

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Percorso ICT e data analytics per il management



Tesi di Laurea di II livello

TECNOLOGIE 4.0 IN AGRICOLTURA: VALUTAZIONE ECONOMICO-FINANZIARIA DEGLI INVESTIMENTI IN UN CASO STUDIO AZIENDALE

Relatore:

Prof. Matteo Tubiana

Correlatore:

Prof. Danilo Demarchi

Candidato:

Alex Chiappero

Anno Accademico 2025-2026

RINGRAZIAMENTI

Con profonda riconoscenza desidero rivolgere un sentito ringraziamento ai professori Matteo Tubiana e Danilo Demarchi per il prezioso sostegno offertomi lungo l'intero percorso di tesi: la loro costante disponibilità, la premura con cui mi hanno seguito durante l'evoluzione del lavoro e soprattutto la fiducia accordatami hanno rappresentato per me un punto di riferimento fondamentale, sia sotto il profilo accademico sia umano.

Sono loro particolarmente grato per avermi dato l'opportunità di sviluppare un elaborato improntato sull'agricoltura, tema che percepisco profondamente mio. Nonostante tale materia non fosse pienamente legata al loro specifico ambito di competenza, hanno accolto con entusiasmo la mia proposta e mi hanno incoraggiato a trattare questo argomento coerente con le mie più autentiche passioni, permettendomi così di valorizzare e mettere a sistema un bagaglio di conoscenze ed esperienze che mi appartiene in prima persona.

A loro va, dunque, parte del merito di questo lavoro, frutto di un percorso fondato sul dialogo e sulla valorizzazione di un approccio interdisciplinare.

ABSTRACT

Il presente lavoro analizza la redditività degli investimenti in Agricoltura 4.0 realizzati presso la mia azienda agricola, la Cascina Sant'Anna, situata a Carmagnola (TO). L'obiettivo è quello di valutarne la sostenibilità economico-finanziaria nel medio-lungo periodo, esaminando l'essenzialità o meno degli incentivi fiscali concessi in merito.

Questo studio prende avvio dall'inquadramento dei principi teorici dell'Industria 4.0, ricostruendone lo sviluppo storico a partire dalla prima rivoluzione industriale sino all'attuale paradigma digitalizzato, in cui dominano interconnessione, integrazione dei sistemi e valorizzazione dei dati come fattore produttivo strategico. Un'attenzione particolare è dedicata all'analisi delle policy governative nazionali che, in seguito alle direttive europee mirate a promuovere la digitalizzazione dei processi produttivi, hanno proceduto allo stanziamento di fondi destinati al concepimento di strumenti agevolativi, quali il Piano Nazionale Industria 4.0, il Piano Transizione 4.0 ed il PNRR.

Col procedere della trattazione, il focus si sposta sull'Agricoltura 4.0 e sulle sue applicazioni nel campo delle pratiche agronomiche per la coltivazione di foraggi e cereali, così come nell'allevamento zootecnico destinato alla produzione di latte.

A tal proposito, il caso di studio sulla Cascina Sant'Anna si propone di esaminare ex-post una coppia di investimenti già sostenuti in precedenza, relativi all'acquisto di un trattore John Deere dotato di tecnologia 4.0 e all'introduzione di un robot di mungitura nel proprio allevamento, nonché l'implementazione ex-novo di un sistema di irrigazione completamente automatizzato. Per ciascun investimento è stata effettuata un'analisi economico-finanziaria che pondera costi e benefici legati all'operazione, attraverso la stima dei flussi di cassa attesi per l'intera vita utile dell'asset, per poi procedere con la misurazione di indicatori quali Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) e Discounted Payback Period (DPP), calcolati sia in presenza sia in assenza degli incentivi 4.0.

I risultati ottenuti intendono mostrare come l'adozione integrata di tecnologie digitali in agricoltura non rappresenti soltanto un miglioramento tecnico, ma un vero e proprio asset strategico, capace di garantire una profittabilità economica intrinseca. Alla luce di tali evidenze, emerge una riflessione critica sull'efficacia delle misure di sostegno pubblico agli investimenti 4.0, in quanto la titubanza nell'adozione di tali tecnologie non appare imputabile ad una scarsa redditività, bensì ad una limitata consapevolezza economico-gestionale da parte degli agricoltori.

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. INDUSTRIA 4.0.....	5
1.1 Dalla prima rivoluzione industriale all’Industria 4.0.....	5
1.2 I caratteri della trasformazione digitale	7
1.3 Le tecnologie abilitanti	11
1.3.1 Big Data Analytics	13
1.3.2 Internet Of Things.....	14
1.3.3 Robotica e Automazione avanzata	16
1.3.4 Additive Manufacturing	19
1.3.5 Integrazione verticale e orizzontale dei sistemi informativi.....	20
1.3.6 Cloud Computing.....	21
1.3.7 Cybersecurity	23
1.3.8 Simulazione, Realtà virtuale, Realtà aumentata	25
1.4 Il Piano Nazionale per l’Industria 4.0.....	30
1.4.1 Iper e superammortamento	32
1.4.2 Credito d’imposta R&S.....	33
1.4.3 Nuova Sabatini.....	34
1.4.4 Patent Box.....	34
1.4.5 Startup e PMI	35
1.4.6 Fondo di Garanzia PMI.....	36
1.4.7 Efficacia degli incentivi sulla decisione di investimento.....	36

1.5 Piano Transizione 4.0.....	38
1.6 Piano Transizione 5.0.....	41
2. AGRICOLTURA 4.0.....	43
2.1 Origini dell'agricoltura e i suoi sviluppi storici.....	43
2.2 La crisi del XXI secolo in Agricoltura.....	46
2.3 Dall'Industria 4.0 all'Agricoltura 4.0: la strategia per superare la crisi	48
2.4 Agricoltura di precisione	51
2.4.1 Sistema di guida satellitare	54
2.4.2 Mappatura digitale degli appezzamenti	57
2.4.3 Monitoraggio delle rese e analisi NIR	59
2.4.4 Attrezzature ISOBUS con dosaggio rateo variabile.....	61
2.5 Climate Smart Agriculture	62
2.6 IOT in Agricoltura	64
2.6.1 Smart irrigation	64
2.6.1.1 Progetto Wappfruit	65
2.6.1.2 Impianti pivot e rainger.....	68
2.7 L'innovazione digitale nell'allevamento zootecnico	70
2.7.1 Collari UHT per rilevazione calori e ruminazione.....	72
2.7.2 Robot di mungitura	73
2.7.3 Sistema di ventilazione automatizzato	76
2.7.4 Piattaforma Xfarm	77
3. CASO DI STUDIO: AGRICOLTURA 4.0 NELLA CASCINA SANT'ANNA	79
3.1 Introduzione all'azienda	79

3.2 Analisi AS IS.....	81
3.3 Analisi degli investimenti	83
3.3.1 Costi e benefici – Trattore John Deere.....	83
3.3.2 Calcolo NPV, DPP e IRR – Trattore John Deere	87
3.3.3 Costi e benefici – Robot di mungitura	93
3.3.4 Calcolo NPV, DPP, IRR – Robot di mungitura.....	97
3.4 Analisi TO BE.....	102
3.5 Impatto economico del nuovo sistema di irrigazione	105
Conclusioni e prospettive	112
Bibliografia.....	115
Sitografia	117

INTRODUZIONE

Il panorama industriale contemporaneo sta vivendo un intenso mutamento strutturale, definito comunemente come "Quarta Rivoluzione Industriale" o Industria 4.0. Tale paradigma non si limita a una mera evoluzione tecnologica, piuttosto rappresenta una riorganizzazione radicale dei processi produttivi, grazie all'integrazione di sistemi fisici e digitali per mezzo delle cosiddette tecnologie abilitanti, tra cui spiccano l'Internet of Things (IoT), i Big Data Analytics, il Cloud Computing e la robotica avanzata. Attualmente, parlare di Industria 4.0 significa riferirsi a un ecosistema complesso dove l'interconnessione e lo scambio di dati in tempo reale definiscono la competitività di ogni comparto produttivo.

Siccome gli strumenti innovativi promossi dall'Industria 4.0 come sensori, sistemi di monitoraggio, piattaforme computerizzate e automazione non sono utili soltanto nelle fabbriche, ma si adattano bene anche ai processi agricoli, vi è un nesso funzionale fra i principi dell'attuale rivoluzione industriale ed il settore primario. A tal proposito, nell'agricoltura e nella zootecnia si sta altresì attraversando una fase di profondo rinnovamento dei sistemi produttivi, meglio conosciuta come Agricoltura 4.0. La necessità di adottare tecnologie avanzate in questo ambito non risponde solo alle aspirazioni di maggiore produttività, bensì è dettata da sfide globali urgenti: il cambiamento climatico, la scarsità di risorse idriche e la competizione dei prodotti extra-UE impongono una gestione ottimizzata e sostenibile dei fattori produttivi.

In questo contesto, il ruolo delle politiche pubbliche diventa determinante: il passaggio dall'agricoltura tradizionale a quella di precisione richiede ingenti investimenti iniziali che possono rappresentare una barriera all'ingresso per le medio-piccole realtà imprenditoriali. Nel 2016 l'Italia ha pianificato un programma di sostegno finanziario per le aziende che decidevano di investire nella digitalizzazione dei sistemi produttivi, lanciando il Piano Nazionale per l'Industria 4.0 poi sostituito dal Piano Transizione 4.0, il quale è stato a sua volta recentemente affiancato dal Piano Transizione 5.0. Inoltre, hanno assunto una posizione rilevante anche le policy governative dell'Unione Europea, che hanno deliberato l'accantonamento di fondi detti Next generation EU, volti a rilanciare l'economia post-Covid-19 per mezzo di incentivi sugli investimenti che promuovono la transizione digitale. Il nostro paese è stato il principale beneficiario e per la distribuzione di questi capitali ha sviluppato il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che intende anch'esso supportare le imprese italiane in questo delicato processo evolutivo. Tutte queste iniziative

sono caratterizzate da un denominatore comune: l'introduzione di agevolazioni fiscali come il credito d'imposta e l'iperammortamento, seppur con svariate aliquote differenti, dell'imponibile delle fatture di acquisto dei beni oggetto di investimenti legati ad Industria 4.0, con l'obiettivo di sostenere il tessuto produttivo nel processo di ammodernamento tecnologico e riduzione dell'impatto ambientale.

La presente dissertazione si pone l'obiettivo di analizzare l'efficacia e la sostenibilità economica di questa trasformazione digitale e delle politiche fiscali connesse, attraverso un approccio teorico-pratico. In primo luogo, dopo una breve ricapitolazione storica dello sviluppo industriale avvenuto a partire dalla prima rivoluzione di fine '700 sino ad oggi, lo studio si concentra sulla disamina del Framework 4.0, delineando il contesto industriale nel quale si inseriscono le tecnologie abilitanti e il ruolo che queste hanno nel trasformare i processi produttivi tradizionali in chiave intelligente, flessibile e data-driven, senza tralasciare l'evoluzione normativa degli incentivi statali concessi in merito.

Il secondo capitolo approfondisce la declinazione di tali tecnologie nel settore agricolo e zootecnico, esaminando i più sofisticati sistemi di agricoltura di precisione: guida satellitare, mappatura digitale degli appezzamenti, distribuzione di sementi e fertilizzanti con dosaggio a rateo variabile e smart irrigation. Sono inoltre descritte nel dettaglio le innovazioni ed i metodi operativi che caratterizzano la robotica di mungitura all'interno dei moderni allevamenti bovini finalizzati alla produzione di latte, nei quali si può contemplare una vera e propria gestione efficiente della stalla grazie all'ausilio di piattaforme digitali come Xfarm.

Il caso di studio, che delinea il terzo ed ultimo capitolo, rappresenta il nucleo applicativo dell'elaborato, focalizzandosi sull'azienda agricola di proprietà della mia famiglia, la Cascina Sant'Anna. Per garantire il massimo rigore nell'analisi economico-finanziaria, tutte le informazioni quantitative relative a costi e benefici connessi agli investimenti, sono state estrapolate dalla consultazione diretta dei registri contabili e delle relative fatture: ogni parametro di costo, dagli oneri di manutenzione ai prezzi di acquisizione dei macchinari non è frutto di stime medie di settore ma è stato estratto meticolosamente dai documenti contabili, eccezion fatta per i prezzi dei vettori energetici, ossia gasolio agricolo ed energia elettrica, caratterizzati da un'elevata volatilità che ha reso impossibile stabilirne un trend certo per i prossimi anni. Dunque, per tali fattori si è proceduto a una stima prudenziale basata sulla serie storica dei dati a disposizione dell'azienda, mediando le fluttuazioni recenti per riflettere uno scenario di costo atteso che fosse il più realistico e coerente possibile con l'attuale contesto macroeconomico.

L'incrocio tra i dati di bilancio aziendali e i documenti di acquisto ha permesso di depurare l'analisi da potenziali distorsioni teoriche, offrendo una valutazione oggettiva dell'impatto degli incentivi fiscali sui flussi di cassa.

La trattazione del caso di studio si articola, dopo una breve introduzione all'azienda, in due fasi sequenziali. Inizialmente vi è un'analisi "AS-IS" in cui si descrive la situazione attuale dell'impresa, sulla base degli investimenti in Agricoltura 4.0 già effettuati negli ultimi anni e attualmente in fase di ammortamento, ovvero un trattore a guida assistita e un robot di mungitura, valutandone il reale impatto economico sul bilancio aziendale. Tramite la modellizzazione finanziaria basata su indicatori quali Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) e Discounted Payback Period (DPP), si cerca di quantificare non solo il ritorno economico diretto degli investimenti, ma anche il peso specifico degli incentivi statali sulla redditività del singolo progetto e sulle tempistiche di rientro del capitale investito.

Successivamente, la ricerca si spinge verso una fase propositiva illustrata nella sezione TO-BE, in cui è ipotizzata e modellizzata la realizzazione di un nuovo impianto di irrigazione intelligente completamente automatizzato nei terreni della Cascina Sant'Anna. L'architettura proposta si basa sull'integrazione delle soluzioni tecnologiche innovative sviluppate da un progetto coordinato dal Politecnico di Torino che mira ad applicare sistemi di sensoristica avanzata alla gestione delle risorse idriche in agricoltura, denominato Wappfruit, su una struttura in grado di modulare i volumi d'acqua erogati, come quella del pivot. L'obiettivo di tale implementazione non è soltanto il risparmio idrico, ma la creazione di un ecosistema interconnesso dove la somministrazione di acqua avvenga in modo variabile a seconda delle esigenze della pianta in quella specifica porzione di terreno, basandosi sui dati reali raccolti dai sensori distribuiti su tutta la superficie del campo.

Quest'ultima parte dell'elaborato mira a quantificare i benefici attesi in termini di efficienza operativa e sostenibilità ambientale, completando il quadro della trasformazione digitale dell'azienda.

In conclusione, la tesi intende dimostrare come l'integrazione tra competenze ingegneristico-gestionali e tecnologie digitali possa orientare le aziende agricole verso un modello di business resiliente, capace di coniugare redditività economica e sostenibilità operativa in risposta alle sfide del XXI secolo. In tale prospettiva, l'analisi quantitativa degli investimenti in soluzioni riconducibili al paradigma 4.0 ha evidenziato non solo un incremento

dell'efficienza operativa, ma anche una maggiore capacità di controllo dei costi, riduzione degli sprechi e ottimizzazione degli input produttivi.

Pertanto, si tratta di una trasformazione strutturale del settore, capace di incidere in modo significativo sull'organizzazione dei processi produttivi, sulla gestione delle risorse e sui modelli decisionali aziendali.

