (Alternative Fuels Infrastructure Directive) e fissa obblighi vincolanti per la diffusione di infrastrutture di ricarica pubbliche, con requisiti su copertura lungo le reti TEN-T, potenze minime aggregate, interoperabilità, trasparenza dei prezzi e pagamenti ad accesso aperto. Queste regole migliorano l'ecosistema di ricarica anche per l'agro-meccanica elettrificata: contoterzisti e aziende che spostano macchine su gomma (trasporto su pianali, flotte di supporto, utility) trovano corridoi con potenze adeguate, mentre nei territori rurali la spinta all'interoperabilità e alle informazioni in tempo reale (prezzi, disponibilità, ecc.) eleva la qualità dei servizi di ricarica aperti al pubblico e favorisce modelli ibridi pubblico/privato on-farm integrati con fonti rinnovabili, sistemi di accumulo e ricarica intelligente. In sintesi, AFIR è il "tessuto connettivo" infrastrutturale che rende più praticabile l'elettrificazione operativa della filiera agricola fuori dall'azienda e nei nodi di territorio.

# Quadro di riferimento normativo e strategico

## Regolamento (UE) 2023/1542 "Battery Regulation"

Disciplina l'intero ciclo di vita delle batterie usate tra l'altro sui macchinari agricoli elettrici/ibridi (in genere classificate come batterie industriali). Introduce requisiti su sicurezza e prestazioni, impronta di carbonio, contenuto minimo di materiali riciclati, tracciabilità tramite battery passport digitale, etichettatura e obblighi di raccolta/riciclo a fine vita. Per il settore agricolo questo si traduce in scelte d'acquisto più trasparenti (dati comparabili su qualità e sostenibilità), maggiore conformità lungo la supply chain, riduzione dei rischi operativi (manutenzione e gestione termica), e nuove opportunità di second life delle batterie come storage stazionario in azienda (integrazione con fotovoltaico e ricarica intelligente). In pratica, la norma impatta costi, specifiche tecniche e responsabilità dei produttori/utenti, rendendo l'elettrificazione dei mezzi agricoli più misurabile, sicura e circolare.

## Regolamento (UE) 2024/2847 "CRA – Cyber Resilience Act"

Estende requisiti di cybersicurezza a ogni "prodotto con elementi digitali" immesso sul mercato UE: quindi centraline, BMS, telematica, software di bordo e dispositivi connessi dei macchinari e delle loro attrezzature. Impone progettazione sicura lungo l'intero ciclo di vita, gestione e segnalazione delle vulnerabilità, aggiornamenti di sicurezza, documentazione tecnica (inclusa la SBOM) e marcatura CE che attesta la conformità; gli obblighi principali si applicano dal dicembre 2027. Per costruttori e fornitori della filiera agro-meccanica significa integrare processi di sicurezza by-design, garantire supporto e patch per i sistemi connessi dei mezzi elettrici e ridurre il rischio operativo e regolatorio nelle aziende agricole che li impiegano.

Questo quadro normativo fornisce una base solida per le **decisioni tecniche** e gli **investimenti**, riducendo l'incertezza e accelerando i **tempi di attuazione**. La maggiore chiarezza degli adempimenti agevola la **progettazione** dei mezzi e la **pianificazione** delle **infrastrutture** di supporto, sia a livello aziendale sia territoriale. In questo contesto, diventa più semplice valutare costi, benefici e priorità, definendo in modo più preciso **ruoli e responsabilità** lungo la filiera.

Grazie a condizioni di riferimento più stabili e coerenti, l'elettrificazione può ora **evolvere dalla fase sperimentale a quella industriale**.

# TENDENZE INTERNAZIONALI NELL'ELETRIFICAZIONE

# 3



# Tendenze internazionali nell'elettrificazione dei mezzi agricoli

L'elettrificazione dei macchinari agricoli semoventi rappresenta una delle più significative **trasformazioni** tecnologiche della **meccanizzazione** contemporanea. Essa si colloca al crocevia tra la **decarbonizzazione** del comparto primario, la **digitalizzazione** delle attività agricole e la crescente esigenza di **efficienza energetica e operativa**. Il percorso di **transizione** verso i mezzi full-electric sta progressivamente spostando il baricentro dell'innovazione dal motore endotermico verso **architetture mecatroniche, modulari e digitali**, capaci di integrare fonti rinnovabili, sistemi di accumulo e logiche di controllo avanzate.

L'elettrificazione **non procede con la stessa intensità in tutti i Paesi**. I mercati dell'**Europa occidentale**, degli **Stati Uniti** e del **Giappone** mostrano un livello di maturità superiore rispetto a quelli emergenti, grazie alla presenza di **produttori pionieri** e alla maggiore disponibilità di **infrastrutture energetiche** avanzate. Tuttavia, anche in Europa il processo rimane concentrato nei **segmenti leggeri e compatti**, dove l'autonomia richiesta e le potenze in gioco sono **compatibili con la tecnologia attuale** delle batterie.

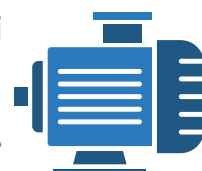
Il passaggio alla trazione elettrica rappresenta un vero **cambiamento di paradigma**. I macchinari agricoli non sono più concepiti come semplici generatori di forza meccanica, ma come **nodi energetici intelligenti** in grado di interagire con la rete elettrica, i sistemi aziendali e le infrastrutture digitali. In questo scenario **l'Europa** si distingue come una delle aree più dinamiche, grazie a un ecosistema industriale che unisce **produttori** di trattori e macchinari, costruttori di componentistica e **istituti di ricerca** impegnati nello sviluppo di una nuova generazione di mezzi agricoli a **zero emissioni**.





## FOCUS: ARCHITETTURE E COMPONENTI

I macchinari analizzati in questo studio adottano **architetture di trazione completamente elettriche**, in cui l'energia è fornita da un **pacco batterie**, generalmente agli ioni di litio, e convertita in potenza meccanica tramite uno o più **motori elettrici**, prevalentemente sincroni a magneti permanenti (PMSM) oppure asincroni trifase.



Le configurazioni più diffuse prevedono un **motore elettrico centrale** accoppiato a una **trasmissione semplificata**, oppure soluzioni con **motori elettrici distribuiti** sugli assi o sulle ruote, con **gestione elettronica** del differenziale e del controllo di coppia, che favoriscono precisione di comando e integrazione con **sistemi digitali**.



Rispetto ai powertrain tradizionali, le soluzioni full-electric **riducono la complessità** dei sistemi meccanici e idraulici. **L'idraulica** rimane un elemento essenziale per l'azionamento degli attrezzi, ma la sua alimentazione risulta **svincolata dal regime del motore di trazione**, con benefici in termini di **efficienza e controllo**.



I sistemi di trazione elettrica **garantiscono coppia elevata** e immediatamente disponibile **a bassi regimi**, risultando particolarmente adatti alle lavorazioni di precisione. La capacità dei **pacchi batteria** installati nei modelli oggi disponibili varia indicativamente **da 10 a 120 kWh**, con **tensioni** di esercizio comprese tra **48 e 700 V**.



Un ulteriore elemento distintivo riguarda i **livelli di tensione** adottati. Dal punto di vista della **sicurezza elettrica**, si distinguono sistemi a bassa tensione (**Low Voltage - LV**), **fino a 60 V**, e sistemi ad alta tensione (**High Voltage - HV**). Le soluzioni LV presentano **requisiti di isolamento** più semplici e **costi inferiori**, ma consentono **potenze limitate**, generalmente nell'ordine di 20-30 kW, risultando adatte a macchine compatte. Le architetture HV permettono invece di gestire potenze più elevate e una maggiore efficienza complessiva, a fronte di **requisiti di sicurezza e complessità di sistema** più stringenti. La scelta del livello di tensione rappresenta quindi un compromesso tra **prestazioni, classe del mezzo e sostenibilità economica**.



Nel complesso, **l'efficienza del sistema** di trazione elettrica può superare il **90%**, contribuendo a una **riduzione dei costi operativi** e della manutenzione **stimata tra il 30 e il 40%** rispetto alle soluzioni endotermiche convenzionali, nei **contesti applicativi più idonei** all'elettrificazione.



# Motivazioni dell'elettrificazione

La diffusione dei mezzi full-electric è sostenuta principalmente da motivazioni **ambientali, regolamentari e tecnologiche**, anche se il **settore agricolo** mostra un ritardo rispetto ad altri comparti di mobilità. Le **principali motivazioni individuate** sono:

Ricerca di maggiore sostenibilità del settore agricolo



La transizione verso mezzi elettrici è vista come un passo necessario per **ridurre l'impatto ambientale** complessivo delle **pratiche agricole**, in particolare per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico e la dipendenza energetica dai combustibili fossili.

Riduzione del consumo di combustibili fossili e delle emissioni climalteranti



La spinta verso soluzioni elettriche nasce dalla necessità di **ridurre il consumo di carburanti fossili** e le **emissioni di gas a effetto serra**, in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo e con la **strategia UE** per una **mobilità sostenibile** e intelligente.

Conformità a normative ambientali sempre più stringenti



I **regolamenti europei** (es. Stage V per i motori delle NRMM) incentivano il passaggio a **mezzi a basse o zero emissioni** attraverso strumenti finanziari e politiche di sostegno.

Innovazione tecnologica e disponibilità di nuove soluzioni elettriche



I progressi nei sistemi di **propulsione elettrica** e nelle **batterie** stanno **rendendo più realistico l'impiego** di soluzioni full-electric almeno per mezzi compatti e per attività leggere.



# Funzionalità e mansioni elettrificabili

Le applicazioni oggi effettivamente elettrificate si concentrano prevalentemente in **contesti operativi a potenza contenuta**, caratterizzati da **cicli di lavoro brevi e prevedibili, autonomia limitata ma adeguata** alle esigenze operative, svolgimento delle **attività in aree circoscritte** e possibilità di **ricarica programmata** presso il centro aziendale. In questo ambito, il grado di maturità delle soluzioni full-electric varia sensibilmente in funzione della tipologia di macchina e del profilo di utilizzo.

Nel segmento delle **macchine operatrici semoventi a potenza limitata** (ad esempio mini-escavatori, mini-pale e terne compatte), destinate soprattutto a impieghi in aree urbane o periurbane, sono **già disponibili sul mercato** diverse soluzioni full-electric. In questi casi, i **cicli di lavoro** risultano relativamente standardizzati e **compatibili con le autonomie** oggi garantite dalle batterie, anche grazie alla possibilità di ricarica durante le pause operative **senza impatti significativi sulla produttività**.



In ambito agricolo, e in particolare nel **segmento dei trattori**, la **diffusione** di macchine full-electric è invece **più ridotta**. I modelli oggi disponibili sono caratterizzati da **potenze contenute, prezzi d'acquisto elevati** e sono prevalentemente destinati alle categorie compatti, specializzati e utility, con **impiego in operazioni non continuative**. Anche la disponibilità di **attrezzature elettrificate** risulta ancora in **fase iniziale**, rappresentando un ulteriore vincolo all'adozione su larga scala.



# Le principali funzionalità oggi elettrificate comprendono:

**Trazione e spostamento** in terreni agricoli destinati prevalentemente ad attività frutticole, orticole e viticole

**Azionamento elettrico della presa di potenza (PTO) e degli attrezzi connessi**, in sostituzione parziale dei sistemi meccanici e idraulici alimentati tradizionalmente dai motori endotermici

**Sollevamento e movimentazione del carico**, attraverso attuatori elettrici o sistemi elettroidraulici

**Sistemi ausiliari di bordo**, come ventilazione, climatizzazione, pompe, illuminazione, compressori, sensori e unità di controllo elettroniche già oggi completamente elettrificate e ottimizzate in base al carico

**Controllo di precisione degli attrezzi**, grazie a motori elettrici integrati e all'integrazione con sistemi digitali, GPS e ISOBUS

**Ricarica rigenerativa**, ottenuta in frenata, durante le decelerazioni o le fasi passive del ciclo operativo



# Le principali mansioni agricole oggi compatibili con le soluzioni full-electric

Le mansioni agricole oggi compatibili con soluzioni full-electric sono numerose, ma risultano prevalentemente circoscritte a operazioni caratterizzate da **fabbisogni energetici medio-bassi, cicli di lavoro regolari e prevedibili e svolgimento delle attività in prossimità delle infrastrutture aziendali**. Le attuali limitazioni di applicazione non sono riconducibili a una scarsa maturità dei sistemi di trazione elettrica, bensì ai **vincoli ancora presenti in termini di densità energetica delle batterie** e di autonomia richiesta nelle lavorazioni continuative e ad alto carico.

**Operazioni di raccolta, movimentazione e logistica interna,** sia in campo aperto sia in ambienti protetti (serre, vivai, magazzini aziendali, ecc.)



**Lavorazioni leggere del terreno e gestione delle colture specializzate,** incluse le attività interfilari e di supporto alle operazioni colturali



**Attività di supporto alla zootecnia** anche in contesti indoor, quali gestione delle stalle, movimentazione dei mangimi e pulizia degli ambienti



# Le principali mansioni agricole oggi compatibili con le soluzioni full-electric

**Trattamenti e operazioni agronomiche di precisione**, come trattamenti fitosanitari localizzati, sfogliatura e potatura assistita



**Servizi aziendali e para-agricoli a bassa intensità energetica**, comprendenti manutenzione del verde, gestione del territorio e utilizzo di robot agricoli elettrici per operazioni mirate



**Servizi di logistica aziendale**, traino di piccoli rimorchi e gestione di micro attrezzature elettriche



Rimangono invece ancora **non pienamente elettrificabili** le **lavorazioni estensive e ad alto carico meccanico**, come l'aratura profonda, la trebbiatura o il traino di attrezzature di grandi dimensioni. In questi casi, **la variabilità e la scarsa standardizzazione dei cicli di lavoro dei trattori** agricoli, solo parzialmente rappresentata dai cicli di prova di riferimento (ad esempio i cicli DLG), **rende complessa l'adozione di soluzioni full-electric** basate esclusivamente su batterie. Per tali applicazioni, l'attenzione dei costruttori si sta orientando verso **soluzioni ibride**, sistemi di accumulo modulari di **batterie intercambiabili** e strategie di **ricarica rapida o distribuita** in ambito aziendale

## Tipologie di mezzi analizzati

L'elettrificazione dei macchinari semoventi impiegati in ambito agricolo ha dato vita a un **insieme eterogeneo** di mezzi full-electric utilizzati nelle principali **attività di campo, di movimentazione e di supporto alle aziende agricole e zootecniche**. Queste soluzioni, accomunate dall'adozione di sistemi di trazione elettrica alimentati da batterie, stanno progressivamente sostituendo le motorizzazioni endotermiche nelle applicazioni in cui **autonomia, potenza richiesta e ciclo di lavoro risultano compatibili con la tecnologia attuale**.

L'insieme analizzato comprende **trattori compatti e specializzati, trattori utility, sollevatori telescopici, carri miscelatori, pale gommate, escavatori compatti e robot agricoli mobili** autonomi o semi-autonomi. Ciascuna categoria si caratterizza per un diverso grado di **maturità tecnologica** e per **ambiti d'impiego specifici**, riflettendo un percorso di transizione che procede più rapidamente nei segmenti a medio-basso fabbisogno energetico.

Lo sviluppo dei **robot agricoli mobili**, pienamente compatibili con le attuali capacità delle batterie e con le **esigenze dell'agricoltura di precisione**, rappresenta una delle direttrici più **promettenti** della meccanizzazione avanzata. La loro diffusione è destinata a crescere rapidamente grazie alla combinazione tra **digitalizzazione, automazione, intelligenza artificiale** e disponibilità di trazione elettrica efficiente.

Nel complesso, l'offerta attuale mostra un **percorso di transizione già avviato**, in cui la diversificazione dei modelli e il progresso della componentistica aprono la strada verso una **meccanizzazione agricola sempre più sostenibile, digitale ed energeticamente efficiente**.



# Tipologie di mezzi analizzati

## TRATTORI COMPATTI



### Funzione e ambito d'impiego

Utilizzati per molteplici attività leggere in orticoltura, vivaismo, allevamenti e manutenzione aziendale leggera, dove servono dimensioni ridotte, maneggevolezza e basso impatto sul suolo

### Caratteristiche tecniche

Potenze generalmente basse tra 15 e 40 CV (le versioni diesel raggiungono gli 80 CV); batterie da 20 a 40 kWh; architetture semplici e pesi contenuti; ricarica prevalentemente tramite prese AC trifase

### Stato di sviluppo

Tra i segmenti più maturi del mercato, già adottato in piccole e medie aziende

### Vantaggi

Ridotta rumorosità, minori esigenze di manutenzione, buona autonomia nelle lavorazioni leggere e possibilità di alimentare attrezzature elettrificate

### Criticità

Autonomia limitata nelle attività continuative o con attrezzature ad alto assorbimento energetico

### Prospettive

Crescita costante nei contesti aziendali polifunzionali e nelle attività di manutenzione leggera del verde

# Tipologie di mezzi analizzati

## TRATTORI SPECIALIZZATI



### Funzione e ambito d'impiego

Progettati per operare in vigneti, frutteti, oliveti, serre e colture protette, questi mezzi presentano dimensioni compatte, carreggiata contenuta e profilo stretto, che consentono il lavoro tra i filari senza danneggiare le colture

### Caratteristiche tecniche

Potenze comprese tra 40 e 80 CV (le versioni diesel raggiungono i 120 CV); carreggiate ridotte, baricentro basso e altezza contenuta; batterie da 40-100 kWh per autonomie di 5-8 ore

### Stato di sviluppo

Categoria già oggi commercializzata, con disponibilità di modelli di serie e utilizzo crescente in aziende vitivinicole e ortofrutticole

### Vantaggi

Assenza di emissioni in aree sensibili; ridotta rumorosità; coppia immediata utile per manovre su pendenze e in filare; costi di manutenzione inferiori rispetto ai modelli diesel

### Criticità

Autonomia limitata in contesti collinari o con attrezzature energivore; necessità di ricarica quotidiana pianificata

### Prospettive

Rapida diffusione nei contesti specializzati grazie a incentivi, politiche di sostenibilità e crescente integrazione con tecnologie di agricoltura di precisione

# Tipologie di mezzi analizzati

## TRATTORI UTILITY



### Funzione e ambito d'impiego

Impiegati in aziende agricole miste, in ambito zootecnico, frutticolo e vitivinicolo, nonché nelle attività aziendali di supporto (movimentazione, trasporto interno, gestione attrezzature), svolgono lavorazioni polivalenti di media intensità, con elevata versatilità operativa

### Caratteristiche tecniche

Potenza tra 40 e 90 CV (le attuali versioni diesel raggiungono i 140 CV); batterie da 60-150 kWh; impianti idraulici più performanti e capacità di traino superiore rispetto ai compatti e agli specializzati

### Stato di sviluppo

Elettrificazione in fase intermedia con alcune soluzioni ibride disponibili, mentre i full-electric sono prevalentemente prototipi

### Vantaggi

Maggiore efficienza nelle attività a carico variabile, migliore controllo delle funzioni ausiliarie e riduzione dei consumi in molte lavorazioni aziendali

### Criticità

Autonomie ancora insufficienti per lavorazioni di campo prolungate e necessità di infrastrutture di ricarica adeguate a garantire l'uso intensivo

### Prospettive

Sviluppo di configurazioni ibride e soluzioni full-electric con batterie a maggiore densità energetica, adeguate alle lavorazioni di media-alta intensità

# Tipologie di mezzi analizzati

## TRATTORI DA CAMPO APERTO



### Funzione e ambito d'impiego

Destinati alle lavorazioni estensive e più energivore, tra cui aratura, ripuntatura, semina, preparazione del letto di semina e traino pesante. Costituiscono la categoria che opera a più alta potenza e, di conseguenza, quella in cui l'elettrificazione è tecnicamente più complessa

### Caratteristiche tecniche

Potenze oltre 100 CV (le versioni diesel vanno da 150 a oltre 500 CV), batterie superiori a 150-200 kWh, trazione elettrica multi-motore coordinata e architetture ad alta tensione per garantire coppia e continuità operativa

### Stato di sviluppo

Tecnologia ancora in fase prototipale o pre-commerciale, con soluzioni ibride e batterie intercambiabili per estendere l'autonomia

### Vantaggi

Coppia immediata nelle lavorazioni gravose, integrazione con sistemi di agricoltura di precisione elettrificati e riduzione di emissioni locali e rumore

### Criticità

Peso e costo delle batterie, autonomia limitata per cicli di lavoro prolungati e necessità di ricarica rapida o infrastrutture dedicate non sempre disponibili

### Prospettive

Adozione prevista nel medio-lungo periodo, grazie a batterie ad alta densità energetica, architetture ibride evolute e sistemi di ricarica rapida in campo

# Tipologie di mezzi analizzati

## SOLLEVATORI TELESCOPICI



### Funzione e ambito d'impiego

Macchine multifunzionali utilizzate per carico e movimentazione di materiali agricoli, gestione delle biomasse e supporto alle attività zootecniche

### Caratteristiche tecniche

trazione e idraulica interamente elettriche; capacità di sollevamento dalle 3 alle 5 t.; altezze operative tra 5 e 9 metri; potenza tra 19 e 70 CV (le versioni diesel hanno potenze da 80 a 140 CV); batterie da 24 a 50 kWh per autonomie di 6-11 ore

### Stato di sviluppo

Categoria tecnicamente matura, con produzione di serie consolidata

### Vantaggi

Eliminazione dei fumi in ambienti chiusi (es. stalla o magazzino); riduzione della rumorosità; costi operativi contenuti

### Criticità

Prestazioni ridotte nelle applicazioni più gravose; necessità di ricarica rapida o batterie di ricambio per utilizzo intensivo

### Prospettive

Adozione crescente nel settore zootecnico, agroindustriale e nelle aziende con forte integrazione di energie rinnovabili

# Tipologie di mezzi analizzati

## CARRI MISCELATORI SEMOVENTI



### Funzione e ambito d'impiego

Preparazione e distribuzione dell'unifeed in allevamenti di medie e grandi dimensioni

### Caratteristiche tecniche

Motorizzazione elettrica integrale; potenza tra 90 e 150 CV; batterie con capacità comprese tra 80 e 150 kWh; autonomia operativa di 2,5-3 ore per cicli intensivi; sistemi di pesatura e distribuzione automatizzati

### Stato di sviluppo

Tra i macchinari elettrici più consolidati in ambito zootecnico

### Vantaggi

Assenza di emissioni e riduzione del rumore in stalla; riduzione dei costi energetici e di manutenzione; elevata precisione nella miscelazione

### Criticità

Autonomia tarata su cicli specifici; necessità di ricarica intermedia per cicli di lavoro in allevamenti molto estesi

### Prospettive

Forte crescita prevista nelle aziende latteo-casearie e negli impianti di biogas

# Tipologie di mezzi analizzati

## PALE GOMMATE COMPATTE



### Funzione e ambito d'impiego

Carico e movimentazione di materiali sfusi, compost, letame, foraggi; impiego anche nella gestione dei magazzini aziendali

### Caratteristiche tecniche

Potenze variabili tra 20 e 80 CV; capacità di sollevamento da 1,5 a 5 t.; batterie con capacità da 20 a 100 kWh; autonomia operativa da 4-8 ore

### Stato di sviluppo

Categoria pienamente commercializzata nelle versioni di bassa-media potenza

### Vantaggi

Costi operativi inferiori; lavorazione senza emissioni e impatto acustico molto ridotto; possibilità di operare in aree sensibili e ambienti chiusi

### Criticità

Autonomia ridotta nelle applicazioni intense; tempi di ricarica da pianificare in aziende di grandi dimensioni

### Prospettive

Tra le macchine full-electric più diffuse dopo i telescopici, con crescita costante

# Tipologie di mezzi analizzati

## ESCAVATORI COMPATTI



### Funzione e ambito d'impiego

Mini-escavatori (1-6 ton) ed escavatori medi (8-25 ton) impiegati in ambito agricolo per manutenzione di terreni, opere di drenaggio, realizzazione di fossi, livellamento ed altri interventi del suolo. Rappresentano un segmento in rapida espansione

### Caratteristiche tecniche

Classi di peso da 1 a 25 t.; trazione e idraulica elettriche; batterie da 20 a 150 kWh; autonomia da 4 a 10 ore a seconda della classe di peso e dei cicli di lavoro

### Stato di sviluppo

Tecnologia matura per i mini-escavatori (1-6 t.) e in rapida espansione per i modelli medi (6 a 25 t.)

### Vantaggi

Assenza di fumi, riduzione di rumori e vibrazioni; elevata precisione di controllo; idonei anche a lavori in serre o ambienti confinati

### Criticità

Autonomia variabile in funzione del ciclo di lavoro; necessità di infrastrutture di ricarica adeguate non sempre disponibili in ambito rurale

### Prospettive

Crescita significativa attesa nelle attività di manutenzione del reticolo idraulico rurale e nelle operazioni di sistemazione dei terreni agricoli

# Tipologie di mezzi analizzati

## ROBOT AUTONOMI MOBILI



### Funzione e ambito d'impiego

Piattaforme robotiche autonome o semi-autonome per la gestione intelligente delle colture e delle aree verdi, impiegate in diserbo meccanico, sarchiatura, semina di precisione, monitoraggio e mappatura, irrigazione intelligente, trattamenti localizzati a basso impatto e micro-logistica aziendale

### Caratteristiche tecniche

Trazione elettrica con motori integrati; batterie da 3 a 60 kWh, autonomia fino a 8-10 ore; sistemi GNSS con correzione RTK, LiDAR e visione artificiale; moduli operativi specialistici e integrazione con software per la pianificazione automatizzata

### Stato di sviluppo

Numerose soluzioni avanzate in fase sperimentale con alcuni modelli già commercializzate in diversi segmenti

### Vantaggi

Riduzione del lavoro manuale, assenza di emissioni locali e basso impatto acustico, con ottimizzazione dei costi operativi grazie all'elevata efficienza e all'automazione

### Criticità

Necessità di supervisione in alcune fasi del ciclo di lavoro; costi iniziali ancora elevati; integrazione necessaria con sistemi digitali aziendali

### Prospettive

Forte crescita nei prossimi anni, favorita dalla compatibilità operativa con la trazione elettrica, dalla maturità di batterie e sistemi di navigazione autonoma e dalla scarsità di manodopera, che incentiva soluzioni a maggiore automazione



## FOCUS: ANALISI FABBISOGNO ENERGETICO ANNUO MEDIO

Considerato che i mezzi agricoli elettrici richiedono una **ricarica** con cadenza giornaliera, indipendentemente dal fatto che questa avvenga all'interno dell'azienda agricola oppure presso infrastrutture esterne, come hub di ricarica pubblici o soluzioni condivise tra più aziende, risulta opportuno analizzare il fabbisogno energetico annuo medio associato alle **diverse tipologie di macchinari**.

A questo scopo, per ciascun mezzo sono state considerate le **ore di utilizzo annuo tipico** in condizioni operative ordinarie, escludendo quindi gli scenari di impiego intensivo. Sulla base delle **caratteristiche tecniche** disponibili, sono stati inoltre selezionati **modelli ritenuti rappresentativi** della media delle rispettive categorie, con l'obiettivo di definire **parametri realistici** in termini di **capacità delle batterie** installate e di **autonomia operativa**.