1. INDUSTRIA 4.0

1.1 Dalla prima rivoluzione industriale all'industria 4.0

Il processo di evoluzione economica e di industrializzazione della società negli ultimi tre secoli si può relazionare alle rivoluzioni industriali che hanno determinato il passaggio da un'economia prettamente agricola ad un sistema industriale caratterizzato da un alto grado di meccanizzazione e di innovazione tecnologica. L'industria 4.0 rappresenta l'ultimo step di questo progressivo sviluppo e può essere confrontata con le tre rivoluzioni industriali verificatesi antecedentemente, le quali hanno dato origine ai principali cambiamenti nel settore manifatturiero, grazie ai numerosi progressi tecnologici raggiunti.

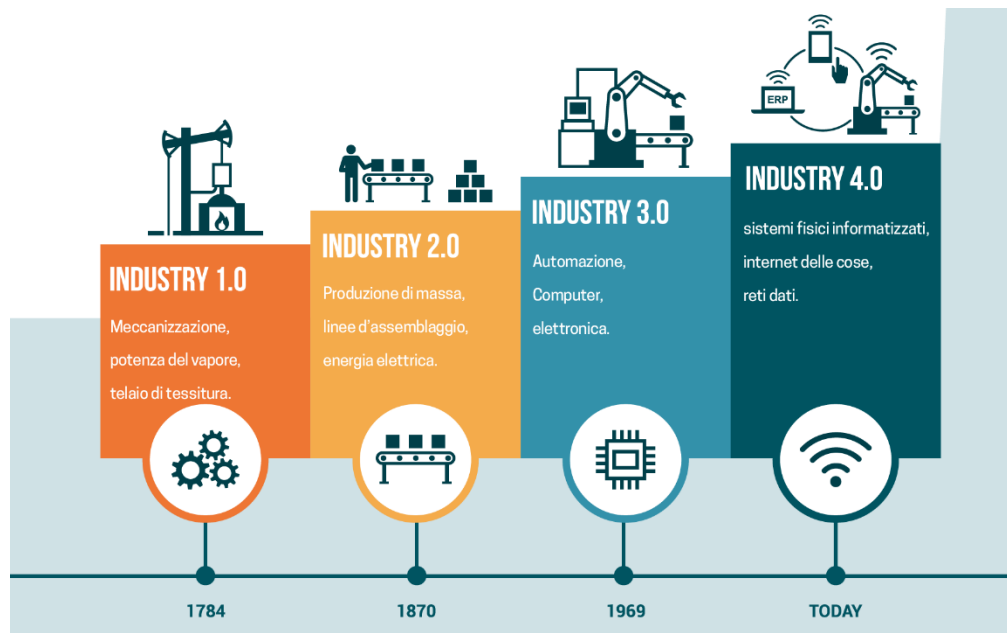


Figura 1: schema riassuntivo delle quattro rivoluzioni industriali [1]

La prima rivoluzione industriale si è estesa tra la fine del XVIII secolo e l'inizio del XIX secolo. Ebbe inizio in Gran Bretagna e segnò il passaggio dalla produzione manuale allo sviluppo di macchine e nuove fonti di energia: l'invenzione del **motore a vapore** e di macchine azionate da energia meccanica, con la conseguente riduzione del bisogno di forza lavoro nelle vecchie aziende agricole a conduzione familiare e nelle piccole strutture manifatturiere, contribuirono alla progressiva sostituzione dell'industria domestica col sistema di fabbrica. In quel periodo, denominato **età della Meccanizzazione**, l'uso del vapore, carbone e ferro come fonti di energia e materie prime, accelerò anche lo sviluppo del settore ferroviario. Pertanto, essendo possibile il trasporto sia di materie prime sia di

prodotti, in grandi quantità e in luoghi lontani, la Rivoluzione Industriale si diffuse in tutta Europa.

Si cominciò, invece, a parlare di seconda rivoluzione industriale alla fine del XIX secolo, quando prese il sopravvento la produzione di massa grazie all'attuazione della **catena di montaggio** introdotta da Henry Ford, che diede inizio ad un processo di espansione e trasformazione industriale senza precedenti. Questo sistema produttivo consentì di ridurre in misura significativa i tempi di realizzazione del prodotto finale, anche se rese il lavoro di fabbrica ancora più alienante.

Un fattore fondamentale per lo sviluppo industriale in questo periodo fu la scoperta della **corrente elettrica** ad opera di Edison, inventore della prima centrale elettrica, basata sull'utilizzo dell'energia prodotta dalle cascate del Niagara, e della lampada ad incandescenza, che ha consentito l'incremento dei turni di lavoro notturno nelle fabbriche e il conseguente aumento della produttività (Ferraris, 1882). Un'altra importantissima fonte di energia di cui si venne a conoscenza in quegli anni fu il **petrolio**: l'invenzione del motore a combustione interna aprì altri enormi orizzonti, con in primo piano la creazione delle automobili per il trasporto di persone e di merci. In concomitanza vi furono ulteriori ideazioni come il telefono, la radio, la macchina da scrivere e la carta da giornale che hanno anche modellato l'intercomunicazione; mentre la produzione di acciaio al posto del ferro, che dominò la prima rivoluzione industriale, ha accelerato il trasporto e il commercio ferroviari.

Di conseguenza, si affermò sempre più il *gigantismo industriale* (Becattini, 2015), con fabbriche di migliaia di addetti, un'organizzazione del lavoro sempre più efficiente e segnata da una rigida disciplina, da precise gerarchie di funzioni e di poteri, dall'incremento, accanto alle masse operaie, delle schiere di dirigenti, tecnici, impiegati con funzioni direttive e amministrative.

Con la seconda rivoluzione industriale, sono stati istituiti stati centrali socialmente ed economicamente forti. L'industrializzazione, che aveva mostrato il suo impatto in Inghilterra e in Europa durante la prima rivoluzione industriale, ha colpito molte regioni del mondo diffondendosi rapidamente in paesi come gli Stati Uniti e il Giappone.

Successivamente alla Seconda Guerra Mondiale, nei paesi occidentali ebbe inizio nella seconda metà del XX secolo la terza rivoluzione industriale, che introdusse l'automazione e la tecnologia microelettronica nella produzione, determinando il passaggio dalla meccanica all'informatica. I progressi, infatti, furono strettamente correlati alle tecnologie

dell'informazione e della comunicazione, cosiddette ICT (Information and Communication Technologies). Per esempio, l'implementazione delle macchine a controllo numerico (CNC) e dei robot industriali offrì flessibilità ai sistemi di produzione; la produzione assistita da calcolatore (CAM) e la pianificazione della produzione resero possibile la produzione integrata computerizzata (CIM). Il progresso interessò anche il settore sanitario con l'introduzione di nuovi e performanti strumenti, quali TAC e macchine per l'ecografia (Iammarino et al., 2001).

Al giorno d'oggi si parla addirittura di quarta rivoluzione industriale, anche se la data d'inizio di questa nuova epoca non è ancora stata stabilita in via ufficiale, siccome è tuttora in corso e solo a posteriori sarà possibile indicarne l'atto fondante. Il termine **Industria 4.0**, infatti, rimanda inequivocabilmente al concetto di quarta rivoluzione industriale, che diversi studiosi, tra cui Schwab, tendono a distinguere dalla terza rivoluzione poiché, sebbene quest'ultima sia stata definita rivoluzione digitale, in realtà rappresenta una sua evoluzione in quanto, invece di focalizzarsi sulla sola automazione delle macchine e dei processi, cerca di digitalizzare tutto ciò che circonda l'uomo: dai macchinari utilizzati nelle fabbriche fino agli oggetti di uso più comune, combinando assieme mondo fisico e mondo virtuale e modellando un ecosistema totalmente digitale. In particolare, colpiscono la velocità, la portata e l'impatto che stanno avendo questi progressi, i quali evolvono a un ritmo esponenziale che non aveva mai caratterizzato le precedenti rivoluzioni industriali (Schwab, 2016).

È una somma dei progressi in intelligenza artificiale (IA), robotica, **Internet delle Cose (IoT)**, stampa 3D, ingegneria genetica, computer quantistici e altre tecnologie. Dunque, questa rivoluzione, rispetto alle precedenti, vede come protagonista l'utilizzo all'interno dell'impianto di produzione di "tecnologie abilitanti" (in inglese KET, Key Enabling Technology), soluzioni o miglioramenti tecnologici, cioè, che racchiudono al loro interno molte attività di ricerca e sviluppo e sono in grado di rivitalizzare il sistema produttivo [2].

1.2 I caratteri della trasformazione digitale

La trasformazione digitale è una componente chiave della strategia globale di trasformazione aziendale e, unitamente ad altri fattori come le persone, i processi e le organizzazioni, è determinante ai fini del successo o del fallimento in tema di competizione nei mercati in continua evoluzione. Si tratta di un mutamento profondo che coinvolge l'intero sistema, dal

modello di business alla cultura aziendale, e che induce le organizzazioni ad intraprendere un cambio di rotta radicale nel modo di operare e di relazionarsi con il cliente. La trasformazione digitale concerne nell'integrazione delle tecnologie e soluzioni digitali in tutte le operazioni dei processi aziendali, dando avvio ad una nuova fase nell'organizzazione e nella gestione dell'intera catena del valore durante il ciclo di vita del prodotto. Questo ciclo è sempre più indirizzato a soddisfare le esigenze specifiche dei singoli clienti e si estende dalla progettazione, implementazione e produzione fino alla consegna del prodotto al cliente finale e al suo riciclaggio, compresi tutti i servizi annessi. Ogni elemento coinvolto nella catena del valore è interconnesso in modo che le informazioni cruciali siano disponibili in tempo reale e utilizzate per ricavare valore aggiunto. Unire persone, oggetti e sistemi produce reti dinamiche e interaziendali che possono essere aggiornate in tempo reale e ottimizzate sulla base di diversi criteri, tra cui costi, disponibilità e consumo di risorse. Le tecnologie giuste conferiscono alle organizzazioni la capacità di rispondere rapidamente a cambiamenti improvvisi del mercato e ad opportunità di sviluppo, stimolando la crescita e l'innovazione futura (Venier, 2017).

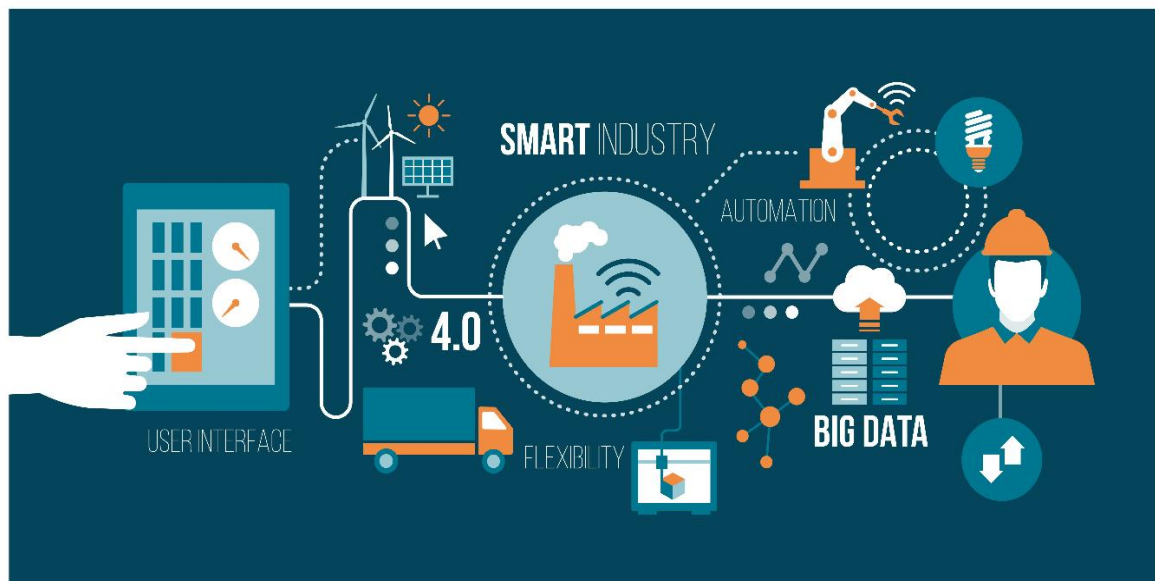


Figura 2: rappresentazione schematica del sistema d'industria 4.0 [3]

I principi fondamentali che delineano il profilo dell'attività e dell'organizzazione all'interno dell'industria 4.0 e che intendono rivoluzionare il processo produttivo sono sostanzialmente:

- **Interconnessione:** reperire e analizzare i dati per creare una rete di scambio d'informazioni in tempo reale tra gli asset e le risorse del complesso produttivo (persone, macchine, sistemi informatici). I dati sono considerati uno strumento che

crea valore, per mezzo delle collaborazioni e connessioni costanti che oltrepassano i limiti dell'azione individuale, migliorando l'efficienza di un sistema e la risoluzione dei problemi che potrà essere resa accessibile in tempo reale a tutte le aree interessate.

- **Decentralizzazione:** i componenti del sistema cyber-fisico (Cyber-Physical Systems, CPS) sono dotati di indipendenza decisionale che concede ad essi la facoltà di agire senza l'intervento umano, sulla base dei dati a disposizione. Sono sistemi in grado di riconoscere eventuali valori anomali nei processi e modificarne il comportamento autonomamente. È il caso di tutti i meccanismi dotati di intelligenza artificiale, come ad esempio i robot che, proprio tramite questa, riescono a comprendere cosa sta avvenendo nelle vicinanze ed agire di conseguenza senza un intervento esterno. Ciò non significa che l'intervento umano perda la propria funzionalità, ma tende ad essere riservato a un livello decisionale di complessità più elevata, supervisionando le operazioni di processi per lo più automatizzati e auto-organizzati [4].
- **Interoperabilità:** capacità dei sistemi informatici di aziende diverse di cooperare e scambiare dati in modo sicuro e automatico, promuovendo l'interazione fra persone, macchinari e dispositivi. Ciò permette la creazione di una rete di imprese competitive senza limiti geografici, per una maggiore efficienza e un'offerta di servizi di qualità superiore. In assenza di interoperabilità, la condivisione dei dati fra sistemi eterogenei necessita di ulteriori passaggi di rielaborazione e trasformazione dei dati: i nodi aggiuntivi per il trattamento dei dati comportano una maggiore probabilità di errori. L'inaccuratezza dei dati, sia essa dovuta a errore umano o del sistema, penalizza i risultati delle applicazioni di analisi a valle. Al contrario, l'interoperabilità offre a tutte le parti interessate l'accesso istantaneo a informazioni accurate e pertinenti; i sistemi operano costantemente, riducendo al minimo il sovraccarico per l'elaborazione dei dati.
- **Virtualizzazione:** è una tecnologia che permette di generare una versione virtuale di un server, un desktop, storage o risorse di rete, rendendo l'infrastruttura IT più flessibile, scalabile ed economica. Nell'ambito della tecnologia dell'informazione, la virtualizzazione comporta la formazione di un ambiente simulato all'interno di uno fisico, permettendo a più sistemi virtuali di funzionare su una singola macchina fisica: questo massimizza l'uso delle risorse informatiche, migliora l'efficienza e

riduce i costi operativi. I servizi di virtualizzazione IT sono parte integrante dell'infrastruttura aziendale moderna, scindendo il software dall'hardware su cui opera, le aziende possono ottimizzare i loro ambienti IT, giungendo a una maggiore flessibilità e agilità.

Ampliando l'orizzonte al complesso aziendale, si può affermare che la virtualizzazione realizza una riproduzione virtuale dell'azienda per mezzo di sensori applicati ai componenti dei processi fisici e genera la configurazione del “**gemello digitale**” [5] dell'impresa, la cui integrazione con gli asset fisici genera l'apparato cyber-fisico che sta alla base del concetto di Industria 4.0.

Pertanto, si instaura una connessione tra mondo fisico e mondo virtuale che supera i limiti imposti dalla realtà e fornisce delle soluzioni più soddisfacenti. La virtualizzazione facilita la gestione IT remota, dal momento che offre la possibilità ai team IT di gestire, monitorare e risolvere i problemi dell'infrastruttura da qualsiasi luogo, senza la necessità di essere fisicamente presenti: questo è un aspetto cruciale per le organizzazioni che hanno team distribuiti o operano in più sedi. La virtualizzazione, dunque, permette che i sistemi e le applicazioni siano controllati centralmente, fornendo supporto remoto e assicurando la continuità aziendale. Inoltre, vi è la possibilità di effettuare delle simulazioni in grado di gestire i rapidi stravolgimenti delle condizioni di mercato.