Tipologia di Macchinario	Batteria (kWh)	Autonomia Media (ore)	Utilizzo Annuo (ore)	kWh / Anno
Trattore Compatto	23	4	300	1725
Robot Autonomo Mobile	60	10	300	1800
Escavatore Compatto	20	3	500	3333
Sollevatore Telescopico	46	6	500	3833
Pala Gommata Compatta	40	5	600	4800
Trattore Utility	110	6	600	11000
Carro Miscelatore	96	2	500	24000

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda le modalità con cui i costruttori rispondono alle **esigenze operative** degli agricoltori. In particolare, sia nel caso dei trattori compatti, generalmente privi di capacità di ricarica in corrente continua, sia nel caso dei trattori utility dotati di batterie di capacità superiore ai 100 kWh, l'integrazione di un'infrastruttura di **ricarica** adeguata consente di riportare lo **stato di carica della batteria dal 20% all'80%** in un tempo indicativamente pari a **un'ora**. Questo permette al mezzo di tornare operativo in **tempi rapidi**, riducendo in modo significativo i **periodi di inattività** e attenuando una delle principali criticità associate all'elettrificazione, ovvero il rischio di **fermi macchina** prolungati.

# CONTESTO ITALIANO DELL'ELETTRIFICAZIONE

# 4



# Contesto italiano dell'elettrificazione

L'elettrificazione dei mezzi impiegati in ambito agricolo in **Italia** si inserisce in un contesto caratterizzato da una forte **tradizione manifatturiera**, da un **settore agricolo eterogeneo** e da un **sistema produttivo in rapido cambiamento**. La transizione verso soluzioni a **zero emissioni** non riguarda soltanto l'introduzione di **nuove tecnologie**, ma coinvolge l'intera **filiera industriale**, la struttura delle aziende agricole, i **territori** e le **competenze** professionali.

Questa sezione dello studio analizza il **quadro nazionale** entro cui si sta sviluppando l'elettrificazione, ricostruendo la **configurazione** attuale del **settore agricolo**, l'evoluzione storica della **meccanizzazione**, il ruolo della **filiera** produttrice e le principali **criticità** e **opportunità** che caratterizzano questo processo di **trasformazione**.



# Settore agricolo italiano

In Italia, l'agricoltura continua a rivestire un **ruolo centrale** nella struttura economica e territoriale del Paese, rappresentando un **pilastro del sistema produttivo** nazionale e un elemento distintivo del **Made in Italy**. Il settore si colloca stabilmente tra i principali in Europa per valore della produzione e si caratterizza per una presenza diffusa sul territorio, con una **forte eterogeneità** in termini di dimensioni aziendali, **specializzazioni produttive** e livelli di innovazione tecnologica e digitalizzazione. Questa complessità rende necessario un **equilibrio** tra **competitività** economica e **sostenibilità** ambientale, affinché la gestione del territorio rurale e l'intera **filiera** agroalimentare possano evolversi in un'ottica di **innovazione, resilienza e transizione** sostenibile.

## La struttura agricola italiana è eterogenea:

- Nel **Nord**, agricoltura intensiva e tecnologica, focalizzata su zootecnia, colture industriali e cereali.
- Al **Centro**, policoltura collinare e specializzazione nella viticoltura.

Nel **Sud** e nelle **Isole**, prevalgono produzioni ortofrutticole, olivicole e cerealicole, con sistemi produttivi misti e maggiore lavoro manuale.

Si evidenziano anche **differenze produttive** e un **divario strutturale** tra Nord e Sud Italia.

- **Nord** e parte del **Centro**:
  - imprese più strutturate
  - maggior capacità di investimento
  - accesso migliore al capitale
  - infrastrutture sviluppate
  - rete di servizi associativi solida.
- **Sud, Centro-Sud** e **Isole**:
  - aziende di dimensioni ridotte
  - minori opportunità di innovazione
  - costi logistici elevati dovuti alla distanza dai mercati principali.

Valore Produzione Agricola



74 miliardi di €

Aziende Agricole Attive



1,1 milioni

Ettari Coltivati



12 milioni

Consumo Energetico Annuo



3-3,5 Mtep

Parco Macchine Agricole



Oltre 2 milioni

Età Media Macchinari



20 anni



In sintesi, l'agricoltura italiana è un mosaico di aziende piccole, medie e poche grandi, con livelli molto diversi di innovazione. Questa eterogeneità influisce in modo significativo sulla capacità del settore di sperimentare e adottare soluzioni energetiche efficienti e sostenibili

# Ecosistema industriale e territoriale della filiera italiana

A livello nazionale, la **fabbricazione di macchine per l'agricoltura e la silvicoltura** rappresenta uno dei comparti di maggiore **rilevanza** del sistema manifatturiero italiano dei **beni strumentali**.

Il settore si colloca stabilmente tra i **principali produttori europei** di macchinari per l'agricoltura, esprimendo un **valore industriale** rilevante e una **solida capacità competitiva**. Particolarmente significativa è la **forte vocazione internazionale** del comparto, con una quota rilevante della produzione destinata ai **mercati esteri**, a conferma dell'elevato livello di **specializzazione tecnologica, innovazione e qualità** riconosciuto alle imprese italiane

Il **cuore produttivo** di questa filiera è concentrato nei principali poli industriali del **Nord Italia**, in particolare in Emilia-Romagna, Veneto, Lombardia e Piemonte, dove si sviluppa una **rete articolata** di **PMI specializzate, produttori di componenti** ad alto contenuto tecnologico e **centri di ricerca**. In questi territori si è consolidato un ecosistema industriale **in grado di supportare l'intero ciclo** di progettazione, sviluppo e integrazione dei **sistemi elettrificati**, oggi ulteriormente rafforzato dalle **strategie europee e nazionali** orientate alla decarbonizzazione e alla digitalizzazione

Valore Produzione  
Annuo



Oltre a  
16 miliardi di €

Aziende Produttrici  
Attive



Circa 1300

Produzione  
Destinata al  
Mercato Estero



Oltre il 60%

Decine di migliaia  
di addetti



Lungo l'intera  
filiera

La filiera nazionale dei mezzi agricoli costituisce oggi un **sistema industriale avanzato**, caratterizzato da un'elevata **integrazione** tra **componentistica meccanica, elettronica e digitale**. La crescente attenzione verso la riduzione delle emissioni e l'efficienza energetica sta favorendo una progressiva **riconfigurazione** del settore, con l'ampliamento dell'offerta verso **soluzioni elettrificate e meccatroniche** dedicate alle applicazioni **off-highway**.

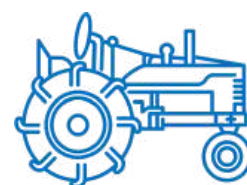
La combinazione di competenze tecniche, presenza di distretti industriali e investimenti in tecnologie emergenti rende la filiera italiana un attore chiave nella transizione verso macchinari agricoli elettrici, con un ruolo crescente nella fornitura di soluzioni avanzate per il mercato internazionale.



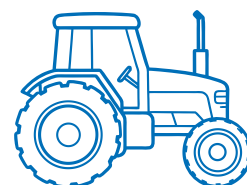
## FOCUS: EVOLUZIONE STORICA DELLA MECCANIZZAZIONE AGRICOLA IN ITALIA

La meccanizzazione agricola italiana affonda le radici nel **dopoguerra**, in un periodo in cui la meccanizzazione era necessaria per compensare la **perdita di manodopera rurale**. Le imprese italiane iniziarono a produrre macchine agricole con **trazione meccanica**, strutture **robuste ma semplici**, orientate a specializzazioni per colture ad alto valore aggiunto (vigneti, frutteti, orticoltura, ecc.).

Sotto questa prospettiva, il **sistema manifatturiero** si è sviluppato in aree geografiche come **Emilia-Romagna, Veneto, Lombardia e Piemonte**, territori caratterizzati da una lunga tradizione manifatturiera, infrastrutture di ricerca e una rete di PMI specializzate.



Alla fine degli **anni '80 e nel decennio successivo** si è registrata **l'introduzione dell'elettronica** nel ciclo della macchina agricola: dall'elettronica analogica ai primi sistemi digitali, dando vita alla **meccatronica** (integrazione tra meccanica, idraulica ed elettronica). Le componenti elettroniche assunsero un ruolo crescente nei sistemi di controllo della macchina, aprendo la strada alle **architetture digitali**. Questo processo di evoluzione ha preparato il terreno per l'elettrificazione della trazione e degli organi ausiliari.



A partire dalla **metà degli anni 2000**, con l'entrata in vigore di **normative europee più stringenti** sulle emissioni per i motori impiegati in ambito agricolo (Stage III, IV e V), il settore ha dovuto confrontarsi con la **prospettiva dell'elettrificazione** non più come opzione futura ma come **inevitabile**.

Nel contesto della componentistica, questo ha significato un passaggio **dalla meccanica tradizionale a sistemi elettrificati**, batterie, motori elettrici, inverter e software di controllo. In particolare, il processo di elettrificazione dei mezzi agricoli è stato intensificato dall'integrazione di strumenti digitali per lo **sviluppo dell'agricoltura di precisione**.



# Fabbricazione dei mezzi agricoli elettrici in Italia

La produzione dei mezzi agricoli elettrici in Italia è un **settore emergente** che si sta sviluppando come **estensione naturale della manifattura della meccanica agricola nazionale**, tradizionalmente specializzata nella costruzione di **trattori e macchine semoventi** per colture specializzate. L'introduzione dell'elettrico ha portato a una revisione dei processi costruttivi e delle architetture meccaniche, pur **mantenendo la struttura produttiva tipica** della meccanizzazione agricola italiana, caratterizzata dalla **presenza di costruttori altamente specializzati**.

Nell'attualità la fabbricazione italiana di macchine semoventi per l'ambito agricolo **si rivolge prevalentemente** alle seguenti tipologie di mezzi:

## Trattori compatti e specializzati

La fabbricazione avviene prevalentemente mediante l'adattamento di telai e allestimenti già presenti nelle linee di trattori endotermici, sostituendo la motorizzazione tradizionale con powertrain elettrici dedicati, pacchi batteria modulari e sistemi di controllo elettronico



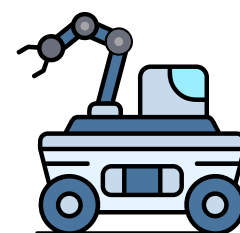
## Macchine mobili non stradali (NRMM)

Si tratta principalmente di macchine operatrici professionali a zero emissioni che uniscono prestazioni tradizionali alla trazione elettrica, riducendo emissioni, rumore e costi operativi. Tra le diverse NRMM fabbricate si trovano carri miscelatori, sollevatori telescopici, escavatori e pale compatte



## Robot autonomi mobili (AMR)

La produzione avviene spesso in volumi ridotti, con un elevato livello di integrazione tra software, attuatori elettrici e pacchi batteria modulari. Il segmento, pur ancora di nicchia, rappresenta una delle aree a maggiore potenziale di crescita, in linea con le tendenze internazionali sull'Agricoltura 4.0



# Fabbricazione dei mezzi agricoli elettrici in Italia

La **maturità produttiva** dei mezzi agricoli elettrici in Italia riflette un settore **in rapida evoluzione** ma ancora eterogeneo, con **livelli di sviluppo molto differenti** tra le varie tipologie di macchine. Pur esistendo alcuni casi avanzati o anticipatori, in linea generale lo scenario attuale può essere sintetizzato in **tre livelli principali di produzione**.



Produzione industriale consolidata

Riguarda principalmente alcune **NRMM elettriche** già commercializzati e prodotte in serie da costruttori italiani, tra cui **sollevatori telescopici, escavatori e pale**. Queste macchine, nate per la movimentazione, sono oggi impiegate in ambito agricolo grazie alla maturità della tecnologia e alla disponibilità commerciale stabile

Produzione di piccola serie o pre-serie

Comprende le macchine elettriche prodotte ancora in volumi limitati. In questa categoria rientrano i **carri miscelatori semoventi**, già operativi in contesti zootecnici, i **trattori compatti e specializzati**, attualmente disponibili soprattutto come pre-serie, prototipi avanzati o dimostratori

Produzione prototipale o sperimentale

Include le macchine che non hanno ancora raggiunto una maturità produttiva tale da consentire una produzione industriale. Ne fanno parte i **macchinari elettrici di media e alta potenza** e principalmente i **trattori da campo aperto**, ancora limitati dai vincoli dell'accumulo energetico. Rientrano in questa categoria anche i **robot agricoli elettrici**, non per limiti tecnologici delle batterie, ma perché il mercato è ancora emergente e le soluzioni attuali vengono prodotte in Italia in volumi molto ridotti e con un elevato grado di sperimentazione

# Specializzazioni tecnologiche e segmenti chiave della componentistica

Il tessuto produttivo italiano comprende una **filiera ampia e articolata** che copre gran parte dei segmenti della catena del valore. Si tratta di un **ecosistema industriale diversificato**, in cui convivono grandi gruppi, fornitori Tier-1 e Tier-2 e un diffuso tessuto di piccole e medie imprese specializzate. Il settore della componentistica si distingue per la varietà delle competenze tecnologiche e per la **capacità di integrazione** tra meccanica, elettronica ed energia.

La filiera nazionale focalizza la sua produzione nei seguenti **segmenti chiave**:

## Powertrain elettrici, motori e trasmissioni integrate

Il powertrain rappresenta il **cuore della trazione full-electric**. La filiera nazionale copre la progettazione e produzione di **motori elettrici, assali e trasmissioni elettrificate** in grado di sostituire il motore endotermico e di alimentare sia la trazione sia le utenze ausiliarie.

Le limitazioni oggi riscontrabili nell'elettrificazione non sono legate alla maturità dei motori elettrici e dei sistemi di trazione, **tecnologia ormai consolidata** e supportata da una filiera industriale avanzata anche in Italia, ma riguardano soprattutto l'integrazione dei powertrain elettrici in applicazioni ad alta potenza, la gestione dell'accumulo energetico e l'adattamento ai cicli di lavoro agricoli più gravosi.



## Elettronica di potenza e sistemi di controllo

La transizione richiede **inverter, convertitori DC/DC, sistemi di controllo e distribuzione ad alta tensione** specifici per macchine off-highway. In Italia operano realtà specializzate nello sviluppo di elettronica di potenza, sistemi di controllo e architetture mecatroniche, elementi essenziali per la **gestione efficiente dell'energia e delle funzioni di bordo**.



## Sensoristica, telemetria e tecnologie digitali

La diffusione dei sistemi elettrificati ha accelerato lo sviluppo di **sensori avanzati, telemetria e piattaforme digitali** dedicate alla guida assistita, alla diagnostica remota e alla gestione dei dati operativi. Le soluzioni elettriche richiedono **cablaggi schermati, connettori ad alta resistenza e componenti elettronici** in grado di **operare in condizioni ambientali particolarmente impegnative**. La filiera italiana offre soluzioni di comunicazione e reti dati affidabili, integrate con piattaforme IoT, strumenti per la manutenzione predittiva e servizi di monitoraggio remoto, contribuendo alla realizzazione di **mezzi più efficienti, intelligenti e interconnessi**.



# Specializzazioni tecnologiche e segmenti chiave della componentistica

La filiera nazionale focalizza la sua produzione nei seguenti **segmenti chiave**:

## Sistemi di accumulo e gestione energetica

Imprese nazionali sviluppano **pacchi batteria modulari e sistemi di gestione (BMS)** per applicazioni agricole e off-highway. La capacità produttiva di celle resta limitata a livello europeo e nazionale, rendendo strategici gli investimenti nel **rafforzamento della supply chain** e nell'accesso a **materie prime critiche**.

A supporto di questa analisi, la **MAPPA DELLA FILIERA DELLE BATTERIE IN ITALIA** elaborata da **Motus-E** consente di cogliere in modo immediato la struttura e l'articolazione del sistema nazionale dell'accumulo, evidenziando gli **attori** e le **competenze** coinvolte lungo l'intera catena del valore.



## Altri componenti meccanici elettrificati

L'elettrificazione coinvolge anche la sostituzione graduale di sistemi meccanici e idraulici, alimentati dal motore tradizionale, con **soluzioni elettriche per funzioni ausiliarie**. Sono in sviluppo cilindri e meccanismi lineari elettrificati che integrano **attuazione e controllo elettronico**. La coesistenza tra idraulica ed elettrico **resterà centrale nel prossimo decennio**, rappresentando un percorso pragmatico per migliorare precisione, manutenzione e sostenibilità operativa.



## Infrastrutture di ricarica e servizi integrati

Una filiera completa considera anche la disponibilità di infrastrutture di ricarica e distribuzione energetica in ambito rurale. Le soluzioni disponibili includono **ricarica intelligente, integrazione con impianti fotovoltaici aziendali e sistemi di accumulo**, rispondendo a cicli di utilizzo stagionali e necessità di rifornimento rapido. Questo approccio consente di accelerare la diffusione dei mezzi full-electric nel settore primario.



# Il valore strategico della filiera

La **filiera italiana** possiede **caratteristiche** che la rendono **particolarmente adatta** a rispondere alla crescente domanda di **soluzioni elettrificate**:

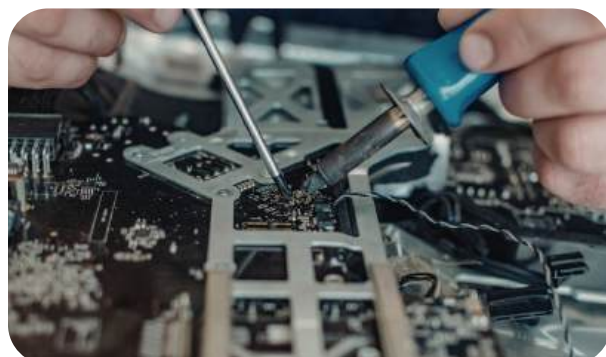
Presenza di imprese specializzate nella meccanica agricola e nella componentistica veicolare



Capacità di sviluppare soluzioni customizzate per applicazioni off-highway



Know-how consolidato nel powertrain elettrico e nell'elettronica di potenza



Integrazione crescente con tecnologie digitali, robotiche e di automazione



La disponibilità di queste **competenze** consente oggi alla filiera nazionale di servire anche il segmento emergente della **robotica agricola mobile**, che richiede componenti simili a quelli delle macchine compatte elettriche e rappresenta un'opportunità di **diversificazione tecnologica** senza alterare la **specializzazione** originaria

# Il valore strategico della filiera

L'Italia si distingue come uno dei **poli europei più avanzati** per l'innovazione nei mezzi agricoli elettrificati grazie alla **combinazione di competenze** in meccanica di precisione, componentistica elettronica e sistemi di gestione energetica. La filiera nazionale **copre gran parte del ciclo produttivo**, dalla progettazione dei sistemi di trazione allo sviluppo di infrastrutture di ricarica e soluzioni digitali per la gestione intelligente dei veicoli.

La **sinergia** tra **manifattura, ricerca e digitalizzazione** migliora **l'attrattività** del Paese per **investimenti internazionali** e segmenti ad alto valore. L'integrazione delle tecnologie digitali nei processi produttivi collega progettazione, automazione e uso operativo di mezzi elettrificati, promuovendo un **ecosistema industriale** per la **mobilità agricola** elettrica e sostenibile.

Il **sistema produttivo** italiano è forte in meccanica di precisione, componentistica elettronica, sistemi di accumulo e gestione dell'energia. Queste **competenze** favoriscono lo **sviluppo** di macchinari agricoli elettrici, aumentando la **resilienza industriale del Paese**, nonostante le **sfide** riguardanti **forniture e collaborazioni internazionali**.

Le analisi di mercato mostrano una **crescente domanda di componenti** per veicoli elettrici, come pacchi batteria, motori e sistemi di elettronica di potenza. Ci sono **prospettive positive** anche per le **applicazioni off-highway**, dove l'elettrificazione è **emergente ma promettente**.

La disponibilità di **macchinari e componenti nazionali** offre un **vantaggio competitivo** per la meccanica elettrificata e la **mobilità agricola** a zero emissioni. Questo si inserisce in un contesto in cui la **leadership italiana** nella produzione tecnologica è considerata un **asset strategico**, soprattutto con la diminuzione della produzione di veicoli tradizionali.

Un aspetto **strategico** è il **legame** tra la **filiera** componenti-macchine agricole e la **sicurezza alimentare**. Mezzi efficienti, elettrificati e digitalizzati favoriscono un'**agricoltura resiliente**, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e supportando la **decarbonizzazione**. In questo senso la componente produttiva assume un **ruolo infrastrutturale** per il **sistema agroalimentare** italiano.



# Criticità e prospettive per la filiera

La filiera italiana ha l'opportunità di **rafforzare ulteriormente il proprio posizionamento** come sistema industriale integrato, capace di **sviluppare soluzioni complete** per la mobilità elettrica agricola. Per cogliere questa evoluzione è necessario un **approccio integrato** che consideri l'intero ciclo di vita dei mezzi, dall'approvvigionamento dei materiali alla gestione del fine vita delle batterie, includendo **integrazione digitale e modelli produttivi orientati alla circolarità**.

Nonostante le notevoli potenzialità, la filiera italiana per l'elettrificazione dei mezzi agricoli deve affrontare alcune **sfide strategiche** che ne condizionano la crescita nel medio periodo:

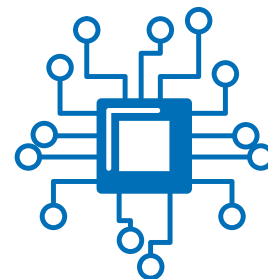
## Accesso alle materie prime e dipendenze esterne

La ridotta produzione nazionale di batterie e semiconduttori è una vulnerabilità chiave, poiché la **dipendenza da fornitori esteri** espone il settore a rischi di **interruzione delle forniture e fluttuazioni dei prezzi**. Questa fragilità influisce anche sui costi di approvvigionamento di materiali critici per batterie e motori elettrici. **Iniziative europee e nazionali** per impianti di produzione potrebbero ridurre questa dipendenza, ma necessitano di coordinamento tra imprese, istituzioni e centri di ricerca per **garantire approvvigionamento e tracciabilità**.



## Gap tecnologico e capacità produttiva

La filiera italiana si distingue nella progettazione meccanica e mecatronica, ma presenta un **divario** nei motori elettrici ad alta potenza, nelle celle batteria e nei semiconduttori rispetto ai **concorrenti globali**. La limitata capacità produttiva e gli investimenti insufficienti in ricerca e sviluppo, insieme alla frammentazione imprenditoriale, ostacolano la **competitività**. È fondamentale **ampliare la capacità produttiva e rafforzare le sinergie** tra imprese, università e centri tecnologici per favorire la **crescita** del settore.



## Frammentazione della filiera e difficoltà di coordinamento

Il sistema produttivo è altamente frammentato, con **molte piccole e medie imprese** che, nonostante la **flessibilità e specializzazione**, faticano a **sostenere i costi** di innovazione e a stabilire **relazioni paritarie** con grandi costruttori. Questa struttura complica il **coordinamento** nella catena del valore e limita la creazione di piattaforme tecnologiche condivise. Per affrontare questi limiti, è necessario **promuovere aggregazioni** come distretti dell'elettrificazione off-highway, consorzi di innovazione e reti di impresa per **condividere risorse e competenze, e accedere a finanziamenti** europei.



# Criticità e prospettive per la filiera

## Domanda in fase embrionale ed elevati costi unitari

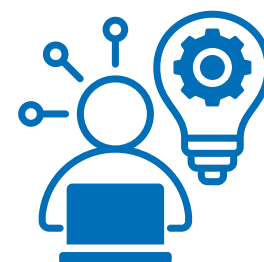
Nel settore agricolo, l'adozione dei mezzi full-electric è ancora in fase iniziale, con **volumi di mercato limitati** rispetto all'automotive e **costi unitari elevati**. Le specifiche esigenze operative rendono ulteriormente complessa la progettazione. Tuttavia, l'esperienza nel settore automotive indica che l'adozione di tecnologie elettriche accelera dopo la fase dimostrativa. **Programmi pilota e flotte dimostrative** sono essenziali per **velocizzare l'adozione e sostenere lo sviluppo** del mercato.



## Competenze professionali e capitale umano

La transizione elettrica e digitale richiede **nuove figure professionali** specializzate. La **disponibilità** di tali competenze risulta sempre più sotto pressione, rappresentando una criticità crescente, aggravata dall'invecchiamento della forza lavoro e dalla difficoltà di **attrarre giovani qualificati** verso il settore agricolo e industriale.

Risulta fondamentale adottare **programmi formativi** in elettrificazione e mecatronica, potenziare gli istituti tecnici superiori e creare percorsi di formazione specializzati per **garantire competenze adeguate** alla trasformazione in corso.



La **competitività futura** dipenderà dalla capacità di **integrare competenze, aumentare la produzione, definire strategie comuni** e rafforzare il legame tra manifattura, energia e ricerca. Il Paese ha eccellenze tecniche e **poli tecnologici** che possono favorire un ruolo significativo nella filiera europea dell'elettrificazione agricola.

Si tratta di un passo fondamentale **verso un'agricoltura più efficiente e sostenibile**, che richiederà un focus sull'aumento della **capacità produttiva** di batterie e componenti powertrain, il **potenziamento delle competenze** professionali e la **diffusione di infrastrutture** di ricarica nelle aree rurali. La fase attuale rappresenta una finestra di **opportunità per trasformare la filiera** in un pilastro della strategia industriale nazionale dedicata alla **transizione energetica agricola**.



# INFRASTRUTTURE DI RICARICA E FILIERA ENERGETICA

# 5

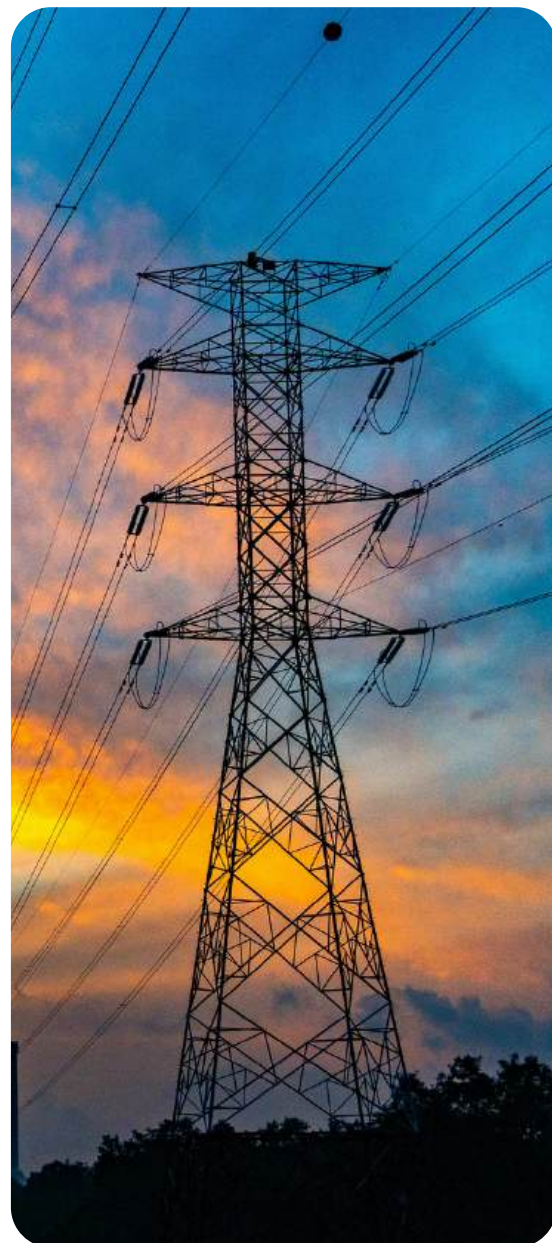


# Infrastrutture di ricarica e filiera energetica

L'elettrificazione non può essere affrontata come un semplice cambio di motorizzazione. Richiede una **revisione integrata dell'accesso all'energia** nelle aree rurali, della capacità della rete di **distribuire potenza in modo affidabile**, delle opportunità di **autoproduzione** e delle nuove forme di **cooperazione energetica** tra imprese agricole.

La **disponibilità di infrastrutture** di ricarica adeguate rappresenta oggi uno dei principali **fattori abilitanti** e, allo stesso tempo, uno dei maggiori **colli di bottiglia** per la diffusione dei trattori e delle macchine operatrici full-electric e ibride plug-in, in particolare nelle aziende di piccola e media dimensione tipiche del **contesto italiano**.