- **Interazione da remoto:** metodologia di lavoro che consente di agire a distanza sui processi, utilizzando strumenti digitali, come piattaforme di comunicazione, applicazioni cloud e software collaborativi che, grazie all'accesso globale a Internet e ai dispositivi connessi, ammettono interventi proattivi in caso di malfunzionamenti.
- **Sostenibilità:** consiste nell'utilizzo efficiente e corretto delle risorse, quali gli habitat naturali, le materie prime, l'energia e il lavoro umano, per ottimizzare i consumi energetici e lo sfruttamento delle risorse, ovvero progredire in termini di impatto ambientale e sociale. Questo concetto ha origine nell'elaborato della Commissione mondiale su Ambiente e Sviluppo (World Commission on Environment and Development, WCED) del 1987, anche noto come *Rapporto Brundtland*, dove si affermava che “E' sostenibile lo sviluppo in grado di soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle future generazioni di soddisfare i propri” [6]. Per questa ragione la sostenibilità può essere anche definita come la capacità di affrontare il futuro o come giustizia intergenerazionale. Ecco perché la sostenibilità

implica sempre anche la protezione del clima: essa tiene conto degli aspetti ambientali, economici e sociali al fine di raggiungere un equilibrio tra di essi.

- **Modularità:** flessibilità produttiva che permette di adattarsi alle variazioni della domanda di mercato, tramite una catena del valore integrata e interconnessa. La modularità agevola il passaggio dalla produzione e pianificazione lineari, incentrate su rigide strutture, a un sistema agile e flessibile in grado di adeguarsi a circostanze e requisiti in continua evoluzione, sostituendo o espandendo i singoli moduli.
- **Elaborazione in tempo reale:** analisi istantanea e costante dei dati al fine di essere reattivi ed efficaci nel risolvere un eventuale problema. È necessaria la presenza di funzionalità che consentano di raccogliere rapidamente informazioni. In questo modo, ogni aspetto del processo produttivo risponde in modo tempestivo alle richieste, dando all'azienda la possibilità di raggiungere una completa integrazione tra produzione e manutenzione, incaricando operatori totalmente autonomi e capaci di eseguire attività di manutenzione preventive a guasti o fermi macchina (Russo, 2023).

1.3 Le tecnologie abilitanti

Una tecnologia abilitante è una tecnologia che rende l'uomo abile di fare cose che prima non era in grado di fare, creando così un nuovo panorama di opportunità. Secondo la definizione fornita dalla Commissione Europea si tratta di “tecnologie ad alta intensità di conoscenza e associate a numerose attività di R&D, a cicli di innovazione rapidi, a consistenti spese di investimento e a posti di lavoro altamente qualificati” [7]. Alcune di queste sono “vecchie” conoscenze, concetti già presenti in passato che, però, solo ultimamente hanno sfondato il muro della separazione tra ricerca applicata e sistemi di produzione veri e propri, grazie all'avvento di Internet e alla conseguente interconnessione fra strumenti digitali e mondo fisico.

Per massimizzare i benefit di tali tecnologie e ottenere un vantaggio competitivo rispetto ai competitors, è fondamentale innescare delle sinergie tra di esse. Infatti, i dispositivi tecnologici di cui si avvale l'Industria 4.0 generano valore solo se valutati a livello sistemico, nell'ottica della **superadditività**, in base alla quale la combinazione dei contributi di ogni asset è maggiore della somma dei singoli fattori presi separatamente [8].

Le tecnologie abilitanti rappresentano il nucleo tecnologico a fondamento dell'Industria 4.0, la cui combinazione forma il complesso tecnologico dell'attività manifatturiera di un'azienda. Grazie all'impiego di queste tecnologie in azienda è possibile ottenere dei vantaggi in termini di ottimizzazione dei consumi e dello sfruttamento delle risorse, il miglioramento della gestione del ciclo di vita dei prodotti, la riduzione del time-to-market, l'implementazione di nuovi modelli di business, la customizzazione di massa e l'opportunità di essere a conoscenza in tempo reale delle esigenze dei consumatori. Attualmente, le principali tecnologie abilitanti sono quelle individuate dal Ministero dello sviluppo Economico, con il Piano Nazionale Industria 4.0: i Big Data Analytics, Internet Of Things, Robotica e Automazione avanzata, Additive Manufacturing, Integrazione verticale e orizzontale dei sistemi informativi, Cloud, Cybersecurity, Simulazione, Realtà virtuale e Realtà aumentata [9].

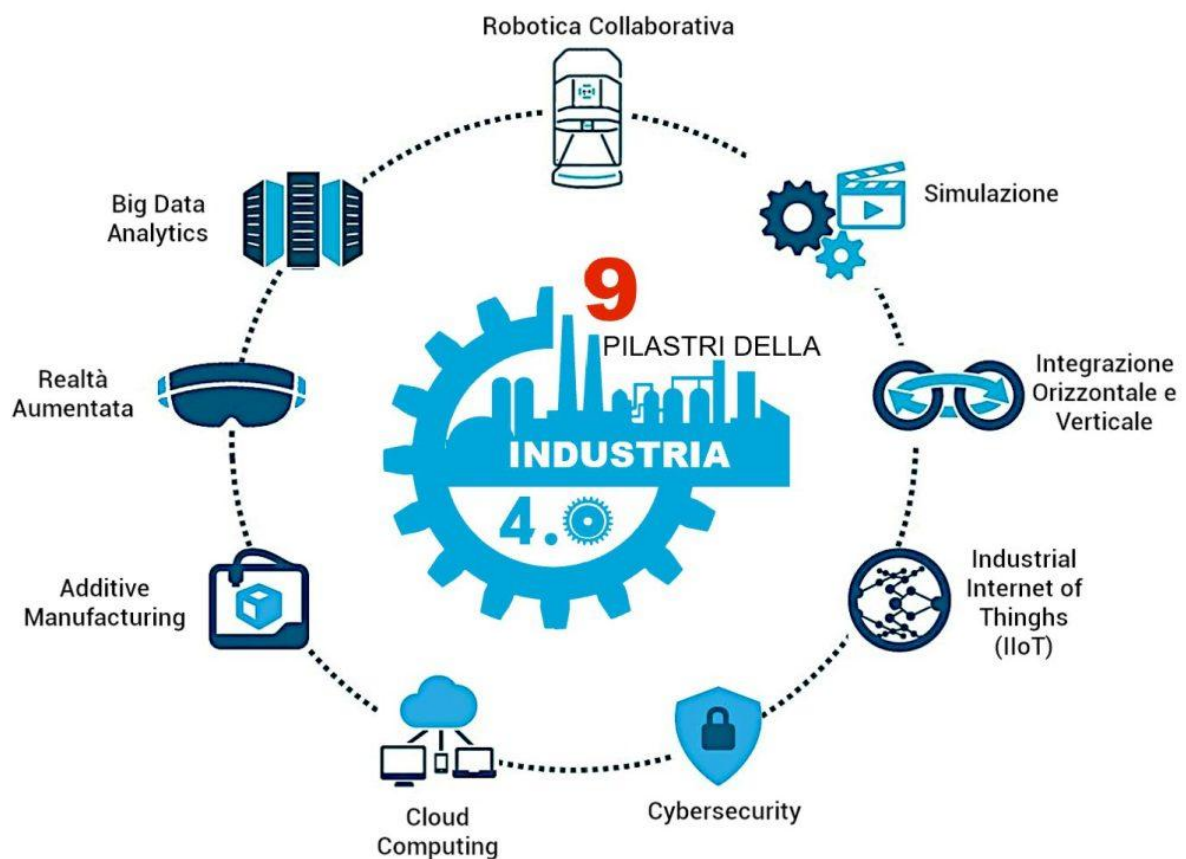


Figura 3: le principali tecnologie abilitanti dell'industria 4.0 [10]

1.3.1 Big Data Analytics

Quando si parla di Big Data ci si riferisce ad una grande mole di dati provenienti da contesti e quadri informativi differenti. Dal web, ai social network, dai dispositivi mobili ai sensori, i dati sono veicolati attraverso i più disparati strumenti della tecnologia, che siano fisici o virtuali.

Il processo di raccolta e analisi di grandi volumi di dati per estrarre informazioni è alla base della logica caratterizzante la quarta rivoluzione industriale. Un database molto esteso in termini di volume, varietà e velocità di aggiornamento, che comprende dati strutturati o meno, è molto difficile da esplorare e analizzare: l'estrazione di informazioni richiede metodi analitici e tecnologie sempre più sofisticate [11].

La sfida che si prepongono attualmente l'informatica e l'ingegneria consiste nel trasformare i big data in smart data, ovvero informazioni intelligenti, nuove e utili, che siano immediatamente fruibili.

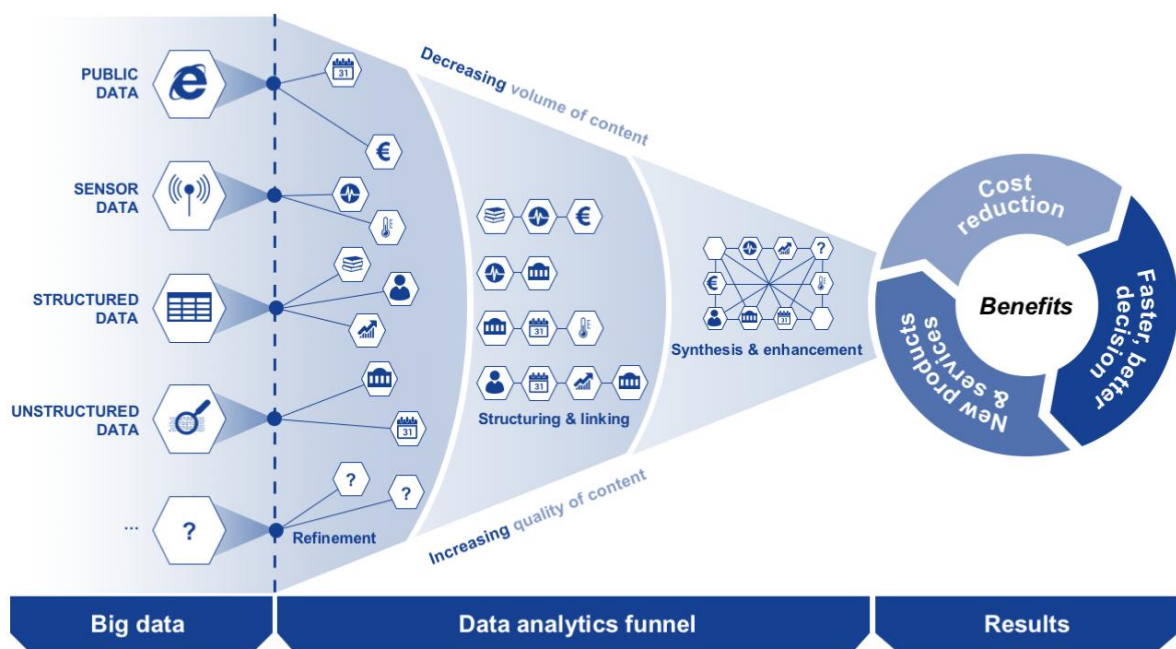


Figura 4: processo di elaborazione dei dati che termina con lo stadio di godimento dei benefici [12]

Big Data Analytics è un processo di Business Intelligence, che si avvale di strumenti automatici al fine di dare supporto ai manager ed ai responsabili dell'azienda nel prendere le decisioni più opportune per massimizzare i profitti ed evitare gli sprechi dovuti a scelte sbagliate. Lo scopo è quello di catturare una quantità notevole di dati e informazioni direttamente dai reparti produttivi e memorizzarle in database virtuali con capacità di archiviazione molto più elevate di quelle presenti in azienda e fornire all'operatore che si

occupa dell'analisi dei diagrammi, grafici e dashboard utili alle decisioni o azioni correttive da intraprendere.

Collezionare una moltitudine di dati di per sé non rappresenta un vantaggio, in quanto reperire dei *trend* o delle informazioni utili potrebbe essere assai laborioso. È solo quando sono adeguatamente gestiti, elaborati e sintetizzati che i dati diventano una risorsa importante, una preziosissima fonte di informazioni utili.

Il processo di elaborazione da “**dato**” ad “**informazione**” non è per nulla semplice e scontato: quanto più grande è la mole di dati e quanto più questi sono eterogenei, tanto più complesso risulterà il loro trattamento. I dati, dopo essere stati raccolti, sono elaborati da server dotati di potenze di calcolo considerevoli che si avvalgono di sofisticati algoritmi e unità di memorizzazione [13].

Attraverso questi procedimenti di analisi dei dati è possibile anticipare il futuro con la conoscenza dei dati raccolti nel passato e diventare pionieri di nuove opportunità di guadagno.

Non sono soltanto le imprese a beneficiare dell'utilizzo dei Big Data, in quanto la raccolta e l'analisi dei dati può avere impatti significativi anche sulla società, giovando alla qualità della vita grazie alle conoscenze che è possibile sfruttare nell'ambito della sanità, dell'innovazione sociale e dello sviluppo sostenibile.

1.3.2 Internet Of Things

L'Internet Of Things [14] riveste un ruolo centrale nello sviluppo dell'Industria 4.0 e si basa sull'utilizzo di sensori intelligenti, installati su macchinari, dispositivi e prodotti finali, che interagiscono coi sistemi informativi aziendali per mezzo della rete Internet. La tecnologia IoT porta all'espansione la nozione di comunicazione, ampliandone il raggio d'azione all'interazione tra macchine, operatori, processi e sotto-processi.

L'IoT in ambito manifatturiero consente la **raccolta e l'analisi** in tempo reale dei dati di produzione, limitando i tempi di inattività e ottimizzando l'efficienza operativa. Si parla oggi di *fabbrica intelligente*, la quale si contraddistingue per la valorizzazione dei dati di produzione allo scopo di pianificare servizi di manutenzione predittiva, con la conseguente riduzione di fermi in produzione.

L'Internet of Things occupa attualmente una posizione dominante nel panorama industriale caratterizzato dalla crescente complessità dei sistemi produttivi, i quali, in mancanza di rinnovamenti e innovazioni rispetto all'organizzazione del passato, non potrebbero perseguire quegli obiettivi di maggiore produttività e coordinamento tanto aspirati, oltre a non disporre materialmente dei mezzi necessari al controllo e al sostegno delle operazioni svolte dalle macchine. I recenti devices digitali, invece, ottemperano a queste nuove esigenze e consentono l'integrazione tra un sistema tradizionale fisico, tuttora necessario, ed un nuovo mondo virtuale che assicuri il coordinamento tra le diverse risorse.

Fanno parte di questa categoria l'insieme di componenti, dispositivi, sensori e piattaforme software che si possono installare all'interno di oggetti fisici e macchinari, per incorporare funzionalità ad oggetti che nascono privi di tali dispositivi, dunque, ogni oggetto fisico ha la potenzialità di diventare intelligente e di inviare o ricevere dati sul suo stato e sullo stato dell'ambiente circostante [15].

A questo si aggiunge la presenza di reti wireless sempre più sofisticate e performanti (es. WiFi, ZigBee, BlueTooth) capaci di trasportare i dati raccolti in apposite infrastrutture di rete, che permettono il monitoraggio dei dispositivi da remoto, creando una diretta interazione tra il mondo reale e sistemi virtuali. Si può così assegnare un'identità elettronica a tutto ciò che fa parte del mondo che ci circonda, attraverso, ad esempio, il noto QR code o il RFID (Identificazione a radio frequenza).