Studi recenti sull'elettrificazione delle macchine agricole concordano nel sottolineare che, **a parità di maturità tecnologica dei veicoli, le caratteristiche della filiera energetica rappresentano il fattore decisivo** per determinarne i costi, l'affidabilità operativa e la percezione di convenienza da parte degli imprenditori agricoli.



# Infrastrutture di ricarica in contesto rurale

La diffusione delle colonnine di ricarica per la mobilità elettrica in Italia è notevole, ma è **concentrata nelle aree urbane**, rendendo l'accessibilità **limitata nei contesti rurali**. Questo gap infrastrutturale ostacola l'adozione dei mezzi agricoli elettrici, che necessitano di un **modello diverso rispetto ai veicoli su strada**.

L'analisi di Motus-E sulle infrastrutture di ricarica per il trasporto merci, evidenzia che la maggior parte dei **costi complessivi** di infrastrutturazione è ripartito tra componenti **hardware e opere civili**, con valori unitari che aumentano esponenzialmente in funzione della **potenza richiesta** e della **distanza dalla rete** di media tensione. Nei contesti rurali questo effetto è **amplificato dalla dispersione geografica** delle aziende e dalla **minore capacità residua delle linee**.

In Italia, analogamente al contesto europeo, nelle aree a bassa densità di popolazione (spesso agricole) **la connessione alla rete richiede frequentemente potenziamenti** della rete MT/BT, **nuove linee** dedicate e l'installazione di **cabine** di consegna aziendali.

Nel complesso, le **strategie** di infrastrutturazione elettrica nel settore agricolo sono **ancora in una fase iniziale**. Le operazioni in campo presentano **tempi di utilizzo irregolari e fabbisogni energetici variabili** in funzione delle stagioni, delle colture e delle lavorazioni, rendendo necessario un **modello di ricarica dedicato**, distinto da quello urbano o autostradale.



# Il modello di ricarica ideale

Il modello di ricarica ideale per i macchinari e veicoli impiegati in ambito agricolo dovrebbe essere **flessibile e multilivello, adattato ai diversi profili di utilizzo e alle caratteristiche operative** delle aziende agricole. Non esiste una soluzione unica, ma un **insieme di schemi complementari** che minimizzano i fermi macchina e i costi infrastrutturali, soprattutto nei contesti rurali.

Per i **mezzi di piccola taglia**, come trattori compatti e robot agricoli, la **ricarica notturna** in azienda a potenza moderata è generalmente sufficiente e coerente con cicli di lavoro prevedibili. Per le **applicazioni ripetitive**, ad esempio con trattori specializzati, il modello resta centrato sulla **ricarica aziendale**, integrata da **ricariche di opportunità** nelle pause operative, con eventuale ricorso alla **ricarica rapida** quando necessario.

Per le **macchine più energivore** e per **impieghi continuativi**, il modello evolve verso **soluzioni combinate**, che integrano **ricarica in deposito, hub condivisi** lungo la filiera agricola e, dove tecnicamente applicabile, **sistemi di batterie intercambiabili** per ridurre i tempi di inattività. Per i mezzi operanti in **contesti variabili o temporanei**, come macchine di movimentazione e cantieri agricoli stagionali, diventano rilevanti **soluzioni di ricarica mobile**.

In tutti i casi, il modello di ricarica dovrebbe essere **integrato con la gestione energetica aziendale**, valorizzando **autoproduzione rinnovabile, accumuli stazionari e sistemi di ricarica intelligenti**, così da aumentare la **resilienza operativa** e la **sostenibilità economica** complessiva.



# Architetture e configurazioni di ricarica in ambito agricolo

Le soluzioni di ricarica in ambito agricolo possono assumere configurazioni differenti in funzione delle **caratteristiche operative** delle aziende, della **distribuzione territoriale** dei terreni e dell'organizzazione dei **cicli di lavoro**.

## Infrastrutture di ricarica aziendali stazionarie (Depot Charging)

Questa configurazione, la più **diffusa e tecnologicamente matura**, prevede l'installazione di stazioni di ricarica presso la **sede aziendale**, dove i mezzi rientrano al termine della giornata. È la soluzione di riferimento per le macchine che operano prevalentemente in azienda o in aree limitate e che tornano regolarmente alla base.

Le infrastrutture di depot charging utilizzano generalmente ricarica in **AC** (livello 2, 3–22 kW), adatta alla **ricarica notturna** o nei **periodi di inattività**. In caso di cicli di lavoro più intensivi, possono essere integrati sistemi in **DC** (livello 3, 50–350 kW), dimensionati in base alle esigenze operative e alla potenza disponibile.

La **potenza di ricarica** viene definita considerando il profilo di utilizzo del mezzo, la capacità della batteria e la disponibilità della rete, **bilanciando continuità operativa e costi infrastrutturali**.



## Hub di ricarica condivisi (Destination Charging)

Questa configurazione prevede l'installazione di punti di ricarica presso **strutture rurali strategiche** per la filiera agroalimentare (cooperative, consorzi, frantoi, caseifici, centri di raccolta e stabilimenti di trasformazione), **dove i mezzi transitano già per esigenze operative**.

Rappresenta una soluzione complementare alla ricarica aziendale, pensata per contesti in cui **più imprese condividono infrastrutture e flussi logistici**. Consente di ottimizzare la **potenza** disponibile e ridurre i **costi** di connessione nelle aree rurali, favorendo anche la **ricarica di opportunità** durante le soste operative.

In alcune configurazioni, l'hub può essere aperto anche a **veicoli elettrici stradali**, aumentando il tasso di utilizzo dell'infrastruttura, migliorando la **sostenibilità economica** dell'investimento e contribuendo al potenziamento della rete di ricarica in ambito rurale e periurbano.



# Architetture e configurazioni di ricarica in ambito agricolo

## Infrastrutture di ricarica mobile (Mobile Charging Units)

Le infrastrutture di ricarica mobile consistono in unità **installate su camion, rimorchi o container**, dotate di **sistemi di accumulo** e trasferibili in base alle esigenze operative. Attualmente in fase di **sperimentazione o prima applicazione**, offrono un elevato grado di **flessibilità**.

Rappresentano una **soluzione complementare** alle infrastrutture fisse, particolarmente adatta per **aziende remote**, appezzamenti distanti, cantieri temporanei o **attività stagionali**, dove la realizzazione di impianti permanenti non sarebbe economicamente o logisticamente sostenibile.

Pur disponendo generalmente di potenze inferiori rispetto alle soluzioni stazionarie, garantiscono **continuità operativa** in aree prive di adeguate connessioni elettriche, senza richiedere interventi infrastrutturali permanenti.



## Sistemi di batterie intercambiabili (Battery Swapping)

Questa configurazione, attualmente in **fase di test e sviluppo**, prevede la **sostituzione rapida** delle batterie scariche con unità già cariche, riducendo significativamente i tempi di inattività. Le batterie rimosse vengono ricaricate separatamente presso la sede aziendale o in punti centralizzati, anche integrati con fonti rinnovabili.

Si tratta di una **soluzione selettiva e complementare** alla ricarica convenzionale, adatta a macchine e contesti con **cicli di lavoro prolungati o continuativi**. Richiede **veicoli progettati ad hoc**, standardizzazione dei pacchi batteria e investimenti iniziali più elevati.

In tali condizioni, il battery swapping può garantire elevata **continuità operativa**, risultando vantaggioso quando la riduzione dei tempi morti è un fattore critico per l'efficienza.



# Integrazione con energie rinnovabili e sistemi di accumulo

L'integrazione tra mezzi agricoli elettrici e fonti rinnovabili è un pilastro della **transizione energetica** nel settore primario. La **disponibilità di superfici** e di **buon irraggiamento solare** rende le aziende agricole adatte al fotovoltaico, favorendo **sinergie ambientali, economiche e di resilienza energetica** grazie alla produzione locale di energia.

**L'agrivoltaico** è una soluzione innovativa che consente di produrre energia solare **mantenendo l'uso agricolo del suolo**, grazie a moduli fotovoltaici elevati che permettono il passaggio dei macchinari e la coltivazione sottostante. I sistemi più avanzati, dotati di strutture orientabili, regolano ombreggiamento e luminosità, creando **microclimi favorevoli** e **riducendo i consumi idrici**.

**L'agrivoltaico** offre diversi vantaggi alle aziende che adottano mezzi elettrici: consente di ricaricare i macchinari con **energia rinnovabile a costi inferiori** rispetto alla rete e di **valorizzare eventuali eccedenze**. Inoltre, **riduce l'evaporazione e i fabbisogni irrigui**, limita l'erosione e contribuisce alla **tutela del suolo e della biodiversità**.

L'integrazione tra agrivoltaico e sistemi di accumulo migliora l'efficienza e la **resilienza energetica aziendale**. I **sistemi di accumulo** consentono di **immagazzinare l'energia** prodotta nei momenti di massima irradiazione e utilizzarla nelle fasi di maggiore domanda, **aumentando l'autonomia** e **riducendo i picchi di prelievo** e i **costi di connessione alla rete**.

Una questione strategica riguarda il ruolo delle **batterie di seconda vita** nell'ecosistema energetico agricolo. Le batterie provenienti da veicoli elettrici, una volta completato il loro **ciclo di utilizzo primario**, conservano una **capacità residua** tipicamente compresa fra il 70% e l'80% della capacità originaria.

Queste batterie **possono ancora essere utilizzate** in applicazioni meno esigenti, come **l'accumulo energetico in aziende agricole**. L'uso di batterie di seconda vita offre **vantaggi economici**, grazie ai costi ridotti rispetto a batterie nuove, e **benefici ambientali**, estendendo il ciclo di vita della batteria e diminuendo la richiesta di materie prime critiche.





## FOCUS: BIOMETANO COME SUPPORTO PROGRAMMABILE A RINNOVABILI E ACCUMULO

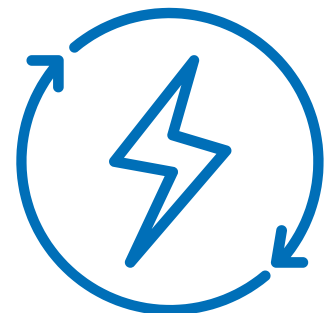
Nel contesto dell'integrazione tra energie rinnovabili e sistemi di accumulo, il biometano di origine agricola rappresenta una **fonte rinnovabile programmabile** in grado di **rafforzare l'affidabilità dei sistemi energetici** aziendali. Il biometano, prodotto a partire da **reflui zootecnici e sottoprodotti agricoli**, può essere utilizzato in generatori per la produzione di energia elettrica in sito, affiancata eventualmente da recupero di calore mediante l'utilizzo di cogeneratori.



L'elettricità così generata può alimentare direttamente i **fabbisogni aziendali** o essere impiegata per la **ricarica dei mezzi** agricoli elettrici, integrandosi con impianti fotovoltaici e sistemi di accumulo. In questa configurazione, il biometano consente di **compensare l'intermittenza** delle fonti rinnovabili non programmabili e di **superare le limitazioni** delle reti elettriche rurali.



Dal punto di vista sistemico, tale integrazione favorisce una maggiore **autonomia energetica**, riduce la dipendenza dai combustibili fossili e abilita modelli di **economia circolare** in cui produzione agricola, gestione dei residui ed **elettrificazione** dei mezzi risultano strettamente interconnesse.



# Smart grid in ambito rurale

Le smart grid sono **reti intelligenti** che, grazie a **dati e sensori**, ottimizzano i flussi di **energia**, prevengono sovraccarichi e migliorano **efficienza** e **qualità** del servizio. Il loro ruolo è cruciale con la diffusione delle rinnovabili, caratterizzate da produzione variabile. Le smart grid consentono di **gestire eccedenze e deficit, ridurre sprechi e contenere i costi energetici**.

La diffusione delle smart grid **supera il modello tradizionale unidirezionale**, introducendo una rete distribuita in cui gli utenti possono **produrre, condividere e accumulare energia**. Questo assetto riduce le perdite, migliora l'efficienza e favorisce **l'autosufficienza energetica**.

I **benefici** sono molteplici: **minori costi** e **maggiore autosufficienza** per imprese e famiglie; **migliore integrazione** delle rinnovabili e **riduzione delle emissioni** per l'ambiente; maggiore **stabilità** ed **efficienza** nella gestione dei flussi per il sistema elettrico.

Questi aspetti sono rilevanti anche per la ricarica dei **mezzi elettrici**. Le smart grid facilitano l'integrazione dei punti di ricarica, **modulano i prelievi** nei momenti di picco e favoriscono l'uso di **energia locale**, gestendo in modo equilibrato la domanda aggiuntiva. Il modello distribuito **riduce la pressione** sulla rete e abilita **un'interazione avanzata** tra mezzi, edifici e sistemi di accumulo.



# Smart grid in ambito rurale

Nel contesto dell'elettificazione dei mezzi agricoli, tre **applicazioni tecnologiche** legate alla **gestione intelligente** dell'energia risultano particolarmente **promettenti**:

## Sistemi energetici bidirezionali (V2G, V2F, V2X)

Le funzionalità bidirezionali rendono i mezzi elettrici **parte attiva del sistema energetico**. Il V2G consente di **immettere energia in rete** nei momenti di picco, generando possibili ricavi, il V2F **supporta direttamente i consumi aziendali** e il V2X estende l'utilizzo dell'energia ad **altri impieghi locali**.

In questo modo si valorizzano i **mezzi come sistemi mobili di accumulo**, le batterie assorbono eccedenze rinnovabili, aumentano l'autoconsumo e riducono i prelievi esterni. Pur ancora in **fase iniziale**, queste soluzioni rappresentano un'evoluzione promettente nell'integrazione tra mobilità elettrica e smart grid.