Gli esempi di Internet of Things, in questo senso, sono innumerevoli e toccano i più svariati ambiti: basti pensare alle automobili, su cui si sono installati inizialmente soltanto dei box GPS-GPRS con finalità assicurative e che oggi, invece, escono dalle fabbriche già munite di connettività a bordo. In ambito domestico l'IoT ha guidato l'evoluzione dalla semplice domotica cablata a soluzioni wireless sempre più alla portata di tutti. In aggiunta a queste applicazioni più note, un altro progresso dell'IoT riguarda i **dispositivi indossabili** (Wearable) applicati anche in ambito industriale, grazie a cui è possibile ricevere informazioni sull'ambiente di lavoro e, in maniera del tutto autonoma, intuire se il lavoratore si stia esponendo a una situazione di pericolo, allertandolo tempestivamente [16].

Nel paradigma di Industria 4.0, la **collaborazione tra robot e operatori umani** per l'esecuzione dei processi produttivi sarà sempre di più una risorsa di fondamentale importanza per le fabbriche. Le nuove soluzioni robotiche offrono maggior flessibilità ed efficacia alle strutture produttive, migliorando la competitività delle aziende manifatturiere che ne fanno uso. La flessibilità nella gestione del sistema si concretizza per via della partecipazione diretta dell'uomo nel processo di lavorazione e controllo dei passaggi con maggior valore aggiunto, eliminando i vincoli strutturali che in passato imponevano un'alternativa tra sistemi automatici e sistemi manuali. Inoltre, si intende valorizzare anche la collaborazione tra macchine, ovvero i sistemi di automazione tradizionale interagiscono tra di loro allo scopo di proporre soluzioni integrate ed automatiche.

La robotica in ottica 4.0 è guidata dall'integrazione nei processi di automazione tanto da usarne gli stessi linguaggi per essere istruiti e programmati. I robot sono strettamente connessi tra di loro o direttamente con il Cloud, per raccogliere informazioni ed essere parte attiva del processo produttivo. Ma la robotica non si limita alla produzione di robot: i veicoli a guida autonoma sono figure complesse di automazione, capaci di movimentare le merci da una zona all'altra della fabbrica. Questi strumenti sono intrinsecamente collaborativi, in quanto sono in grado di interagire con altre macchine, ma anche con esseri umani ripianificando autonomamente la propria traiettoria in base alle esigenze di processo o adattandosi al flusso del personale all'interno della fabbrica.

Sebbene vi siano considerevoli vantaggi nell'inserimento della robotica nei processi produttivi, bisogna comunque riconoscere la presenza di alcuni ostacoli da non sottovalutare:

- Costi elevati: sicuramente l'acquisizione e la manutenzione della tecnologia robotica necessita di un investimento economico assai dispendioso.
- Sottrazione di posti di lavoro: l'integrazione della robotica nei processi produttivi comporta la riduzione di manodopera, con il conseguente calo del numero di lavoratori assunti. Ad essere maggiormente penalizzate sono soprattutto quelle mansioni meccaniche e ripetitive, caratterizzate da competenze circoscritte a campi ormai destinati all'automazione completa.
- Requisiti di competenze specializzate: il successo dell'introduzione della robotica nella produzione esige svariate competenze tecniche, come la programmazione, la manutenzione e la risoluzione dei problemi. La necessità di personale qualificato può rappresentare una sfida significativa.

- **Compatibilità:** L'integrazione fra le nuove tecnologie robotiche e le strutture produttive preesistenti potrebbe rivelarsi un ostacolo considerevole; la compatibilità di macchine e sistemi software diversi può rappresentare una sfida importante, che comporta ulteriori investimenti in nuove tecnologie.
- **Rischi di Cybersecurity:** creando un sistema produttivo totalmente interconnesso e manipolabile online, il rischio di minacce alla sicurezza aumenta drasticamente. I robot e tutti gli altri dispositivi connessi sono esposti alla minaccia di attacchi informatici, potenzialmente deleteri in uno scenario di collaborazione uomo-robot.

Nonostante queste difficoltà, i benefici della robotica nel settore industriale prevalgono di gran lunga sulle problematiche, rendendola un tassello fondamentale per essere competitivi in futuro.

È necessario che le aziende adottino una strategia che prevenga tutte le potenziali problematiche dell'introduzione della robotica nel processo produttivo, investendo presumibilmente nella formazione dei propri dipendenti per sviluppare hard skills e valutando attentamente i costi e i benefici, senza tralasciare lo sviluppo di un efficace piano di cybersecurity.



Figura 6: interazione fra operatore e robot di saldatura [18]

1.3.4 Additive Manufacturing

La manifattura additiva, anche detta stampa tridimensionale, comprende tutti quei processi che, partendo da un file di progetto digitale, realizzano oggetti tridimensionali a elevata personalizzazione attraverso l'aggiunta progressiva di strati di materiale. Tale tecnologia rappresenta una trasformazione radicale nel settore industriale, in quanto permette di abbattere i costi di produzione per via del minor consumo di materiale rispetto ai processi di produzione tradizionali e ridurre cospicuamente il time-to market del prodotto, avendo la facoltà di creare prototipi in tempo reale e, quindi, di riconoscere tempestivamente eventuali errori di progettazione che altrimenti si manifesterebbero solo in fase di realizzazione (National Reserch Council & et al, 2014). Nonostante i caratteri innovativi della stampa 3D, tale tecnologia non ha ancora preso il sopravvento e risulta impiegata per il momento solo in fase di progettazione e prototipazione o nella realizzazione di lotti di dimensioni ridotte altamente customizzati orientati a mercati di nicchia. La personalizzazione del prodotto, infatti, implica dei lati negativi per quanto riguarda i costi considerevoli che l'impresa deve sostenere per tutte le modifiche che vengono apportate al prodotto per soddisfare ogni specifico cliente. D'altro canto, mediante la flessibilità della stampa 3D si giunge direttamente alla realizzazione del prodotto finale, senza dover assemblare le singole parti separate che formano il risultato finale, influenzando perciò positivamente sui costi e soprattutto sui tempi, per quanto riguarda la produzione personalizzata. I pezzi realizzati con i dispositivi 3D sono estremamente precisi e vantano una qualità maggiore rispetto ai prodotti in serie o realizzati a mano.

Perciò, nelle produzioni di massa con un alto grado di standardizzazione la manifattura tradizionale, basata sull'impiego di macchinari decisamente più veloci in confronto alle stampanti 3D, continua ad essere predominante, ma i due sistemi di produzione possono coesistere in modelli di business finalizzati all'attuazione di strategie di costo a monte della catena del valore, consistenti nella fabbricazione di componenti standardizzate tramite manifattura tradizionale e nell'implementazione di strategie di differenziazione a valle, facendo uso di stampanti 3D per ottenere un elevato grado di personalizzazione dei prodotti finali.

Infine, è importante sottolineare che prima di procedere con l'adozione di una stampante 3D all'interno di un'azienda è fondamentale l'approccio ad una fase preliminare che riguarda uno scrupoloso processo di reingegnerizzazione degli oggetti, per valutare quali potrebbero effettivamente essere realizzati tramite manifattura additiva, senza trascurare un'analisi

preventiva dei fattori economici nella loro totalità. Infatti, trattandosi di una tecnologia molto costosa e spesso complicata da gestire, potrebbe rivelarsi più opportuno rivolgersi a società il cui core business sia proprio quello di produrre per terze parti.



Figura 7: stampante 3D impiegata nella produzione della pasta Barilla [19]

1.3.5 Integrazione verticale e orizzontale dei sistemi informativi

La quarta rivoluzione industriale ha come obiettivo sostanziale quello di creare uno stretto collegamento fra ogni fase del ciclo produttivo, a partire dalla ricerca sino all'assistenza per il cliente nella fase successiva alla vendita del prodotto: ciò significa internalizzare tutte le fasi del processo produttivo di un determinato prodotto, progettando sistemi informativi integrati verticalmente, che permettono uno scambio di dati tra i vari attori della catena produttiva e i clienti. Per sviluppare un'azienda integrata verticalmente è fondamentale, in primo luogo, digitalizzare tutti i macchinari e dispositivi aziendali tramite l'installazione di sensori e attuatori a bordo macchina, istituendo una comunicazione machine-to-machine (M2M) fra i diversi reparti di produzione [20]. Lo step successivo consiste nella raccolta e nell'analisi globale dei dati, avvalendosi di tecniche di Data Analytics e piattaforme Cloud, con lo scopo di ottimizzare il controllo e la gestione della produzione. Il grande beneficio risultante dall'integrazione verticale in azienda consiste in migliore trasparenza e controllo

del processo produttivo, nonché miglioramento dei processi decisionali del reparto di pianificazione.

Può esservi integrazione anche sul lato orizzontale, con riferimento alla catena di distribuzione (**supply chain**), dando inizio ad attività di sincronizzazione e coordinamento con altre imprese allo scopo di raggiungere una maggiore efficienza e collaborazione. L'integrazione orizzontale consiste nell'estensione dell'attività di impresa a prodotti, servizi, tecnologie produttive, fasi di lavorazione, politiche di mercato, e *know-how* differenti ma complementari al comparto tecnologico-produttivo in cui l'azienda opera, al fine di ampliare il proprio paniere di clienti e affievolire la concorrenza. L'integrazione dei dati e dei sistemi lungo la supply chain migliora il coordinamento fra tutti i reparti e le funzioni aziendali, rendendoli parte di un unico sistema globale. Malgrado ciò, affinché si possa ottenere un'integrazione completa e si giunga a dei risultati soddisfacenti per le imprese è importante combinare alle tecnologie informatiche anche quelle operazionali: la differenza tra le due sta sostanzialmente nel fatto che le prime sono finalizzate all'unificazione dei diversi elementi dell'impresa allo scopo di una miglior efficienza e coordinamento, mentre le seconde sono impiegate dalla forza lavoro e riguardano il lavoro manifatturiero. La convergenza di queste due tecnologie è la base per raggiungere un'ottima efficienza con conseguente riduzione dei costi e aumento di competitività, per dei risultati migliori rispetto alla media dei concorrenti. Ma con l'Industria 4.0, le aziende, i reparti, le funzioni e le capacità potranno diventare molto più compatte, evolvendo le reti di integrazione dei dati universali e interaziendali.

1.3.6 Cloud Computing

A seguito dell'evoluzione della rete internet è divenuto possibile collezionare enormi moli di dati in tempi ridotti, dando origine ad un rinnovamento anche in materia di stoccaggio dei dati. In passato i dati erano raccolti in server fisici locali; attualmente, invece, la necessità di essere a conoscenza delle informazioni in tempo reale ed in qualsiasi luogo ha condotto alla nascita di un nuovo sistema: il cloud computing. Questa innovazione è stata possibile grazie all'integrazione delle tecnologie analizzate nei paragrafi precedenti.

Il cloud computing è stato definito dal National Institute of Standards and Technology (NIST) come un archetipo per concedere l'accesso alla rete, in ogni momento e su richiesta, ad un insieme condiviso di risorse tra loro configurabili (es. archiviazione, reti, server, applicazioni, servizi), delle quali si può rapidamente fare uso per espletare un'interrogazione

[21]. Si tratta cioè di un **accentramento dell'archiviazione di dati** ed informazioni essenziali presso le aziende. Questa tecnologia rappresenta il pool di servizi offerti on demand dai fornitori ai clienti attraverso l'impiego della rete internet. In particolare, il Cloud Computing si profila come un servizio offerto da terze parti specializzate in operazioni dei calcolatori secondo modalità, tempi e costi stabiliti dagli utenti stessi, i quali evitano di acquistare proprie risorse hardware e software, avvalendosi di quelle disponibili online, nella misura in cui si desidera. È infatti permesso modificare in tempo reale le condizioni contrattuali pattuite con il fornitore in relazione alle proprie esigenze.

È doveroso, però, riconoscere anche la presenza di criticità conseguenti all'adozione di un'infrastruttura Cloud, come la bassa disponibilità delle risorse rispetto ai server fisici, che potrebbe causare problemi nell'erogazione del servizio se non è accompagnata da una gestione efficiente e ottimizzata. Con lo sviluppo dell'Industry 4.0 un numero sempre più elevato di attività legate alla produzione richiederà una condivisione dei dati tra i siti e i confini aziendali, dunque, ci si attende un miglioramento delle prestazioni delle tecnologie cloud, con l'auspicio di raggiungere tempi di reazione di pochi millisecondi.

Un altro punto a sfavore del Cloud Computing è certamente la sicurezza dei dati, in quanto si corre perennemente il rischio di un impossessamento indesiderato del pieno controllo dei propri dati e delle proprie risorse da parte di eventuali malintenzionati, che potrebbero intaccare l'integrità dell'impresa. Inoltre, vi è anche il pericolo che si instauri un regime di oligopolio con l'accentramento della proprietà dei dati nelle mani di un ristretto numero di aziende, siccome i dati non sono più salvati nel singolo hard disk, ma storicizzati online.

Dunque, è responsabilità dell'utente servirsi in maniera prudente dei servizi Cloud, ponderando rischi e benefici nonché verificando attentamente l'affidabilità del fornitore del servizio e le clausole contrattuali da esso prescritte, al fine di tutelare la salvaguardia dei dati che si decide di inserire nel Cloud.

L'architettura del Cloud Computing si scinde in due porzioni distinte: *Front-End e Back-End*.

Il Front-End è caratterizzato dalla parte visibile del programma con cui si interfaccia e interagisce l'utente, ad esempio menu di navigazione, elementi di design, pulsanti, immagini e grafici; dunque, costituisce quella sezione preposta all'acquisizione dei dati di ingresso e della loro elaborazione, secondo procedure conformi a specifiche predefinite e invariante, tali da renderli fruibili dal *Back-End*. All'interno della struttura front-end si trovano il software, generalmente un browser o un'applicazione lato client, che permette l'utilizzo

dell'applicativo all'utente, l'interfaccia utente che consente l'interazione Cloud-utente ed infine il dispositivo, ovvero l'hardware di cui si avvale il client per usufruire del servizio. Di conseguenza l'hardware non necessita di elevata potenza di calcolo siccome tutte le operazioni più complesse sono elaborate dal cloud.

Il Back-End, invece, rappresenta la parte retrostante che consente l'effettivo funzionamento delle interazioni Cloud-utente ed è accessibile soltanto ad amministratori e sviluppatori. Il back-end dell'applicazione gestisce l'insieme delle funzionalità dell'applicazione Web: nel momento in cui l'utente interagisce con il front-end, il sistema invia una richiesta al back-end in formato http, dopodiché il back-end elabora la richiesta e restituisce una risposta. Ciononostante, la separazione tra front-end e back-end non è così netta e spesso le richieste più semplici possono essere direttamente gestite dal front-end (ad esempio verificare se l'indirizzo e-mail inserito dall'utente non è valido), mentre quelle più complesse sono trasferite al back-end.

1.3.7 Cybersecurity

L'incremento della connettività tra device e della mole di dati raccolti implica una crescita esponenziale del rischio di **attacchi informatici** lungo l'intera catena di approvvigionamento; quindi, la necessità di proteggere i sistemi di produzione e la rete informatica da potenziali minacce è sempre più al centro degli interessi degli sviluppatori. Per affrontare questa problematica, sorge l'esigenza di adottare canali di comunicazione affidabili e sistemi di accesso sofisticati. La sicurezza informatica è una delle sfide più ardue che caratterizzano il paradigma di Industria 4.0: i sistemi informativi del complesso produttivo e della catena di fornitura sono al momento assai vulnerabili.

La cybersecurity non è una tecnologia abilitante in senso stretto ma una caratteristica comune a più applicazioni dell'Industria 4.0, infatti, si spinge oltre i confini della tradizionale sicurezza delle informazioni per comprendere non soltanto la protezione delle risorse informative, ma anche quella di altri componenti, compresa la persona stessa. Questa tipologia di prevenzione raggruppa tutte quelle soluzioni tecnologiche che si prefiggono di proteggere il sistema informativo da attacchi informatici che possono causare la perdita o la compromissione di dati sensibili. La frequenza di tali accessi indesiderati è sempre più elevata e gli hacker professionisti sono in grado di intromettersi nella rete con l'utilizzo di un qualsiasi device per alterarne e manipolarne le informazioni in modo molto semplice. I

cyber attacchi, approfittando delle vulnerabilità intrinseche dei sistemi virtuali, hanno la possibilità di compromettere l'intero business model aziendale e influire sulla perdita di competitività aziendale. Ovviamente questa situazione crea disagio e dissesto poiché scaturisce un danno economico nei confronti dell'azienda quantificabile in termini di clienti e, dunque, di profitto.

Il problema della sicurezza si riversa anche sui tecnici specializzati in cybersecurity, i quali sono continuamente sottoposti a nuove sfide e devono contrastare minacce sempre più diversificate e sofisticate da parte degli attacchi hacker. Al fine di affrontare questa problematica, le imprese stanno investendo in maniera consistente nelle tecnologie di automazione in modo tale che esse possano agevolare i responsabili della sicurezza nel velocizzare le tempistiche entro cui essi contrastano gli attacchi e, senza dubbio, l'utilizzo del cloud migliora la visibilità all'interno dei loro sistemi e facilita il coordinamento tra i gruppi di specialisti che si dedicano ai vari complessi di sicurezza, networking e comunicazione in rete.

È bene comunque prevenire il più possibile spiacevoli situazioni con l'implementazione da parte degli sviluppatori e degli utenti di alcune tecniche di salvaguardia dei dati sensibili. Una buona soluzione è quella di proteggere gli accessi alle piattaforme con l'autenticazione a più fattori, suddividere i contenuti multimediali in più sezioni il cui accesso richiede l'inserimento di credenziali differenti per ogni comparto, crittografare determinati file o bloccarne l'accesso, stabilire una durata limitata delle sessioni di navigazione con la richiesta di reinserimento delle credenziali allo scadere del timer.

Nel 2015 il Laboratorio Nazionale di Cybersecurity e il CIS-Sapienza hanno redatto il primo **Framework Nazionale di Cyber Security** (Abie et al., 2021), con lo scopo di offrire alle organizzazioni uno strumento utile per la gestione dei rischi cyber e per la salvaguardia dei dati personali.

Le azioni che si possono compiere per la salvaguardia della sicurezza informatica sono state suddivise in 5 categorie principali:

1. *Identify*: azioni che rientrano nella comprensione del contesto aziendale e degli asset critici, così da permettere l'identificazione immediata dei rischi presenti.
2. *Protect*: misure indirizzate alla protezione di processi di business, di asset aziendali ed informazioni, per prevenire eventuali attacchi

informatici. Si analizzano problematiche di controllo accessi, data security e la corretta manutenzione dei sistemi.

3. *Detect*: processi di rilevamento, gestione di anomalie e azioni da eseguire per individuare un attacco in corso.
4. *Respond*: attività e interventi da compiere in risposta ad un incidente di sicurezza. Si spazia dalla pianificazione della risposta alle analisi da effettuare, dalle mitigazioni al contenimento della problematica, sino alle comunicazioni e agli avvisi da emettere.
5. *Recover*: azioni di ripristino di processi e servizi in seguito ad un attacco alla sicurezza del sistema.

Il Framework può, dunque, essere un prezioso riferimento per orientare nella direzione ottimale la propria strategia di gestione del rischio cibernetico. Assicurare un adeguato livello di sicurezza è, infatti, una sfida di grande interesse all'interno del paradigma Industry 4.0, affinché lo sviluppo tecnologico possa essere implementato in modo efficace e sicuro.

1.3.8 Simulazione, Realtà virtuale, Realtà aumentata

La simulazione di processo è un'attività essenziale nell'ingegneria di processo, la quale si occupa dell'intero ciclo di vita di un processo, dalla ricerca e sviluppo alla progettazione, al controllo e all'ottimizzazione di ogni procedura di natura industriale. La simulazione nell'Industria 4.0 concerne nell'impiego di strumenti 3D interconnessi, capaci di creare una realtà che simuli quella fisica come ad esempio un prodotto, un materiale o un processo produttivo. Questa realtà viene chiamata **digital twin** perché rappresenta il gemello digitale del processo fisico in tutti i suoi aspetti funzionali e di design: si tratta di modellizzare un processo, un prodotto o una fabbrica, al fine di ricavare informazioni utili da utilizzare in relazione ai dati raccolti per valutare come il modello reale reagirebbe al variare delle condizioni al contorno, in modo da minimizzare significativamente eventuali anomalie. Ogni strumento software potrà interagire con il modello di fabbrica operando su una caratteristica del modello: l'idea è quella di realizzare delle analisi, testare il prodotto e le strategie applicabili per ottimizzare il suo processo, assicurandosi di effettuare delle modifiche al prototipo, prima che il prodotto fisico venga realizzato e messo in commercio, riducendo di conseguenza la probabilità di errore e di insuccesso. Questo permette di migliorare la qualità del prodotto e di abbreviare le tempistiche di messa in opera, non essendo più necessaria una

riprogettazione che prolungherebbe i tempi di lancio sul mercato. Attualmente, le simulazioni 3D di prodotti sono già utilizzate nella fase di progettazione e anche nelle operazioni come stampaggio, saldatura, estrusione e fresatura. Inoltre, vi è la cosiddetta simulazione a eventi discreti che si occupa di riprodurre il comportamento di un insieme di macchine che compongono un reparto o un'intera fabbrica, per quanto riguarda i flussi di materiale. Queste simulazioni sfruttano i dati in tempo reale per rispecchiare il mondo fisico in un modello virtuale, che può includere macchine, prodotti e persone, consentendo agli operatori di sperimentare e ottimizzare le impostazioni della macchina per il prossimo prodotto in linea nel mondo virtuale prima del cambio fisico, riducendone i tempi di configurazione.

La realtà aumentata (**AR**) [22] è una tecnologia che consente di vivere esperienze interattive arricchendo il mondo reale con oggetti virtuali, grazie all'alterazione della percezione sensoriale umana tramite informazioni manipolate. Essa supporta la realtà espandendola e colmando il divario tra il mondo reale e quello virtuale. L'AR offre la visualizzazione della grafica computerizzata collocata nell'ambiente reale. La realtà aumentata sovrappone **layer informativi** in 3D agli oggetti del mondo reale visualizzati su un qualsiasi display, abilitando un range di funzioni potenzialmente infinito. Si parla, infatti, di **overlay** siccome è sufficiente avere un display dotato di fotocamera per arricchire di testi e altri contenuti animati il campo visivo: il sistema identifica l'oggetto inquadrato dalla fotocamera del dispositivo e avvia un nuovo livello di comunicazione che si sovrappone alla realtà, integrandola perfettamente e incrementando la quantità di dati visibili in relazione a quell'oggetto. Questa tecnologia, dunque, non proietta l'utente in una dimensione del tutto alternativa come fa la realtà virtuale, ma potenzia l'ambiente reale in cui si trova ad operare, mantenendolo a stretto contatto con la realtà circostante.

Dal punto di vista tecnico, la realtà aumentata si avvale di un diagramma CAD in 3D e attraverso dei sensori che inviano input ai vari dispositivi contenenti il CAD, come ad esempio smartphone, tablet o tramite cloud nel caso di occhiali e visiere, genera un'immagine caratterizzata da una percezione alterata della realtà mediante l'aggiunta di contenuti multimediali. Dunque, si può ritenere questa pratica come un'estensione dell'ambiente dell'utente, che si integra in tempo reale con modelli e materiali digitali sovrapposti, come testi, grafica e elementi multimediali.

L'obiettivo di questa tecnologia non è quello di sostituire la realtà, bensì di arricchirla secondo modalità interattive e temporanee. L'AR fa sì che il mondo digitale e il mondo fisico

si incontrino grazie all'utilizzo di questi dispositivi elettronici "indossabili", che consentono l'elaborazione delle informazioni per via dei sensori di cui sono dotati.

Grazie al miglioramento costante della progettazione e dello sviluppo di software e hardware, l'AR trova attualmente impiego in svariati ambiti: pianificazione e monitoraggio delle attività in tempo reale, diagnostica e ripristino dei guasti, formazione in merito a prodotti e processi industriali. I dati sulle imprese del settore industriale mostrano che i produttori moderni hanno implementato l'AR a supporto della formazione dei dipendenti, semplificazione delle operazioni di manutenzione, attività di gestione e controllo della qualità e progettazione del prodotto.

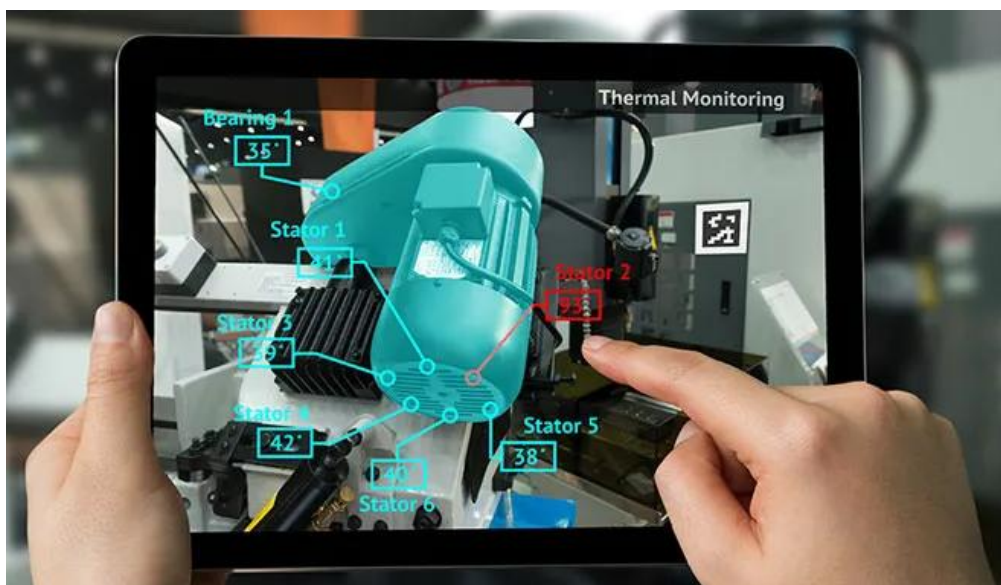


Figura 8: monitoraggio della temperatura degli statori di un motore elettrico con tecnologia AR [24]

Inoltre, si sta lavorando per applicare la tecnologia AR nel settore edile in quanto i dispositivi digitali, in grado di arricchire la realtà, potrebbero dare la possibilità di visualizzare l'immagine di un edificio ancora prima che la sua costruzione sia completata, così da intervenire in anticipo laddove vi fossero degli errori di progettazione. Ancora, essa può essere sfruttata anche dalle forze dell'ordine, ad esempio trasmettendo informazioni ricevute dai sensori in tempo reale a display o visiere dei vigili del fuoco con cui essi possono monitorare un incendio e le condizioni di vita delle persone.

Un'altra applicazione dell'AR è rappresentata dal virtual training dei tecnici con una metodologia di apprendimento esperienziale, di tipo "learning by doing", che consiste nell'integrare l'applicazione pratica contestualmente allo studio teorico, osservando ad esempio le parti di un macchinario per comprenderne il funzionamento e le operazioni di manutenzione che andranno effettuate nella realtà. Questa modalità di apprendimento "sul

campo” si dimostra particolarmente accattivante ed efficace e permette di conseguire una base di apprendimento oggettiva, con un maggior controllo e una moltitudine di feedback concreti su cui agire, nell’ottica di un miglioramento progressivo delle procedure di apprendimento [23]. Inoltre, affidandosi a questa tecnica di formazione, i lavoratori si trovano sostanzialmente in un ambiente di lavoro simulato che è totalmente sicuro e indenne da rischi di infortunio. Nonostante questa tecnologia non sia ancora ampiamente diffusa a livello aziendale, essa potrà essere adoperata nei prossimi anni in tutti i settori per contribuire a migliorare e assistere un’ampia gamma di attività produttive.

La Realtà Virtuale (**VR**), invece, è una tecnologia che genera un ambiente virtuale simulando la presenza fisica dell’utente in uno spazio creato al computer. Attraverso l’utilizzo di **visori** che mostrano immagini e video in modo stereoscopico per dare la percezione di profondità e di dispositivi di input come **controller** e **sensori di movimento** che permettono all’utente di interagire con l’ambiente virtuale, i clienti hanno la possibilità di vivere esperienze sensoriali coinvolgenti e realistiche in un ambiente interattivo totalmente artificiale [25]. Il punto di partenza della VR è la realizzazione di un modello tridimensionale progettato a livello sonoro, visivo e tattile, quasi cinematografico, del prodotto o processo al cui interno si intende navigare: gli strumenti adoperati sono quelli derivanti dagli ambiti di modellazione 3D, quali CAD, e dai sistemi di proiezione che si incentrano su schemi o su visori, potenziati dall’ausilio di dispositivi indossabili per permettere la navigazione realistica nel modello. La Realtà Virtuale è, dunque, dotata di hardware e software sofisticati per creare esperienze fittizie in grado di alterare la percezione dei sensi umani.

Oggi, è risaputo che questa tecnologia è in grado di migliorare l’efficienza operativa e ridurre i costi, generando vantaggi in termini di produttività e sostenibilità; pertanto, è diventata una realtà accessibile e sta trovando applicazione in un numero di settori sempre più elevato, compresa l’industria manifatturiera. Gli ambiti di applicazione spaziano dalla **formazione** alla **manutenzione**, dalla **progettazione** al **controllo qualità**. La VR si rivela, infatti, essenziale nella formazione industriale dei dipendenti: la cosiddetta VR Training, secondo studi specialistici, risulta incrementare al 70% l’efficacia di apprendimento rispetto al 25% caratterizzante l’educazione tradizionale in aula, siccome il partecipante ricopre un ruolo attivo e contribuisce in prima persona all’apprendimento. In questa modalità di apprendimento il partecipante si immerge in un ambiente virtuale 3D ed è coinvolto tramite interazioni fisiche con l’oggetto di studio, grazie all’uso di occhiali AI o di altre tecnologie da indossare. In questo modo si riduce anche il rischio di eventuali danni

a macchinari causati da operatori inesperti. Il personale, infatti, ha la possibilità di migliorare le proprie competenze esercitandosi sulle macchine virtuali fino a quando non sarà preparato a sufficienza per utilizzarle in azienda. Inoltre, nel corso della preparazione in Virtual Training sono riprodotte condizioni e problematiche estreme, al fine di istruire i dipendenti ad affrontare situazioni critiche di emergenza.

Per quanto riguarda la progettazione, gli ingegneri meccanici accettano di buon grado l'integrazione di tali strumenti, in quanto hanno così la possibilità di effettuare uno studio realistico sul prodotto finale, notando istantaneamente eventuali difetti o errori di progettazione, nonché di accelerare il compimento del progetto.



Figura 9: applicazione della VR nella progettazione di componenti automobilistiche [26]

Nella fase del controllo qualità, ovvero il processo di ispezione che verifica il soddisfacimento dei requisiti stabiliti per un certo prodotto o servizio, si necessita di rapidità ed efficienza, di conseguenza l'ausilio della Realtà Virtuale può risultare estremamente vantaggioso. Infatti, l'operatore provvisto di casco con sensori VR e guanti con sensazione tattile dispone di un'immagine prospettica in 3D dell'oggetto da ispezionare: in questo modo esamina minuziosamente ogni singolo aspetto del prodotto per individuare con accuratezza eventuali difetti strutturali che potrebbero nuocere al funzionamento. Mediante le tecnologie VR è anche possibile includere schemi e appunti per evidenziare in tempo reale le modifiche necessarie. Queste modalità di analisi e controllo sono di giovamento per la crescita della **produttività**, ottimizzando i tempi e riducendo i rischi.