## Gestione dinamica dei carichi energetici (Demand Response)

Il modello consente di **ottimizzare i consumi energetici** in base alla **disponibilità di energia rinnovabile** e alle **condizioni della rete**. Le attività energivore possono essere spostate a **fasce orarie più vantaggiose**, riducendo i costi e aumentando l'uso di energia autoprodotta. In questo modello, la **ricarica** dei mezzi elettrici può essere integrata come un **carico programmabile**. Per promuovere queste soluzioni, è necessario un quadro abilitante adeguato e **strumenti digitali** per coordinare i consumi con le esigenze aziendali. Questo approccio rende il sistema energetico agricolo più efficiente, resiliente e sostenibile.



## Microgrid rurali

Le microgrid rurali sono **sistemi energetici locali** capaci di operare anche in **autonomia** dalla rete principale, integrando **produzione rinnovabile, accumulo e gestione intelligente** dei carichi.

Una microgrid può combinare fotovoltaico (anche agrivoltaico), piccoli generatori eolici o a biomassa e sistemi di accumulo, coordinati da un **sistema digitale** che **bilancia in tempo reale produzione e domanda**.

I vantaggi includono maggiore **resilienza**, riduzione dei **costi energetici** e minore **impatto ambientale**. Tuttavia, la diffusione è ancora limitata dagli **elevati investimenti iniziali** e dalla necessità di **competenze tecniche** specifiche.



# Comunità energetiche rinnovabili (CER)

Le CER sono un modello innovativo basato sulla **produzione e condivisione locale di energia rinnovabile**. Costituite come cooperative o associazioni, riuniscono cittadini, PMI ed enti pubblici con l'obiettivo di produrre, consumare e condividere energia in un'area definita, promuovendo l'autoconsumo e **riducendo la dipendenza energetica esterna**.

A livello europeo, le CER sono riconosciute come **strumenti chiave della transizione energetica**: le Direttive UE 2018/2001 e 2023/2413 ne rafforzano il ruolo, promuovendo semplificazioni, accesso equo alle reti e misure di sostegno per l'energia condivisa. In **Italia**, un **quadro normativo dedicato** prevede contributi agli impianti, tariffe incentivanti pluriennali e strumenti finanziari che ne sostengono la sostenibilità, con **semplificazioni specifiche per il settore agricolo**.

Le esperienze già attive mostrano **riduzioni dei costi energetici, maggiore disponibilità di energia rinnovabile certificata e benefici ambientali**. Oltre ai risparmi, possono generare **nuovi ricavi** legati alla condivisione dell'energia e ai servizi di flessibilità, con tempi di ritorno coerenti con le esigenze del comparto

Le comunità energetiche rinnovabili svolgono un **ruolo strategico** nella modernizzazione dell'agricoltura italiana: aumentano **resilienza e competitività**, migliorano le **performance ambientali** e favoriscono la **cooperazione** territoriale, **migliorando le condizioni per l'elettrificazione dei mezzi** e una gestione energetica più sostenibile in ambito rurale.



# BENEFICI DELL'ADOZIONE DEI MEZZI AGRICOLI ELETTRICI

# 6



# Benefici dell'adozione dei mezzi agricoli elettrici

L'introduzione dei mezzi agricoli elettrici costituisce un passaggio chiave nel processo di **modernizzazione** del settore primario e nella costruzione di **sistemi produttivi più sostenibili**. La progressiva sostituzione dei motori a combustione interna con soluzioni elettriche riflette l'evoluzione tecnologica e le **crescenti esigenze** ambientali, economiche e normative che caratterizzano l'agricoltura contemporanea. In questo scenario, l'adozione di macchine elettriche **non rappresenta soltanto un cambiamento tecnico**, ma anche un'opportunità di **trasformazione dei modelli produttivi e gestionali** delle aziende agricole.

L'analisi dei benefici associati a questa transizione permette di comprendere le **potenzialità dell'elettrificazione** nel migliorare l'efficienza complessiva delle operazioni agricole e nel contribuire a un **sistema agroalimentare più competitivo e sostenibile**. Di seguito, sono riportati i principali vantaggi che l'impiego di mezzi elettrici può offrire nel contesto rurale.

Tipologia di Benefici	Descrizione
Ambientali	Riduzione delle emissioni di gas serra e degli inquinanti locali Riduzione dell'impatto acustico e vibrazionale Riduzione dell'uso diretto e della dipendenza dai combustibili fossili
Efficienza energetica e operativa	Efficienza energetica superiore Accumulo locale e autonomia energetica Maggiore efficienza e precisione operativa Maggiore affidabilità e minori fermo macchina non programmati
Economici	Competitività economica rispetto ai mezzi tradizionali Allineamento con politiche di transizione e accesso a incentivi
Altri	Miglioramento delle condizioni di lavoro Abilitazione all'automazione e all'agricoltura 4.0 Implicazioni indirette sulla formazione dei prezzi dei prodotti agricoli Opportunità per la filiera europea e italiana Catalizzatore per l'innovazione energetica rurale

In sintesi, l'elettrificazione dei mezzi agricoli non è solo una misura di mitigazione climatica. Rappresenta un **fattore abilitante** della modernizzazione del sistema agricolo, capace di **coniugare sostenibilità ambientale, efficienza produttiva e innovazione industriale**, contribuendo alla costruzione di un'agricoltura italiana ed europea più resiliente, digitale ed energeticamente autonoma.

# Benefici ambientali

## Riduzione delle emissioni di gas serra e degli inquinanti locali

La sostituzione dei motori endotermici con sistemi di trazione elettrica consente di **eliminare le emissioni** dirette di **CO<sub>2</sub>, NOx e particolato** generate durante le lavorazioni agricole. Tale riduzione è particolarmente rilevante nei **contesti rurali e periurbani** dove le attività agricole contribuiscono alle emissioni diffuse.

## Riduzione dell'impatto acustico e vibrazionale

I macchinari elettrici operano con **livelli di rumore nettamente inferiori** (solitamente < 70 dB) e con **vibrazioni molto ridotte**, riducendo il disturbo nei pressi di abitazioni, allevamenti e **aree sensibili**. L'assenza di fumi e rumore è particolarmente vantaggiosa nelle stalle, nelle serre e nelle aziende biologiche.

## Riduzione dell'uso diretto e della dipendenza dai combustibili fossili

L'adozione di mezzi agricoli elettrici consente di ridurre l'impiego diretto di combustibili fossili nelle attività agricole, trasferendo il fabbisogno energetico **dal carburante al vettore elettrico** e attenuando gli **impatti ambientali** associati alla filiera dei combustibili. Tale beneficio può risultare ulteriormente amplificato qualora l'energia elettrica utilizzata per la ricarica provenga, anche parzialmente, da **fonti rinnovabili**.



# Benefici di efficienza energetica e operativa

## Efficienza energetica superiore

I motori elettrici raggiungono **rendimenti superiori al 90%**, rispetto al 35–40% tipico dei motori tradizionali. L'assenza di trasmissioni complesse e di meccanismi idraulici ad alta pressione **riduce drasticamente le perdite di energia**.

## Accumulo locale e autonomia energetica

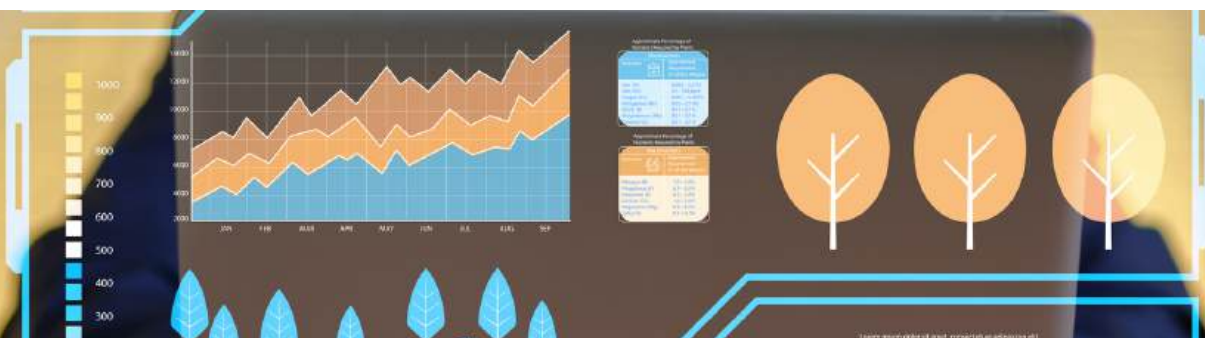
I mezzi elettrici dotati di **sistemi V2G o V2F** possono integrarsi con smart grid aziendali, trasformandosi in **unità mobili di accumulo** e diventando un elemento strategico per la **gestione intelligente dell'energia** all'interno dell'azienda.

## Maggiore efficienza e precisione operativa

La **disponibilità immediata di coppia** motore e il **controllo elettronico** di potenza, velocità e direzione tipici dei mezzi elettrici permettono un'elevata **precisione** nelle manovre, una maggiore **stabilità** nei cicli di lavoro e una gestione più accurata, anche automatizzata, degli attrezzi, migliorando la **qualità** del lavoro e **riducendo gli sprechi** energetici.

## Maggiore affidabilità e minori fermo macchina non programmati

La **semplicità** del powertrain elettrico e l'assenza di sistemi idraulici complessi riducono la possibilità di **guasti**, diminuiscono la necessità di **interventi** manutentivi ed evitano tempi di **fermo macchina non programmati**.



# Benefici economici

## Competitività economica rispetto ai mezzi tradizionali

Nonostante un **prezzo d'acquisto superiore**, i mezzi agricoli elettrici risultano economicamente **competitivi** grazie a **costi operativi inferiori** rispetto alle soluzioni tradizionali, in particolare per la riduzione delle **spese energetiche** e di **manutenzione**. Il **vantaggio economico** tende a emergere nel medio periodo, generalmente **entro 5-8 anni** di utilizzo, ma può variare in funzione delle caratteristiche del mezzo, della frequenza e intensità delle lavorazioni, del costo dell'energia e della disponibilità di incentivi all'acquisto. La convenienza economica dell'elettrico può emergere in **tempi più brevi** quando si integra l'utilizzo di **energia autoprodotta** per ricaricare i mezzi. Nel caso dei **robot agricoli autonomi** che sostituiscono macchinari tradizionali e consentono una significativa riduzione dell'impiego di **manodopera**, la convenienza economica dell'investimento può essere raggiunta, in linea generale, già **entro 2-3 anni** di utilizzo.

## Allineamento con politiche di transizione e accesso a incentivi

L'elettrificazione dei mezzi agricoli è **coerente con il quadro normativo** europeo e nazionale in materia di **decarbonizzazione** (es. Green Deal europeo, pacchetto "Fit for 55", PNIEC, ecc.) e può favorire l'accesso a misure di **sostegno pubblico**, tra cui incentivi economici (come contributi e crediti d'imposta) e strumenti finanziari agevolati (finanziamenti dedicati, garanzie, leasing per la transizione energetica, ecc.).



# Ulteriori benefici dell'adozione

## Miglioramento delle condizioni di lavoro

L'assenza di **emissioni, rumore** e **vibrazioni** contribuisce in modo significativo a migliorare il **comfort operativo** e la **sicurezza** degli addetti, soprattutto nelle attività svolte in stalla, in serra o in presenza di animali. Inoltre, l'impiego di sistemi avanzati di **assistenza alla guida**, di **sensori** di prossimità e del **controllo digitale** degli attrezzi, spesso integrati nelle piattaforme elettriche, consente di ridurre sensibilmente il **rischio di incidenti** sul lavoro.

## Abilitazione all'automazione e all'agricoltura 4.0

La trazione elettrica rappresenta una **piattaforma tecnica particolarmente adatta** all'integrazione delle tecnologie di precisione proprie **dell'agricoltura 4.0**, quali sensori digitali, attuatori elettronici, sistemi di navigazione autonoma e algoritmi di intelligenza artificiale, favorendo lo sviluppo di **sistemi nativamente predisposti** all'automazione delle operazioni agricole.

## Implicazioni indirette sulla formazione dei prezzi dei prodotti agricoli

L'elevata **efficienza** dei sistemi di trazione elettrica rispetto ai motori endotermici consente di **ridurre il fabbisogno energetico** per unità di lavoro svolto. Questo si traduce in **minori costi operativi**, legati sia ai consumi energetici sia alla manutenzione, e in una **maggiore prevedibilità** della spesa nel tempo. La riduzione dell'utilizzo di gasolio attenua inoltre l'esposizione delle aziende agricole alla **volatilità dei prezzi dei combustibili fossili**, una delle principali fonti di incertezza economica del settore. Nel medio periodo, tali dinamiche possono contribuire a una maggiore **stabilità dei costi di produzione**, con possibili effetti positivi sulla **competitività aziendale** e, in specifici contesti di filiera, sulla **formazione dei prezzi** dei prodotti agricoli.

## Opportunità per la filiera europea e italiana

La transizione energetica apre un **nuovo mercato** per la componentistica ad alto valore aggiunto (motori, inverter, batterie, ecc.), promuovendo la **localizzazione** di una parte della produzione in Europa, si favorisce la **crescita** della **filiera nazionale** e la creazione di **nuove specializzazioni** tecnologiche.

## Catalizzatore per l'innovazione energetica rurale

L'elettrificazione dei mezzi agricoli favorisce l'evoluzione dei **sistemi energetici rurali** e ha il potenziale di **accelerare l'integrazione** tra trazione elettrica, soluzioni digitali, smart grid e comunità energetiche. Questo processo abilita **nuovi modelli** aziendali basati su maggiore **autonomia energetica**, gestione intelligente dei carichi e **diversificazione** delle attività, rafforzando al contempo la **resilienza** economica e l'innovazione **territoriale**.



## FOCUS: ANALISI CONVENIENZA ECONOMICA DELL'ELETTRICO

Per verificare quanto emerso dalla **ricerca bibliografica**, è stato realizzato un **modello semplificato** di confronto delle principali voci di costo di proprietà, con l'obiettivo di **stimare il break-even point**, inteso come il momento temporale in cui i costi cumulati del mezzo elettrico eguagliano quelli del mezzo tradizionale, oltre il quale la soluzione elettrica risulta **economicamente più conveniente**.