1.4 Il Piano Nazionale per l'Industria 4.0

L'Industria 4.0 nell'ultimo decennio è stata presa in esame da numerosi Stati a livello mondiale, alcuni dei quali hanno compreso fin da subito le potenzialità di questa trasformazione che sarebbero emerse in un futuro non molto lontano. Il progresso tecnologico ha ampliato i confini di produzione e commercio, determinando per molte imprese l'inizio di una competizione con realtà più grandi e avanzate, con cui prima non erano abituate a confrontarsi.

Concentrandosi sul caso dell'economia italiana, un recente Rapporto Istat del 2018 [27], evidenzia le difficoltà riscontrate dalle imprese del nostro Paese nel collocarsi sulla frontiera tecnologica e sfruttare a pieno le potenzialità della trasformazione digitale in corso, per via di investimenti ancora piuttosto limitati. Tra gli elementi imputati come cause principali di tale incombenza si annotano fattori strutturali propri del tessuto produttivo italiano, la dinamica stagnante della crescita, un radicato dualismo territoriale, la predominanza di imprese di piccole e medie dimensioni e la bassa propensione all'innovazione delle imprese italiane con risvolti negativi sia per la dinamica della produttività del Paese.

Analizzando i dati conseguiti dalla rilevazione sull'impiego delle tecnologie ICT nelle imprese italiane per il 2018, il Rapporto Istat mostra come lo stato di avanzamento del processo di adozione di tecnologie assimilabili a Industria 4.0 sia strettamente dipendente da incentivi fiscali e agevolazioni previste nel nostro Paese per promuovere l'accelerazione del processo di digitalizzazione e di adozione di tecnologie abilitanti [28].

A tal proposito, è doveroso menzionare che nel 2016, a seguito delle direttive della Commissione Europea sulla necessità di incentivare la produttività mediante riforme strutturali nel settore delle innovazioni digitali e in quello della ricerca, la Camera dei Deputati ha avviato un'indagine conoscitiva su Industria 4.0 che si è conclusa con la presentazione, ad opera dell'ex Presidente del Consiglio Matteo Renzi e dell'allora Ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda, di un documento denominato **Piano Nazionale per l'Industria 4.0** [29], nel quale si espone un programma di finanziamenti e agevolazioni per progetti o investimenti innovativi di imprese ubicate nel nostro paese, con l'obiettivo di identificare una strategia che conduca l'industria italiana verso la Quarta Rivoluzione Industriale. Con questa iniziativa sono stati stanziati 13 Miliardi di euro allo scopo di incentivare gli investimenti verso beni strumentali nuovi 4.0 e aumentare la spesa privata in Ricerca, Sviluppo e Innovazione.

Il piano prevede la pianificazione di processi produttivi incentrati sulla digitalizzazione di tutte le fasi, grazie a dispositivi in grado di comunicare autonomamente tra loro lungo la catena del valore e di creare un apparato produttivo automatizzato e interconnesso. Grazie all'IoT (Internet of Things) e all'IoE (Internet of Everything) non solo digitale e reale si incontrano, ma anche persone e macchine si integrano e comunicano tra loro, dando origine ad un modello di Smart Factory (fabbrica intelligente) flessibile, efficiente e veloce, in cui si sfrutta l'utilizzo delle tecnologie digitali per monitorare i processi fisici e prendere decisioni decentralizzate. Ciò è possibile grazie alla presenza di sensori e di connessioni wireless a prezzi abbordabili, associati a un utilizzo sempre più pervasivo di dati, informazioni e tecnologie digitali in sistemi ormai totalmente telematici e interconnessi. La fabbrica intelligente è regolata da meccanismi di autoorganizzazione, finalizzati alla gestione ottimale delle risorse, alla flessibilità, alla produttività e alla competitività del prodotto, per instaurare fruttuose sinergie tra produzione e servizi.

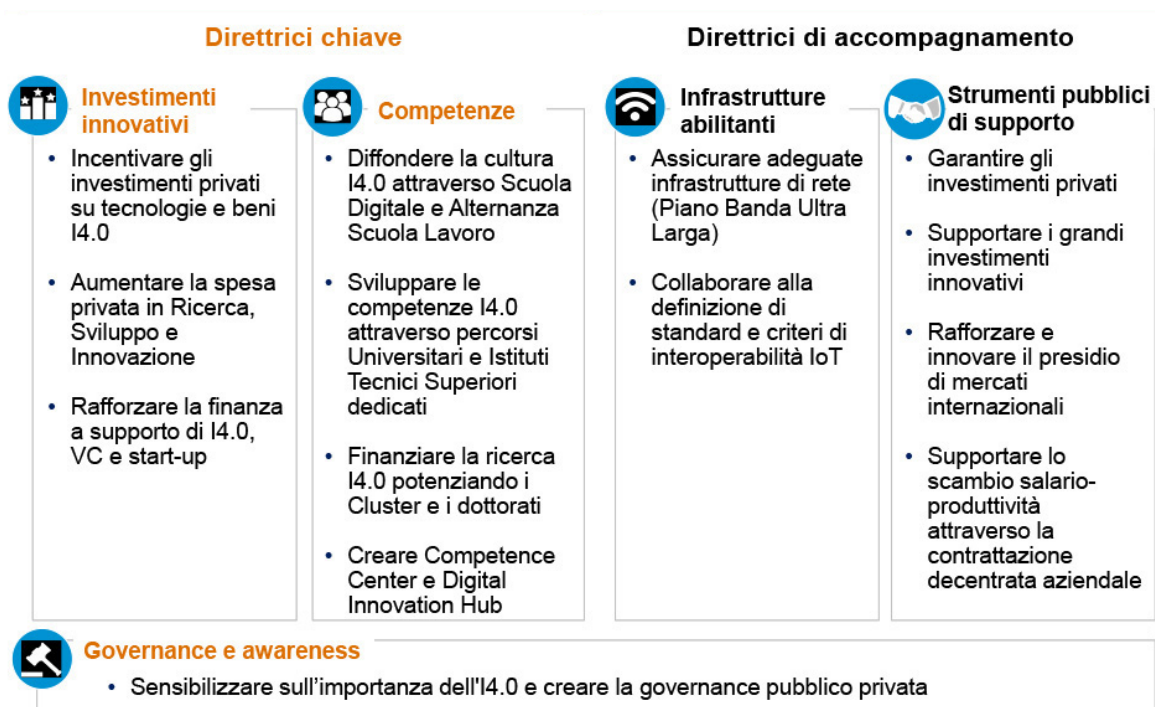


Figura 10: le direttrici strategiche secondo il Piano Nazionale per l'Industria 4.0 [30]

Il Piano Nazionale per l'industria 4.0 propone 6 strumenti principali di cui le imprese si possono avvalere:

- Iper e superammortamento
- Credito d'imposta R&S
- Nuova Sabatini

- Patent Box
- Startup e PMI innovative
- Fondo di Garanzia PMI

1.4.1 Iper e superammortamento

L' Iper e il Superammortamento sono agevolazioni fiscali concepite per incentivare le imprese a investire in beni strumentali nuovi, beni materiali e immateriali (software e sistemi IT) funzionali alla trasformazione tecnologica dei processi produttivi e sono caratterizzate da due aliquote differenti, in base al bene acquisito.

L'Iperammortamento è stato introdotto con la Legge di Bilancio del 2017 [31] ed è una misura di sostegno che consiste in una maggiorazione del costo di acquisizione dei beni strumentali e delle relative quote di ammortamento deducibili, con abbattimento della base imponibile e conseguentemente delle imposte. Inizialmente offriva la possibilità di ammortizzare un valore pari al **250%** del costo di acquisto del bene, per quanto concerne investimenti in beni materiali nuovi e funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale delle imprese secondo **il modello «Industria 4.0»** presenti nell'Allegato A del suddetto testo ufficiale, acquistati o in leasing. Dunque, per avere accesso all'Iperammortamento è necessario che il bene in questione sia interconnesso, ossia abilitato allo scambio costante di informazioni sia con i sistemi informativi aziendali sia con piattaforme esterne (ad esempio la casa produttrice del bene, i clienti, i fornitori) attraverso la rete Internet, e che abbia un indirizzo IP che lo renda univocamente identificabile.

Per ogni investimento inferiore a 500.000€ è sufficiente redigere un'autocertificazione testimonianze che il bene rispetta i canoni fondamentali del 4.0, mentre in caso di superamento di questa soglia è richiesta una perizia giurata rilasciata da un perito o ingegnere, attestante che il bene possiede le caratteristiche tecniche necessarie per essere incluso negli elenchi di cui all'allegato A o all'allegato B della legge di Bilancio 2017.

La misura del Superammortamento, introdotta nel 2016, consentiva, invece, di usufruire di una maggiorazione del **40%** nella determinazione delle quote di ammortamento fiscalmente deducibili del costo di acquisizione di **beni strumentali nuovi non 4.0**, acquistati o in leasing. Le due misure erano cumulabili tra di loro e con gli altri incentivi presenti nel Piano e vi si accedeva in modo automatico in fase di redazione di bilancio. Inoltre, per le imprese che hanno beneficiato dell'Iperammortamento, vi era la possibilità di fruire del

Superammortamento anche per investimenti in beni strumentali immateriali (software e IT), a patto che fossero iscritti nell'Allegato B della Legge di Stabilità 2017.

Sostanzialmente, ipotizzando un costo d'acquisto di un bene strumentale nuovo pari a 100, soggetto al 10% di aliquota d'ammortamento annuale, in contabilità andrebbe normalmente iscritto il bene nell'Attivo al costo di 100 con il contestuale stanziamento di una quota d'ammortamento pari a 10, mentre nella dichiarazione dei redditi si effettua una variazione in diminuzione (superammortamento) pari al 40% della quota detraibile, per un totale di 14. Nella versione originaria il Piano dava diritto al beneficio fiscale se l'ordine e il pagamento di almeno il 20% di anticipo fossero effettuati nel biennio 2016-2017 e la consegna del bene fosse avvenuta entro il 30 giugno 2018, a condizione che detti investimenti in beni materiali/immateriali si riferissero a ordini accettati dal fornitore **entro la data del 31 dicembre 2017** e che, entro la medesima data, fosse anche avvenuto il pagamento di acconti in misura non inferiore al 20%.

L'iperammortamento e il superammortamento sono stati prorogati più volte fino al 2019, anche se con aliquote decrescenti, per poi essere aboliti nel 2020 ed essere sostituiti dal credito d'imposta 4.0. La logica ha quindi subito un cambiamento da incentivo "indiretto" (riduzione imponibile nel tempo) a incentivo "diretto" (credito compensabile in F24).

1.4.2 Credito d'imposta R&S

Un altro interessante incentivo messo a disposizione dal Piano Nazionale per l'Industria 4.0 per stimolare la spesa privata in Ricerca e Sviluppo, al fine di scoprire o sviluppare nuovi prodotti, incluse migliorie di prodotti esistenti, e innovare i processi di produzione col proposito di assicurare la competitività futura delle imprese, è stato quello del **credito d'imposta del 50% su spese incrementalmente in Ricerca e Sviluppo**. Si può usufruire del credito d'imposta, anche in caso di perdite, per detrarre un ampio insieme di imposte e contributi ed è concesso fino ad un massimo annuale di 20 milioni di euro per beneficiario, secondo il calcolo su una base fissa data dalla media delle spese in Ricerca e Sviluppo negli anni 2012-2014. Sono agevolabili tutti gli investimenti inerenti a ricerca fondamentale, ricerca industriale e sviluppo sperimentale: assunzione di dipendenti specializzati e altamente qualificati, contratti di ricerca con università, imprese, enti di ricerca, startup e PMI innovative, ammortamento di attrezzature di laboratorio. Inizialmente lo sgravio fiscale è stato messo a disposizione per le spese in Ricerca e Sviluppo sostenute nel triennio 2017-

2020 e si accedeva in modo automatico in fase di redazione di bilancio, indicando le spese sostenute nella dichiarazione dei redditi, nel quadro RU del modello Unico.

1.4.3 Nuova Sabatini

La misura di sostegno “Beni strumentali – Nuova Sabatini”, istituita dal decreto-legge del Fare [32], è orientata a **semplificare l’accesso al credito** delle PMI di qualsiasi settore per l’acquisto di nuovi macchinari, impianti e attrezzature.

In particolare, il MISE prevede un contributo a fondo perduto a copertura parziale degli interessi pagati su finanziamenti bancari e leasing accesi per l’acquisto di beni strumentali nuovi. Il contributo corrisponde al valore degli interessi calcolati su un finanziamento della durata di 5 anni e di importo pari all’investimento, con un tasso d’interesse del 2,75% annuo per quanto riguarda l’acquisto di nuovi beni strumentali ordinari, mentre per investimenti 4.0 il tasso d’interesse corrisposto è maggiorato al 3,575%. Il finanziamento deve avere una durata non superiore ai 5 anni e l’importo deve essere compreso tra 20.000 euro e 2 milioni di euro. Le aziende che intendono beneficiare della Nuova Sabatini godono anche di accesso prioritario al Fondo centrale di Garanzia nella misura massima dell’80%.

Le richieste di prenotazione seguono l’ordine cronologico di presentazione e i fondi sono distribuiti fino a esaurimento disponibilità delle risorse. Per quanto riguarda le tempistiche, nella versione originale del Piano le imprese interessate dovevano presentare, entro il 31 dicembre 2018, a una banca o a un intermediario finanziario, la domanda di finanziamento e la richiesta di accesso al contributo, secondo la normativa specificata con apposita circolare ministeriale.

Recentemente, la legge di bilancio 2025 [33] ha prorogato la Nuova Sabatini fino al 2027, confermandone la cumulabilità con gli altri benefici fiscali dell’Industria 4.0.

1.4.4 Patent Box

L’obiettivo di rendere il panorama italiano maggiormente attraente per gli investimenti nazionali ed esteri di lungo termine ha portato alla creazione del Patent Box, ovvero una tassazione agevolata sui redditi provenienti dall’utilizzo di beni immateriali: brevetti industriali, marchi registrati, disegni e modelli industriali, know how e software protetti da diritto d’autore. Lo sgravio fiscale è concesso a condizione che il contribuente conduca

attività di R&S connesse allo sviluppo e al mantenimento dei beni immateriali in Italia, evitandone la ricollocazione all'estero (Guatri & Villani, 2015).

Questa misura prevede la **riduzione delle aliquote IRES e IRAP del 50%** sui redditi d'impresa legati all'uso diretto o in licenza d'uso di beni immateriali sia nei confronti di controparti terze che di società controllate. Ai fini del calcolo dell'agevolazione è necessario quindi individuare il **contributo economico**, cioè il reddito derivante dallo sfruttamento della proprietà intellettuale al netto dei relativi costi, determinare il nexus ratio (rapporto fra i costi sostenuti in R&S per lo sviluppo del bene immateriale e i costi complessivi a cui si è fatto fronte per produrre il bene immateriale), calcolare la quota di reddito agevolabile applicando il nexus ratio al contributo economico e moltiplicarla per la percentuale di detassazione riconosciuta.

Possono beneficiare dell'agevolazione tutti i soggetti titolari di reddito d'impresa, i cui redditi derivano dall'utilizzo di beni immateriali, siano essi enti commerciali o meno, società di capitali o di persone oppure imprenditori individuali. L'opzione può essere esercitata nella dichiarazione dei redditi corrispondente al primo periodo d'imposta per il quale si intende detrarre le spese ed è valida per cinque anni a partire dall'anno in cui si effettua comunicazione all'Agenzia delle Entrate. L'agevolazione può essere rinnovata per un periodo di pari durata ed è irrevocabile.

1.4.5 Startup e PMI innovative

Infine, un altro utile strumento per favorire lo sviluppo dell'ecosistema nazionale dell'imprenditoria innovativa è quello riservato alle nuove imprese (startup), il cui oggetto sociale è chiaramente inerente all'innovazione, le quali possono beneficiare di un sistema normativo dedicato in materie come la **semplificazione amministrativa**, il mercato del lavoro, le **agevolazioni fiscali**, il diritto fallimentare. Gran parte di queste misure sono estese anche alle PMI innovative, ovvero a tutte le piccole e medie imprese che operano nel ramo dell'innovazione tecnologica, indipendentemente dalla data di costituzione o dall'oggetto sociale.

Questa iniziativa copre tutte le fasi del ciclo di vita di una ditta: una nuova modalità di costituzione totalmente digitale e gratuita, l'esonero dalla disciplina sulle società di comodo e in perdita sistematica, la possibilità anche per le S.r.l. di emettere piani di incentivazione in equity agevolati fiscalmente, detrazione IRPEF (per investimenti fino a 1 milione di euro)

o deduzione dell'imponibile IRES (fino a 1,8 milioni) pari al 30% per investimenti in capitale di rischio, accesso gratuito, semplificato e prioritario al Fondo di Garanzia per le PMI, possibilità di cedere le perdite a società quotate sponsor. Nell'ipotesi di insolvenza, questo strumento prevede l'esonero dalla disciplina fallimentare ordinaria mentre, in caso di successo, le startup mature possono convertirsi agevolmente in PMI innovative. Anche qui, l'agevolazione è cumulabile con le altre misure del Piano e vi si accede iscrivendosi, mediante autocertificazione online, alle rispettive sezioni speciali del Registro delle Imprese. Per le startup innovative il regime agevolativo dura 5 anni dalla costituzione [34].

1.4.6 Fondo di Garanzia PMI

Il Fondo di Garanzia PMI è un'agevolazione particolare che non prevede un contributo pecuniario sugli investimenti effettuati, ma offre alle PMI la possibilità di ottenere la concessione di una garanzia pubblica, fino a un massimo dell'80% dell'investimento, tanto per operazioni a breve o medio-lungo termine, quanto per far fronte a esigenze di liquidità o per avviare nuovi investimenti. Dunque, si possono ricevere dei finanziamenti bancari senza offrire garanzie personali sugli importi garantiti dal Fondo stesso. Il Fondo, infatti, rilascia ai soggetti finanziatori garanzie dirette irrevocabili; perciò, in caso di inadempimento del soggetto beneficiario del finanziamento, la banca o l'intermediario finanziario può rivalersi sul Fondo di Garanzia.

Il Fondo garantisce a ciascuna impresa un importo massimo di 2,5 milioni di euro, suddivisibile su più operazioni, fino al raggiungimento della soglia stabilita, senza un limite al numero di operazioni effettuabili. Questa misura è cumulabile con tutte le altre misure del Piano.

1.4.7 Efficacia degli incentivi sulla decisione di investimento

Un ragguardevole studio del 2021 a cura, fra gli altri, del professor Matteo Tubiana [35], ha analizzato i dati della V Rilevazione Imprese e Lavoro (RIL) [36] condotta dall'Inapp nel 2018 su un campione rappresentativo di imprese italiane operanti nel settore privato extra-agricolo, in cui è stata posta la domanda su quale sarebbe stato il comportamento di suddette imprese in assenza di incentivo, per effettuare una valutazione sull'efficacia delle

agevolazioni fiscali introdotte dal PNI4.0 sulla decisione di investimento da parte delle imprese.

L'indagine si è basata su due assunzioni di fondo: in primo luogo, è stato ipotizzato che coloro che sono stati sottoposti al questionario abbiano adottato un comportamento perfettamente razionale, ovvero fossero in possesso di tutte le informazioni necessarie e che agissero al fine di massimizzare una propria funzione obiettivo; in secondo luogo, è stato supposto che l'intervistato fosse imparziale nei confronti della politica pubblica oggetto di valutazione, ragion per cui l'intervistato non avesse nessun pretesto nell'alterare la propria risposta al quesito sottopostogli. Dunque, la risposta fornita dall'intervistato in merito al comportamento non osservato che si sarebbe verificato in assenza di incentivi si può considerare attendibile e può fornire una misura dell'efficacia della politica oggetto di analisi.

Dall'analisi è emerso che circa l'1,6% del totale delle imprese intervistate (con almeno 1 dipendente) ha dichiarato che non avrebbe compiuto alcun investimento senza gli aiuti economici del PNI4.0. Il 4,1% ha affermato, invece, che in assenza di incentivi non avrebbe effettuato investimenti o li avrebbe effettuati in misura ridotta. Tali percentuali si riducono se ci si limita a considerare alcune misure specifiche quali Superammortamento, Iperammortamento e Beni strumentali (Nuova Sabatini), rispetto alle quali la quota di imprese che dichiara di aver modificato il proprio comportamento a seguito della presentazione incentivo è rispettivamente dello 0,7% per il Superammortamento, 0,3% per l'Iperammortamento e dello 0,3% per Beni strumentali. Queste percentuali salgono al 2,3%, 0,8% e 0,9% se si valutano anche quelle imprese che avrebbero comunque effettuato degli investimenti ma per un ammontare minore.

Queste informazioni si sono rivelate di fondamentale importanza per il disegno e l'attuazione delle politiche per la crescita e la competitività, perché hanno dimostrato che gli incentivi fiscali hanno avuto un effetto positivo sulle scelte delle imprese relative a nuovi investimenti nel periodo 2015-2017.

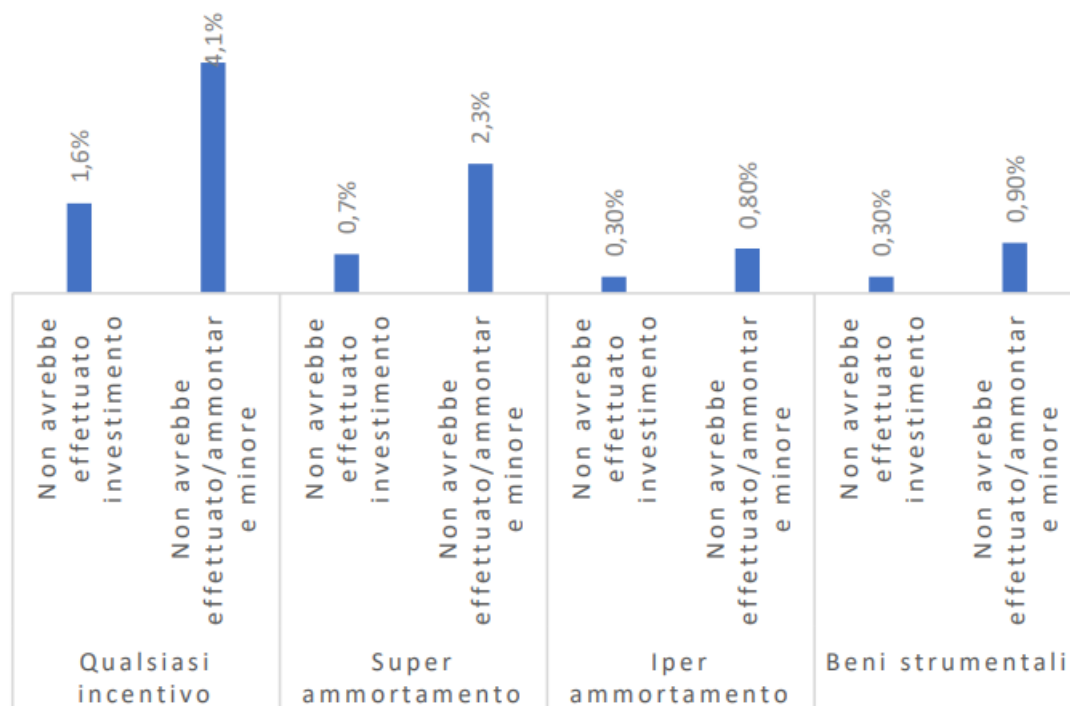


Figura 11: quota di imprese che dichiarano di aver modificato le proprie scelte in seguito alla presenza degli incentivi [35]

1.5 Piano Transizione 4.0

In seguito allo sviluppo della pandemia di covid-19 l'Unione Europea ha stanziato dei fondi per favorire la ripresa economica, detti *Next Generation EU* (Fabbrini, 2022). Il governo italiano ha elaborato un programma per la gestione di questi capitali soprannominato **Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)**, al cui interno vi sono numerose misure che toccano svariati ambiti: dalla transizione digitale a quella ecologica, dalla sanità alla scuola, dai trasporti alla giustizia.

Il Piano Nazionale Transizione 4.0 si inserisce nel più ampio contesto del PNRR ed è stato introdotto dalla legge di Bilancio 2020 [37] al fine di supportare le imprese italiane nella trasformazione digitale. Si tratta di un programma biennale per il periodo dal 2021 al 2023, ma la decorrenza delle misure è stata anticipata al 16 novembre 2020, per beni consegnati entro giugno 2023. Ha sostituito le agevolazioni dell'iperammortamento e del super-ammortamento promosse nel precedente Piano Nazionale per l'Industria 4.0 con un sistema di crediti di imposta con aliquote differenti in base all'investimento effettuato. In particolare, le aliquote variano a seconda che si tratti di beni materiali o immateriali, classificabili 4.0 oppure no, investimenti in Ricerca e Sviluppo, innovazione, Design e Green, ed infine gli investimenti rivolti ad attività di formazione del personale. Il Piano

Transizione 4.0 è, quindi, stato ideato per incentivare le aziende italiane a compiere investimenti privati nella direzione della **transizione digitale** nonché per migliorare la competitività sul mercato.

Secondo una prima ripartizione possiamo affermare che il credito d'imposta si applica a beni nuovi, strumentali all'esercizio d'impresa, suddivisi in queste due categorie:

- beni materiali (macchine, attrezzature, ecc.) presenti in allegato A della legge;
- beni immateriali (licenze, software, sistemi) presenti in allegato B della legge.

Per quanto riguarda i beni materiali 4.0, inizialmente erano agevolabili gli investimenti sostenuti dal 1° gennaio 2021 al 31 dicembre 2021 e il credito di imposta fruibile ammontava a:

- 50% del costo per una somma investita inferiore a 2,5 milioni di euro;
- 30% per la quota di investimenti oltre i 2,5 milioni di euro e fino a 10 milioni di euro;
- 10% del costo, per la quota di investimenti superiori a 10 milioni di euro e fino al limite massimo di costi complessivamente ammissibili, pari a 20 milioni di euro.

Nel 2022 le aliquote sono diminuite del 10% per le prime due tipologie di investimenti e, invece, per il periodo dal 1° gennaio 2023 al 31 dicembre 2025, ovvero entro il 30 giugno 2026 (a condizione che entro la data del 31 dicembre 2025 sia emessa fattura d'acquisto e sia avvenuto il pagamento di acconti in misura non inferiore al 20% del costo di acquisizione), riguardo i medesimi investimenti aventi a oggetto beni ricompresi nell'allegato A, l'aliquota detraibile con il credito d'imposta è stata dimezzata:

- 20% del costo d'acquisto, per investimenti fino a 2,5 milioni di euro;
- 10% del costo d'acquisto, per investimenti superiori a 2,5 milioni di euro e fino a 10 milioni di euro;
- 5% del costo d'acquisto, per la quota di investimenti superiori a 10 milioni e fino al limite massimo di costi complessivamente ammissibili pari a 20 milioni.

Gli altri beni strumentali non dotati di caratteristiche che li permettano di essere classificabili come 4.0 hanno goduto, invece, soltanto di un credito d'imposta del 10% nel 2021 che è stato ulteriormente decrementato al 6% per il 2022.

BENI MATERIALI	Legge di bilancio 2020	Legge di bilancio 2021		Legge di bilancio 2022
	2020 (o 30/06/2021 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2020)	16/11/2020 e 2021 (o 31/12/2022 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2021)	2022 (o 30/11/2023 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2022)	2023-2025 (o 30/06/2026 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2025)
4.0 (allegato A annesso alla Legge di bilancio 2017)	40% sino a 2,5 mln 20% da 2,5 a 10 mln	50% sino a 2,5 mln 30% da 2,5 a 10 mln 10% da 10 a 20 mln	40% sino a 2,5 mln 20% da 2,5 a 10 mln 10% da 10 a 20 mln	20% sino a 2,5 mln annui 10% da 2,5 a 10 mln annui 5% da 10 a 20 mln annui/ 50 mln per investimenti inclusi nel PNRR per transizione green
ORDINARI (non 4.0)	6% sino a 2 mln	10% (15% lavoro agile) sino a 2 mln	6% sino a 2 mln	NO

Figura 12: tabella riepilogativa del credito d'imposta sui beni materiali [38]

Viceversa, per gli investimenti in beni immateriali (software, sistemi e system integration, piattaforme e applicazioni) strettamente riconducibili a Industria 4.0, è stato riconosciuto il credito d'imposta nella misura del 20% del costo, nel limite massimo di costi ammissibili pari a 1 milione di euro, fino al 31 dicembre 2023. L'agevolazione è diminuita al 15% per gli investimenti sostenuti dal 1° gennaio al 31 dicembre 2024, fermo restando il limite massimo di costi ammissibili pari a 1 milione di euro, e al 10% nel 2025.

La legge di bilancio 2020 ha anche introdotto una nuova disciplina del credito d'imposta in merito ad investimenti in ricerca e sviluppo, in transizione ecologica, in innovazione tecnologica 4.0 e in altre attività innovative a giovamento della competitività delle imprese. Il credito d'imposta R&S è stato inizialmente concesso della misura del 10% per il 2021 e del 20% per il 2022, dopodiché è stato prorogato e modificato dalla legge di bilancio 2022 che ne assicura il 10% fino al 31 dicembre 2031.

Inoltre, nel piano per l'Industria 4.0 sono tenuti in considerazione gli investimenti per la formazione del personale dipendente, mirata ad acquisire o consolidare soft skills rilevanti per la trasformazione digitale. Per il 2021 su tali spese è stato riconosciuto un credito d'imposta che va dal 50 al 70% per le piccole imprese e dal 40 al 50% per le medie imprese. Alle grandi imprese è stata garantita, invece, soltanto una detrazione del 30%. Queste aliquote sono però state diminuite nel 2022 al 40% per le piccole attività e al 35% per quelle di media entità.

BENI IMMATERIALI (software)	Legge di bilancio 2020	Legge di bilancio 2021		Legge di bilancio 2022		
	2020 (o 30/06/2021 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2020)	16/11/2020 e 2021 (o per beni 4.0 30/06/2022 / per beni ordinari 31/12/2022 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2021)	2022 (o per beni 4.0 30/06/2023 / per beni ordinari 30/11/2023 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2022)	2023 (o 30/06/2024 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2023)	2024 (o 30/06/2025 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2024)	2025 (o 30/06/2026 con ordine e acconto almeno pari al 20% entro il 2025)
4.0 (allegato B annesso alla Legge di bilancio 2017)	15% sino a 700.000 euro	20% sino a 1 mln	50% sino a 1 mln	20% sino a 1 mln	15% sino a 1 mln	10% sino a 1 mln
ORDINARI (non 4.0)	NO	10% (15% lavoro agile) sino a 1 mln	6% sino a 1 mln	NO	NO	NO

Figura 13: tabella riassuntiva del credito d'imposta su beni immateriali [38]

Con le successive **Leggi di bilancio del 2023** [39] e **del 2024** [40], la legislatura ha confermato la scelta di continuare a puntare fortemente sui principi cardine del **Piano Transizione 4.0**, optando per stanziare nuovi fondi da destinare alle aziende che intendono proseguire gli investimenti in quest'ottica. Gli incentivi per promuovere la transizione tecnologica e digitale delle imprese sono stati così prorogati con minime variazioni fino al **31 dicembre 2024** e, in alcuni casi, fino al 30 giugno 2025. L'obiettivo è rimasto quello di rilanciare il settore industriale italiano con l'adozione di mezzi che garantiscano competitività a livello internazionale, dunque, stimolare gli investimenti delle imprese in beni strumentali tecnologici e favorire l'avanzamento verso una manifattura 4.0.