L'analisi è sviluppata su **due casi specifici**: il primo confronta un **trattore utility elettrico** con il suo equivalente diesel; il secondo confronta un **robot autonomo mobile** con un trattore compatto diesel e con la manodopera che l'impiego del robot sarebbe in grado di ridurre.

**CASO # 1:** Confronto tra i **principali costi** cumulati di proprietà di un **trattore utility full-electric** e quelli del suo **equivalente diesel**, considerando un utilizzo annuo medio di **600 ore**.

L'analisi condotta per questo scenario consente di stimare il raggiungimento del **break-even point** dopo circa **5 anni** di utilizzo del mezzo elettrico.

Tale risultato risulta coerente con quanto riportato in **letteratura**, dove i valori del **punto di pareggio economico** variano generalmente tra **5 e 8 anni**, a seconda delle caratteristiche dei macchinari considerati, della frequenza e dell'intensità delle lavorazioni, del costo dell'energia e della disponibilità di incentivi all'acquisto.

Voce di costo	Trattore Utility Diesel	Trattore Utility Full-Electric
Prezzo d'acquisto	50.000,00 €	90.000,00 €
Consumo energia / ora (in lt o kWh)	13	23
Consumo energetico annuo (in lt o kWh)	7800	13.800
Costo energetico annuo	9.360,00 €	3.174,00 €
Costo medio manutenzione / anno	2.500,00 €	1.000,00 €
Stima tasse e assicurazioni / anno	600,00 €	600,00 €
Costo totale annuo	12.460,00 €	4.774,00 €
<b>Break-even point (anni)</b>		<b>5,20</b>
Prezzo medio lt gasolio agricolo	<b>1,20 €</b>	
Prezzo medio kWh	<b>0,23 €</b>	
Ore annue di utilizzo	<b>600</b>	



## FOCUS: ANALISI CONVENIENZA ECONOMICA DELL'ELETTRICO

**CASO # 2:** Confronto tra i **principali costi** cumulati di proprietà di un **robot autonomo mobile full-electric** e quelli legati ad un **trattore compatto diesel** di alta gamma sommati al costo di **manodopera** che l'impiego del robot sarebbe in grado di ridurre.

Per questo scenario è stata considerata la lavorazione annua di **150 ettari**, e la capacità del robot di ridurre l'impiego di **un'unità lavorativa anno (ULA)** con **retribuzione annua lorda (RAL)** stimata pari a **25.000€**.

L'analisi condotta per questo scenario consente di stimare il raggiungimento del **break-even point entro 3 anni** di utilizzo del robot autonomo mobile.

Tale risultato risulta coerente con quanto riportato in **letteratura**, dove i valori del **punto di pareggio economico** variano generalmente **tra 2 e 3 anni**, a seconda delle caratteristiche dei macchinari selezionati, della frequenza e intensità delle lavorazioni, del costo dell'energia, del costo della manodopera e della disponibilità di incentivi all'acquisto.

Voce di costo	Trattore Compatto Diesel + Operatore Specializzato	Robot Autonomo Mobile Full-Electric
Prezzo d'acquisto	48.000,00 €	125.000,00 €
Consumo energia / ora (in lt o kWh)	13	10
Consumo energetico annuo (in lt o kWh)	1.950	1.500
Costo energetico annuo	2.340,00 €	345,00 €
Costo medio manutenzione / anno	1.500,00 €	2.000,00 €
Stima tasse e assicurazioni / anno	200,00 €	0,00 €
Costo totale annuo	29.040,00 €	2.345,00 €
<b>Break-even point (anni)</b>		<b>2,88</b>
Prezzo medio lt gasolio agricolo	<b>1,20 €</b>	
Prezzo medio kWh	<b>0,23 €</b>	
Ettari lavorati / anno	<b>150</b>	
Costo operatore (RAL)	<b>25.000,00 €</b>	



## FOCUS: INCENTIVI ECONOMICI ADATTI ALL'ACQUISTO DI MEZZI AGRICOLI ELETTRICI

In Italia attualmente **non è previsto un incentivo nazionale specificamente dedicato** ai mezzi agricoli elettrici. Il loro acquisto può tuttavia essere sostenuto attraverso una **combinazione di strumenti** fiscali, contributivi e finanziari, che rendono l'elettrico ammissibile in modo diretto o indiretto.

Tra gli strumenti nazionali, il **Piano Transizione 5.0** riconosce un **credito d'imposta** per investimenti in **beni strumentali** interconnessi inseriti in progetti che comportano una **riduzione misurabile dei consumi energetici**. In modo analogo, il credito d'imposta per **beni strumentali 4.0** è applicabile a macchine e veicoli agricoli dotati di requisiti di **automazione e interconnessione**, indipendentemente dalla tecnologia di trazione.

Dal **2026**, la **Legge di Bilancio** ha introdotto un regime di **iperammortamento** (libero ammortamento maggiorato) per i **beni strumentali** nuovi, che consente una **deduzione fiscale** maggiorata del costo del bene. I mezzi agricoli elettrici possono beneficiarne se qualificabili come **beni ammortizzabili** utilizzati nell'attività d'impresa; si tratta di un incentivo fiscale indiretto, non legato allo zero emission in quanto tale.

Tra i contributi a **fondo perduto**, il **Bando ISI INAIL – Agricoltura** sostiene il **rinnovamento del parco macchine** per finalità di **sicurezza**, con aliquote fino al 65-80%, rendendo ammissibili anche mezzi elettrici se coerenti con gli obiettivi del bando.

Un ruolo complementare è svolto dagli strumenti di **finanza agevolata**. **L'ISMEA** può finanziare mezzi agricoli elettrici nell'ambito di progetti di **innovazione** o **sviluppo aziendale**, mentre la **Nuova Sabatini** riduce il costo del capitale tramite un **contributo sugli interessi** per l'acquisto di **beni strumentali** nuovi.

Un ruolo centrale è svolto dai **Programmi regionali PAC/CSR** Complemento Sviluppo Rurale 2023-2027, attuati nell'ambito della Politica Agricola Comune, rappresentano il canale in cui più frequentemente i **mezzi agricoli a zero emissioni** sono esplicitamente ammessi, seppur con criteri e intensità di aiuto variabili a livello territoriale.

A **livello europeo**, oltre alla PAC, non sono previsti incentivi diretti all'acquisto di mezzi agricoli elettrici. Tuttavia, **iniziative strategiche** come il **Clean Industrial Deal** e i programmi di ricerca e innovazione (es. **Horizon Europe**, **LIFE Programme**) contribuiscono indirettamente a sostenere la diffusione delle tecnologie elettriche lungo la filiera industriale.

# FATTORI CRITICI DELL'ADOZIONE DEI MEZZI AGRICOLI ELETTRICI

# 7



# Fattori critici dell'adozione dei mezzi agricoli elettrici

Nonostante i **progressi** compiuti dalla **ricerca** e dalla **sperimentazione** industriale, la **diffusione** su larga scala dei mezzi agricoli full-electric procede ancora con lentezza. Le ragioni di questa diffusione ancora **limitata** sono molteplici e riguardano aspetti tecnologici, operativi ed economici. Di seguito, vengono esaminati i principali **fattori che ostacolano l'adozione** delle soluzioni elettriche in agricoltura, con l'obiettivo di individuare le condizioni necessarie per superare le **attuali barriere** e accompagnare il settore verso un **percorso di transizione progressivo, competitivo e sostenibile**.

Tipologia di Fattori	Descrizione
Tecnologici	<ul style="list-style-type: none"> <li>Densità energetica delle batterie</li> <li>Tempi di ricarica elevati</li> <li>Impatto delle temperature estreme sulle batterie</li> <li>Peso del mezzo e impatto sul suolo</li> </ul>
Operativi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Esigenze di potenza e continuità operativa</li> <li>Considerazioni di sicurezza per l'alta tensione</li> <li>Supporto manutentivo non ancora capillare</li> </ul>
Economici	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prezzo d'acquisto superiore rispetto ai mezzi tradizionali</li> <li>Investimenti paralleli necessari</li> <li>Considerazioni relative alla sostituzione del pacco batterie</li> <li>Convenienza economica variabile in base all'impiego</li> <li>Economia di scala limitata</li> </ul>

Nel complesso, la **diffusione** delle soluzioni elettriche rappresenta un obiettivo raggiungibile solo attraverso una **visione di lungo periodo** e un **impegno condiviso** tra produttori, istituzioni e imprese agricole. Le **criticità** oggi presenti non devono essere interpretate come un freno al cambiamento, ma come una **fase naturale di maturazione tecnologica e organizzativa**. La progressiva **evoluzione delle batterie**, l'ampliamento delle **infrastrutture di ricarica** e lo sviluppo di **modelli di utilizzo più flessibili** potranno rendere l'elettrificazione una scelta sempre più concreta anche nelle attività agricole di maggiore intensità. La sfida consiste nel **trasformare le attuali limitazioni in opportunità di innovazione**, favorendo un equilibrio tra sostenibilità ambientale, efficienza operativa e competitività economica delle imprese del settore.

# Fattori tecnologici

## Densità energetica delle batterie

L'attuale **tecnologia** delle batterie **non consente ancora** di garantire un'autonomia sufficiente per le **lavorazioni agricole più intensive** e prolungate (es. aratura, trasporto pesante, ecc.). La **densità energetica** delle batterie è nettamente inferiore a quella dei combustibili fossili, imponendo pacchi batteria molto voluminosi e pesanti che incidono negativamente sul **prezzo d'acquisto**, sul baricentro e sulla **manovrabilità** del mezzo.

## Tempi di ricarica elevati

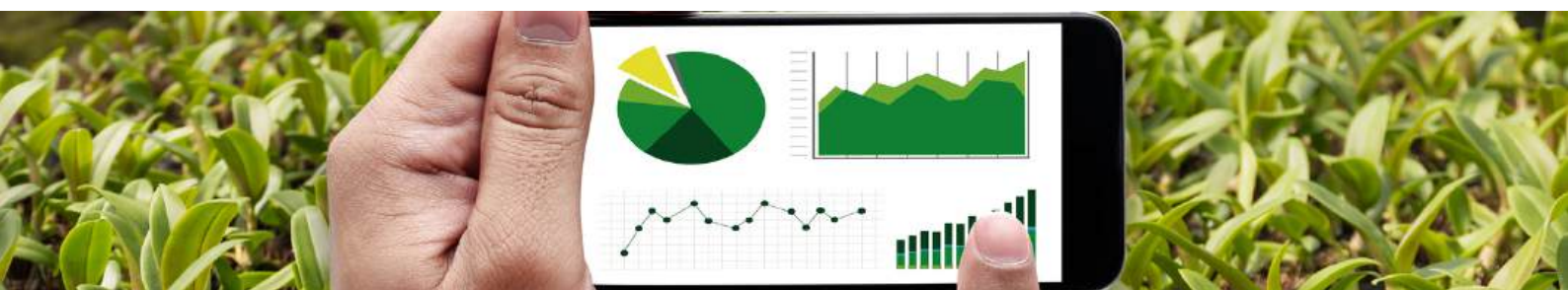
In comparazione con i tempi necessari per realizzare il tradizionale rifornimento di carburante, la ricarica del mezzo elettrico richiede **tempi superiori** che variano da 1 a 3 ore con sistemi di ricarica rapida e che arrivano a superare le 8 ore per la ricarica standard, **limitando il funzionamento continuo** in fasi critiche del ciclo colturale.

## Impatto delle temperature estreme sulle batterie

Le **prestazioni** delle batterie sono **sensibili alle condizioni climatiche estreme**. L'esposizione prolungata a temperature elevate, tipicamente **superiori a 35 °C**, accelera i fenomeni di **degradazione** elettrochimica, riducendo nel tempo la **capacità** e la **vita utile** della batteria. A basse temperature, in particolare prossime o **inferiori a 0 °C**, si osserva una **riduzione temporanea della capacità** disponibile, un aumento della resistenza interna e un peggioramento delle prestazioni di potenza; inoltre, i **tempi di ricarica** si allungano e possono essere **limitati** dai sistemi di gestione della batteria.

## Peso del mezzo e impatto sul suolo

L'aggiunta di **batterie** incrementa significativamente la **massa del mezzo**, aumentando la **compattazione del suolo** comportando effetti indesiderati per gli agricoltori (es. minore penetrazione dell'acqua piovana, sviluppo limitato e irregolare delle radici, minore attività dei microorganismi benefici, ecc.)



# Fattori operativi

## Esigenze di potenza e continuità operativa

Le lavorazioni di pieno campo richiedono **potenze elevate** e lunghi tempi di **operatività continuativa**, condizioni che allo stato attuale risultano **difficili da soddisfare** con sistemi full-electric. Per questo motivo alcune soluzioni oggi in sviluppo prevedono **configurazioni ibride** come **fase transitoria** verso la piena elettrificazione. Parallelamente, diversi costruttori stanno sperimentando **sistemi di battery swap**, che consentono la sostituzione rapida della batteria scarica con una già carica, **evitando tempi di fermo** e mantenendo la continuità del ciclo di lavoro

## Considerazioni di sicurezza per l'alta tensione

L'integrazione di sistemi ad alta tensione sui mezzi agricoli richiede l'introduzione di **protezioni specifiche** contro il **contatto accidentale**, con nuove considerazioni in ambito di progettazione e manutenzione. I sistemi ad alta tensione introducono **nuove complessità di progettazione, manutenzione e sicurezza**, con requisiti normativi stringenti.

## Supporto manutentivo non ancora capillare

La scarsità di **professionisti qualificati** per la manutenzione dei sistemi elettrici agricoli rappresenta una limitazione operativa significativa. In caso di guasti, i **tempi di fermo macchina** potrebbero prolungarsi considerevolmente rispetto ai mezzi tradizionali, con impatti diretti sulla **produttività** aziendale.



# Fattori economici

## Prezzo d'acquisto superiore rispetto ai mezzi tradizionali

In linea generale, i mezzi agricoli elettrici presentano un prezzo d'acquisto **sensibilmente superiore** rispetto ai corrispondenti modelli tradizionali, principalmente a causa del **costo delle batterie e dell'elettronica di potenza**. Sebbene i **costi operativi risultino inferiori** nel lungo periodo, l'investimento iniziale rappresenta una barriera economica significativa, soprattutto per le piccole e medie aziende agricole caratterizzate da margini ridotti.

## Investimenti paralleli necessari

L'adozione dei mezzi agricoli elettrici può richiedere **investimenti complementari**, in particolare per **infrastrutture** di ricarica e per l'adeguamento della **connessione elettrica** aziendale, spesso necessaria in quanto le reti di distribuzione nelle aree agricole sono tradizionalmente progettate per carichi modesti. Inoltre, per alcuni macchinari possono aggiungersi spese legate ad **abbonamenti software**, servizi di supporto e aggiornamenti funzionali.

## Considerazioni relative alla sostituzione delle batterie

La sostituzione del pacco batterie rappresenta attualmente una **voce di costo significativa** per i mezzi elettrici e contribuisce a generare **incertezza negli acquirenti**, in particolare in relazione alla prevedibilità degli oneri associati alla sostituzione nel medio-lungo periodo. Tale criticità è tuttavia **destinata ad attenuarsi** grazie al **progresso tecnologico**, al rafforzamento delle **economie di scala**, allo sviluppo di filiere di **seconda vita e riciclo** e alla progressiva diffusione di soluzioni modulari e standardizzate, che potranno favorire l'estensione della vita operativa dei mezzi con condizioni economiche più favorevoli.

## Convenienza variabile in base all'impiego

I benefici economici risultano maggiormente evidenti nei contesti di **colture specializzate**, quali frutteti e vigneti, mentre tendono a ridursi nelle **lavorazioni più gravose** e ad alta richiesta di **potenza**. Inoltre, un numero limitato di **ore di utilizzo** annue può incidere negativamente sui tempi di recupero dell'investimento, riducendone l'attrattività economica complessiva.

## Economia di scala limitata

La produzione su **volumi ancora ridotti**, unita a una **domanda di mercato** non sufficientemente consolidata, impedisce il pieno sfruttamento delle economie di scala, contribuendo al mantenimento di **elevati costi di sviluppo, industrializzazione e produzione**.

# OPPORTUNITÀ PER L'ITALIA

# 8



# Opportunità per l'Italia

L'**elettrificazione** dei macchinari e veicoli impiegati in ambito agricolo rappresenta per l'Italia una **prospettiva strategica** capace di coinvolgere l'intero sistema agroindustriale, rafforzando al tempo stesso la **competitività** delle aziende agricole e lo **sviluppo** della filiera tecnologica nazionale.

Le **opportunità** che emergono da questa transizione si articolano lungo **due direttrici** principali. Da una parte vi sono le **caratteristiche strutturali** del contesto agricolo italiano, che offrono **condizioni favorevoli** all'adozione di soluzioni elettriche; dall'altra vi sono le **sinergie** che questo processo può attivare tra agricoltura, industria, energia e innovazione, amplificando i **benefici** per il sistema produttivo nel suo complesso.

**Un settore agricolo forte e diversificato come base per l'elettrificazione**

**Una filiera industriale avanzata e potenzialmente leader in Europa**

**Possibilità di integrazione tra rinnovabili, accumulo e mezzi elettrici**

**L'elettrificazione come acceleratore della digitalizzazione, della robotica e dell'automazione**

**Contributo strategico alla decarbonizzazione nazionale**

**Vantaggi economici per le aziende e nuove forme di competitività**



# Opportunità per l'Italia

## Un settore agricolo forte e diversificato come base per l'elettrificazione

L'agricoltura italiana rappresenta uno dei pilastri dell'economia nazionale e offre un **contesto favorevole** allo sviluppo dei mezzi agricoli elettrici. La presenza di **comparti ad alto valore aggiunto** come frutticoltura, orticoltura e vitivinicolo, insieme a un **tessuto imprenditoriale diffuso** e capace di **adattarsi ai cambiamenti**, costituisce una base solida per l'adozione di soluzioni innovative.

Negli ultimi anni il settore ha rafforzato l'attenzione verso **qualità, sostenibilità ed efficienza** nell'impiego degli input produttivi, mostrando una crescente **apertura all'innovazione** tecnologica. In questo percorso evolutivo l'elettrificazione dei mezzi agricoli può contribuire a **migliorare la gestione** operativa delle aziende, ridurre la **dipendenza energetica** e rendere più stabile il rapporto tra costi di esercizio e **redditività**.

La maggiore **sensibilità ambientale** e la necessità di affrontare la **volatilità dei prezzi dell'energia** rendono la transizione elettrica **coerente con le esigenze** delle imprese agricole italiane. L'integrazione dei mezzi elettrici nei processi produttivi può **rafforzare la resilienza** del settore e consolidare un **modello di sviluppo** orientato alla qualità e alla sostenibilità.

## Una filiera industriale avanzata e potenzialmente leader in Europa

L'Italia ospita una **filiera** della meccanizzazione agricola e della componentistica tecnologica **tra le più avanzate** in Europa. Il sistema produttivo nazionale vanta **competenze consolidate** nella progettazione e produzione di motori elettrici, elettronica di potenza, sistemi di controllo, trasmissioni meccatroniche e attrezzature agricole specializzate. Questo ecosistema, concentrato in **distretti ad alta intensità tecnologica** come Emilia Romagna, Veneto e Piemonte, rappresenta un **vantaggio competitivo** rilevante per lo sviluppo e l'industrializzazione della trazione elettrica in ambito agricolo.

Le imprese italiane attive nella componentistica per veicoli **off-highway** e macchinari industriali hanno già maturato competenze significative nell'elettrificazione, anche grazie alle **sinergie** con settori come **automotive** e **robotica**. L'integrazione tra powertrain elettrici, sistemi digitali e automazione consente alla filiera nazionale di ambire a un **ruolo di riferimento europeo** nello sviluppo di soluzioni elettrificate per l'agricoltura, sostenendo la crescita industriale e l'export di tecnologie ad **alto valore aggiunto**.

La **solidità della base industriale** non si traduce però automaticamente in una rapida **diffusione** delle soluzioni elettriche sul mercato interno. La domanda domestica resta **condizionata da variabili** economiche e infrastrutturali, oltre che dalla **frammentazione** del tessuto agricolo nazionale. La capacità produttiva costituisce quindi una **condizione necessaria, ma non sufficiente**, per un'adozione ampia e strutturale delle tecnologie elettriche.

# Opportunità per l'Italia

Possibilità di integrazione tra rinnovabili, accumulo e mezzi elettrici

Il settore agricolo italiano è già oggi **tra i principali utilizzatori** di impianti fotovoltaici e di sistemi di generazione distribuita nelle aree rurali. La crescente diffusione di **impianti rinnovabili**, l'espansione delle **comunità energetiche** e l'utilizzo di **sistemi di accumulo** elettrico offrono un **contesto particolarmente favorevole** all'introduzione dei mezzi agricoli elettrici.

L'eletttrificazione consente infatti di **valorizzare direttamente l'energia autoprodotta**, riducendo la dipendenza da fonti fossili e migliorando la resilienza energetica delle aziende. L'integrazione tra mezzi elettrici, sistemi di gestione intelligente e smart grid rurali permette di **ottimizzare l'uso dell'energia** in azienda, **stabilizzare i consumi** e **ridurre strutturalmente i costi** operativi.

Questo approccio risulta coerente con le raccomandazioni internazionali sulla **transizione agricola sostenibile**, che indicano la riduzione dell'uso di carburanti fossili e l'adozione di tecnologie a emissioni ridotte come **leve essenziali** per incrementare **l'efficienza ambientale** dell'agricoltura.

L'eletttrificazione come acceleratore della digitalizzazione, della robotica e dell'automazione

**L'eletttrificazione** dei mezzi agricoli **facilita la diffusione di tecnologie digitali e robotiche** nei **processi produttivi**, poiché i powertrain elettrici consentono un controllo più preciso e modulabile della potenza, **abilitando funzionalità avanzate** come la guida assistita, l'automazione delle attrezzature e il monitoraggio continuo dei parametri operativi.

Le piattaforme elettriche costituiscono la **base tecnica naturale per l'evoluzione dei robot** agricoli autonomi e delle **tecnologie di precisione**, in forte crescita nei settori a elevata **specializzazione** come viticoltura e frutticoltura. I sistemi elettrici consentono un'integrazione più semplice con la sensoristica di campo, le reti IoT e gli algoritmi di analisi avanzata, contribuendo a migliorare la **produttività**, la **sostenibilità** ambientale e **l'efficienza** dell'uso delle risorse.

Per un Paese come l'Italia, caratterizzato da colture pregiate, superfici frammentate e forte richiesta di interventi ad alta precisione, l'eletttrificazione rappresenta quindi una **leva strategica** per accelerare la transizione verso **modelli produttivi** basati sulla robotica e sull'agricoltura di precisione.



# Opportunità per l'Italia

## Contributo strategico alla decarbonizzazione nazionale

Il **settore agricolo e le macchine mobili non stradali** rientrano tra i comparti soggetti agli **obiettivi di riduzione** previsti dal regolamento europeo **Effort Sharing Regulation**, che impone all'Italia un significativo **contenimento delle emissioni** entro il 2030. In questo contesto, la diffusione dei mezzi agricoli elettrici può contribuire al raggiungimento dei **target nazionali** attraverso la riduzione delle emissioni dirette di **CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e PM** legate all'uso di trattori e macchinari diesel. L'elettrificazione favorisce inoltre una **maggiore integrazione** dell'agricoltura nelle strategie di **decarbonizzazione**, valorizzando **fonti rinnovabili, autoproduzione energetica e comunità energetiche rurali**. In uno scenario nazionale ancora critico rispetto agli obiettivi climatici europei, la riduzione delle emissioni agricole rafforza il contributo dei settori non ETS al conseguimento dei target di medio termine. Pur incidendo su una quota limitata delle emissioni complessive, l'elettrificazione dei mezzi assume un **valore strategico** poiché riduce le emissioni locali, migliora la **qualità dell'aria** nelle aree rurali e **abilita modelli integrati** tra mobilità elettrica agricola, produzione rinnovabile e gestione intelligente dell'energia, con effetti che vanno **oltre il solo impatto emissivo diretto**.

## Vantaggi economici per le aziende e nuove forme di competitività

**Oltre ai benefici ambientali**, l'elettrificazione dei mezzi agricoli offre importanti **opportunità economiche** per le imprese italiane. I **costi operativi** dei mezzi elettrici possono risultare inferiori a quelli dei mezzi tradizionali grazie alla maggiore **efficienza energetica**, alla **ridotta manutenzione** e alla possibilità di utilizzare **energia autoprodotta a costi competitivi**. Inoltre, l'elettrificazione può incentivare forme di **innovazione organizzativa** e di **cooperazione** tra imprese, come la **condivisione delle risorse** energetiche e delle infrastrutture di ricarica, con potenziali ricadute positive sulla **sostenibilità economica e ambientale** del sistema agricolo nazionale.



# CONSIDERAZIONI FINALI

## 9



# Considerazioni finali

L'**elettrificazione** dei mezzi agricoli rappresenta una **traiettoria di innovazione** ancora **emergente ma strategica**, per il futuro del sistema agricolo italiano ed europeo. Dall'analisi condotta emerge come questa transizione non debba essere interpretata come una semplice sostituzione tecnologica dei motori tradizionali, bensì come parte di un **processo più ampio di modernizzazione** dell'agricoltura, in cui convergono **decarbonizzazione, digitalizzazione e riorganizzazione dei sistemi energetici** rurali.

Lo studio evidenzia che l'elettrificazione dei mezzi impiegati in ambito agricolo trova una **prima applicazione** nei segmenti a **potenza contenuta** e nei contesti operativi caratterizzati da **cicli di lavoro prevedibili**. I principali ambiti applicativi riguardano le **colture specializzate, le attività zootecniche e la movimentazione aziendale**, dove la tecnologia elettrica consente già oggi di ottenere **vantaggi** concreti in termini di **efficienza** operativa, riduzione dei **costi** di esercizio, abbattimento delle **emissioni** locali e miglioramento delle **condizioni di lavoro**.

Permangono tuttavia **vincoli tecnologici ed economici** legati all'autonomia energetica, ai **tempi di ricarica**, agli **investimenti iniziali** e all'adeguamento delle **infrastrutture rurali**. La diffusione su larga scala richiede pertanto un **percorso progressivo** e pragmatico, nel quale l'elettrificazione si integri, soprattutto nel breve e medio periodo, con **altre soluzioni di transizione**, come l'ibridizzazione, e con l'ottimizzazione dei sistemi di meccanizzazione esistenti.

Un elemento di particolare rilevanza riguarda il **valore sistemico** dell'elettrificazione quando inserita in un quadro di **integrazione energetica** aziendale e territoriale. In tale prospettiva, i mezzi elettrici non costituiscono soltanto strumenti operativi, ma diventano componenti di un **modello agricolo più resiliente**, meno dipendente dai combustibili fossili e potenzialmente più **competitivo**.

L'Italia dispone di **condizioni favorevoli** per accompagnare questa evoluzione, grazie a un **settore agricolo diversificato**, a una **filiera industriale avanzata** nella meccanica e nella componentistica e a **competenze consolidate** nei processi di innovazione tecnologica. Valorizzare questi punti di forza richiede tuttavia una **visione coordinata**, che coinvolga **politiche industriali, strumenti di incentivazione, sperimentazione** sul campo e **accompagnamento** delle imprese agricole nel percorso di **innovazione**.

In definitiva, l'elettrificazione dei mezzi agricoli **non rappresenta una soluzione immediata e universale, ma una leva strategica** di medio-lungo periodo per rendere l'agricoltura più **sostenibile, efficiente** e integrata nella **transizione energetica**. Il suo successo dipenderà dalla capacità di costruire un **quadro abilitante** stabile, in cui tecnologia, infrastrutture, modelli economici e politiche pubbliche evolvano in modo coerente, **trasformando una sfida complessa in un'opportunità** concreta per il sistema agricolo e industriale nazionale.

**MOTUS** 