1.6 Piano Transizione 5.0

La legge di bilancio del 2025 [41], invece, ha presentato importanti novità in tema di agevolazioni fiscali, nonostante vi sia stata una continuità col programma precedente. Ad esempio, è stato inserito un tetto massimo di spesa pari a 2,2 mln di euro per il credito d'imposta 4.0 sui beni strumentali che è rimasto comunque fruibile per il 2025 nella misura del 20% ed è stato invece abrogato l'incentivo sugli investimenti in software 4.0.

È stato inoltre introdotto il nuovo **Piano Transizione 5.0** [42], al fine di pianificare ulteriori disposizioni urgenti per l'attuazione del Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR).

Questo programma riproponeva il credito d'imposta per investimenti innovativi che rispettassero sostanzialmente le medesime linee guida del Piano Transizione 4.0, con l'aggiunta del vincolo di generare una **riduzione dei consumi energetici** dell'intera struttura produttiva nella quale si inseriva il nuovo bene acquisito non inferiore al 3 per cento, o, in alternativa, una riduzione dei consumi energetici dei processi interessati dall'investimento non inferiore al 5 per cento.

Dunque, rientrava il rinnovamento del parco macchine nell'incentivo, a patto che originasse un miglioramento dell'efficienza energetica attestato da perizie giurate sul mezzo nuovo, sul mezzo sostituito e sulla rendicontazione finanziaria dell'intero sistema produttivo aziendale. Era inoltre possibile godere di una maggiorazione del credito d'imposta se l'investimento comprendeva l'installazione di un impianto fotovoltaico: si aveva diritto a un surplus del 30% per l'acquisto di pannelli fotovoltaici con moduli caratterizzati da un livello di efficienza pari al 21,5%, mentre si giungeva al 40% e al 50% di maggiorazione per i pannelli fotovoltaici con livelli di efficienza più elevati.

TRANSIZIONE 5.0	RIDUZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI		
DIMENSIONI INVESTIMENTO	Unità produttiva: dal 3% al 6% Processo: dal 5 % al 10%	Unità produttiva: dal 6 % al 10% Processo: dal 10% al 15%	Unità produttiva: almeno il 10 % Processo: almeno il 15%
Fino a 2,5 mln	35%	40%	45%
Da 2,5 a 10 mln	15%	20%	25%
Da 10 a 50 mln	5%	10%	15%

Figura 14: tabella schematica delle differenti aliquote di detrazione con credito d'imposta 5.0 [43]

La sezione "Transizione 5.0" è stata resa disponibile il 12 settembre 2024 all'interno della piattaforma informatica sul sito del Gestore dei Servizi energetici (GSE), su cui andava obbligatoriamente presentata comunicazione di completamento dei progetti di innovazione per poter fruire del credito d'imposta.

Tuttavia, durante l'attuazione del programma sono state riscontrate delle criticità tecniche nel dimostrare e certificare i risparmi energetici, per via sia della complessità dei requisiti che dell'asfissiante burocrazia, col risultato di una bassa partecipazione rispetto alle attese.

Per ovviare a questi limiti, la **Legge di Bilancio 2026 (Legge n. 199/2025)** [44] ha ridisegnato gli incentivi fiscali per le imprese, operando due cambiamenti chiave:

1. Credito d'imposta 4.0 reintrodotta al 40% per gli investimenti in beni strumentali nuovi che rispettino i requisiti dell'Industria 4.0, con lo scopo di semplificare l'accesso alle agevolazioni e di affidarsi a un modello noto alle imprese italiane, già sperimentato con successo negli ultimi 5 anni.

2. Revoca del credito d'imposta per Transizione 5.0 e contestuale ritorno dell'Iperammortamento con aliquota del 180% per le imprese che investono in beni strumentali di giovamento alla transizione digitale.

2. AGRICOLTURA 4.0

2.1 Origini dell'agricoltura e i suoi sviluppi storici

La scoperta dell'agricoltura rappresenta un processo fondamentale nell'evoluzione dell'uomo, siccome ne ha rivoluzionato le forme di vita, dando origine alle prime forme stanziali che hanno surrogato il nomadismo e innescato una nuova organizzazione non soltanto dei rapporti sociali, ma anche dell'economia e della struttura politica. La coltivazione del suolo ha costituito anche il primo, importante tentativo dell'uomo di controllare e dominare la natura.

Questo processo è conosciuto come **prima rivoluzione agricola** (Giusti, 1996), sebbene lo sviluppo dell'agricoltura più che una rivoluzione fu, in realtà, una graduale evoluzione, protrattasi per molti secoli, che introdusse la coltivazione delle piante nell'economia tradizionale fondata su caccia e raccolta delle bacche e dei frutti sulle piante che nascevano spontaneamente. Questa riforma indusse gli esseri umani al passaggio dal nomadismo alla sedentarietà: mentre in un'economia di caccia e raccolta è necessario spostarsi man mano che si esauriscono le risorse di una zona, la coltivazione del terreno richiede attesa affinché la semina dia i suoi frutti. Non è semplice stabilire con precisione il periodo, i luoghi e le ragioni del passaggio dall'economia di caccia e di raccolta all'agricoltura. È abbastanza probabile, però, che le operazioni di lavorazione del terreno siano iniziate in varie zone del Pianeta in maniera indipendente e che la diffusione dell'agricoltura sia avvenuta molto lentamente.

Secondo le teorie più accreditate, la prima area del Pianeta ad essere coltivata fu la Mezzaluna fertile, regione del Medio Oriente corrispondente agli attuali territori dell'Iraq, Siria e Turchia, circa 11.000 anni fa. Le prime piante di cui si presero cura gli uomini furono cereali, come l'orzo e il farro, ai quali si aggiunsero alcuni legumi come i piselli e i ceci. Solo dopo la scoperta dell'America giunsero in Europa mais, pomodori, peperoni, zucche, fagioli e arachidi.

Le cause che hanno portato l'uomo a dedicarsi a questa pratica sono tuttora incerte: sono state proposte ipotesi demografiche, come l'aumento della popolazione e il conseguente bisogno di una maggior quantità di cibo; tuttavia, le teorie più quotate sostengono che lo sviluppo dell'agricoltura sia legato alle mutazioni climatiche di quel periodo, le quali provocarono un innalzamento delle temperature che avrebbe favorito la nascita e lo sviluppo delle coltivazioni.

I primi attrezzi adoperati per lavorare la terra furono pietre, ossa affilate e rami appuntiti e scottati sul fuoco per essere induriti. Attorno al 3500 a.C. fu inventato il primo aratro in legno che era destinato ad essere trainato manualmente e solo successivamente fu adattato al traino dei buoi, con l'inserimento di una punta in ferro al posto di quella in legno in modo da permettere un'usura minore all'attrezzo, ma si deve attendere al 1000 d.C. per notare delle importanti innovazioni come la ferratura degli zoccoli, l'aratro portato su ruote e la rotazione biennale delle coltivazioni.

Nel '700 in Inghilterra ebbe luogo la **seconda rivoluzione agricola** (Grigg, 2000), portatrice di una vasta ondata di cambiamenti, che sancì il passaggio dall'impiego della forza lavoro manuale all'energia meccanica. Furono introdotte le prime seminatrici meccaniche trainate dai buoi, dotate di un assolcatore per aprire il solco, nel quale il seme era inserito con regolarità da un semplice distributore rotante, e di un piccolo erpice a strascico nella parte posteriore che provvedeva a richiudere il solco, ricoprendo il seme. Inoltre, fu inventata la **trebbiatrice** da grano, che era in grado di mietere autonomamente il frumento, separando il grano dalla spiga e dalla paglia.

Perdipiù, la superficie di terreni coltivabili crebbe consistentemente, in quanto furono prosciugate le paludi, dissodati terreni incolti e la pratica del maggese, che prevedeva di lasciar riposare la metà del terreno ad anni alterni, fu sostituita con la coltivazione su rotazione biennale di piante azoto fissatrici come trifoglio ed erba medica.

L'interazione fra agricoltura e industria proseguì nei secoli seguenti, portando ad una profonda trasformazione di quasi tutti gli strumenti agricoli: gli attrezzi tradizionali

interamente in legno o con alcune parti in ferro battuto, costruiti dal falegname e dal fabbro del villaggio, furono soppiantati dalle macchine agricole.

L'insieme di queste migliorie permise un aumento della produttività e della redditività delle attività agricole, il quale diede origine allo sviluppo di aziende di grandi dimensioni gestite in forma capitalistica che sostituirono le piccole aziende contadine a gestione familiare.



Figura 15: primo sistema di trebbiatura meccanizzata del grano. Il frumento doveva essere sfalciato manualmente e raccolto in fasci per essere trasportato dalla mietitrebbia [45]

Nel 1854 Eugenio Barsanti e Felice Matteucci inventarono e brevettarono il motore a scoppio [46], primo propulsore a combustione interna che abbia mai funzionato. Questa tipologia di veicolo, antesignana del moderno trattore, fu gradualmente sostituita dal **trattore a “testa calda”** per via della maggior comodità e del costo di acquisto e mantenimento inferiore. La Fiat Trattori e la Landini furono i pionieri di questo prototipo di trattore nel periodo fra le due guerre mondiali, mentre la Ford progettò il Fordson, dotato di motore a benzina e cherosene.

Dal 1960 in poi si sono affermate trattrici equipaggiate con motori a gasolio, che si sono progressivamente evolute in termini di dimensioni e tecnologia, al fine di svolgere sempre più lavoro nel minor tempo possibile, in modo da sfruttare al meglio le condizioni meteorologiche favorevoli. Notevoli miglioramenti sono stati conseguiti anche a livello di comodità, consumi, emissioni e rumori.

Il fenomeno di migrazione interna, cominciato con la seconda rivoluzione industriale e tutt'ora in atto, ha generato un forte spostamento di popolazione dalla campagna verso la città, con una conseguente crescita degli abitanti nelle zone urbane. Di conseguenza, il personale agricolo è stato decimato con l'avanzare del processo di industrializzazione, evidenziando una sempre più marcata necessità di meccanizzare ogni operazione per ridurre il lavoro manuale, che richiedeva troppo tempo per essere svolto. Negli anni sono dunque stati perfezionati macchinari sofisticati per la preparazione e semina del terreno, per la fienagione, dallo sfalcio alla pressatura in balle, per la raccolta e per lo stoccaggio dei prodotti finiti.

2.2 La crisi del XXI secolo in Agricoltura

L'agricoltura è da secoli un settore trainante per l'economia italiana, ma purtroppo negli ultimi vent'anni si è verificata una crisi che ha avuto un impatto deleterio sul settore primario del paese: il settore agricolo sta, infatti, vivendo un periodo complicato per via di numerose cause che ne mettono a dura prova la sopravvivenza [47]:

- Costi elevatissimi di produzione, di gestione e di acquisto di nuovi macchinari;
- Cambiamenti climatici che sottopongono il nostro paese a condizioni meteorologiche estreme, come siccità prolungate, ondate di calore e precipitazioni violente concentrate in un breve lasso di tempo, che hanno danneggiato l'ecosistema e ridotto la produzione agricola;
- A seguito della globalizzazione, si è instaurata una concorrenza internazionale che ha portato l'agricoltura italiana a dover competere con i prodotti agricoli provenienti da altri paesi, ove i costi di produzione sono minori e gli standard qualitativi nettamente inferiori (Petras & Veltmeyer, 2002);
- Burocrazia e normative: il sistema italiano prevede un iter burocratico assai complesso e gli agricoltori italiani, in gran parte poco istruiti, spesso trovano difficoltà nella gestione odierna dell'azienda e nell'affrontare le nuove sfide.



Figura 16: i danni della siccità sulle piantagioni di mais [48]

I margini delle attività agricole tendono ad essere sempre più ristretti e l'unica strada percorribile per rimanere competitivi sembra essere quella di fare economia di scala: il numero di aziende si è ridotto drasticamente negli ultimi vent'anni e le poche imprese restanti hanno dimensioni sempre più considerevoli. Tra il 2005 e il 2020, in Europa sono scomparse 5,3 milioni di aziende agricole, di cui quasi 600mila italiane. In ultimo la pandemia, la guerra in Ucraina e l'inflazione hanno ulteriormente peggiorato la situazione, con un aumento del 25% dei prezzi dei beni e servizi agricoli nel 2022.

La carenza di opportunità economiche ha portato a una migrazione dei giovani verso le città, generando un depauperamento della popolazione rurale e una ridotta vitalità economica. Il ricambio generazionale si presenta come una delle maggiori sfide per l'agricoltura del XXI secolo: i figli di agricoltori che decidono di continuare l'attività di famiglia sono ormai pochissimi, la maggior parte preferisce intraprendere la strada verso settori più industrializzati e tecnologici, causando carenza di manodopera al servizio dell'agricoltura (Piras, 2024).

L'Italia ha il prestigio di essere tutt'ora la terza potenza agricola dell'Unione Europea ed è preceduta solo da Francia e Germania. I dati statistici riportati da Eurostat affermano che l'Italia produce il 12% del fatturato dell'Ue con circa 12 milioni di ettari di terreni coltivati, la Francia ne realizza il 17% con circa 28 milioni di ettari e, infine, la Germania è produttrice del 13% del fatturato con circa 18 milioni di ettari lavorati [49]. L'Italia detiene, inoltre, il primato assoluto nell'Ue per riconoscimenti IGP (Indicazione Geografica Protetta), DOP (Denominazione di Origine Protetta) e STG (Specialità Tradizione Garantita), senza

tralasciare il fatto che oltre il 40% dei vini Ig dell'Unione Europea è di produzione italiana, per un valore pari a 5 miliardi di euro.

Dunque, l'Italia vanta una qualità eccellente nella propria filiera agro-alimentare, ma il momento difficile che da qualche decennio sta attraversando ne sta riducendo profondamente l'apporto che questo settore offre al Pil italiano, oggi corrispondente solo più al 2,2%.

2.3 Dall'Industria 4.0 all'Agricoltura 4.0: nuove opportunità per un futuro competitivo

Il momento delicato che sta attraversando l'agricoltura italiana rappresenta una sfida significativa per la tradizione rurale del nostro paese. Tuttavia, l'adozione di soluzioni a lungo termine potrebbe giovare a superare questa crisi e sviluppare un settore agricolo più resiliente e sostenibile. È necessaria una cooperazione fra governo, agricoltori e la società nel suo complesso per innovare i processi produttivi e garantire competitività con i paesi esteri.

L'agricoltura è stata spesso catalogata come un ambiente "tradizionalista" e poco propenso al cambiamento, ma negli ultimi anni sta invece sperimentando con ottimi risultati l'implementazione della tecnologia nei processi produttivi e nella gestione aziendale. L'industria 4.0 sta trasformando la capacità di produzione di tutti i settori industriali, compreso il settore agricolo. L'ingresso delle tecnologie della quarta rivoluzione industriale nell'agrifood ha preso il nome di "**Agricoltura 4.0**", proprio per sottolineare il nesso con l'Industria 4.0. e con i principi che vi sono alla base. L'Internet of Things (IoT) sembra essere l'impatto più evidente dell'Industria 4.0 sull'agricoltura e l'interconnessione è la chiave di questa trasformazione.

L'agricoltura 4.0 è il risultato dell'integrazione dell'innovazione tecnologica nel campo agroalimentare allo scopo di ottimizzare le pratiche agricole e può essere considerata come un'evoluzione dell'Agricoltura di Precisione, grazie all'impiego di tecnologie avanzate capaci di raccogliere, integrare e analizzare automaticamente una vasta quantità di dati provenienti direttamente dai campi per mezzo di sistemi interconnessi e di sensori applicati sia sul terreno, per monitorare le condizioni ambientali e lo stato di salute della pianta, sia sulle macchine e sui mezzi agricoli, per la raccolta dei dati su una determinata lavorazione o per controllare in real time l'operato di un dipendente. A tal proposito, si parla oggi di **agrometeorologia**, ovvero l'insieme delle applicazioni e degli studi che completano il

sistema integrato di innovazione in agricoltura, introducendo il digitale nella componente meteorologica e climatologica dei processi. Attraverso la raccolta dei dati attendibili, quindi, l'agrometeorologia è di sostegno agli agricoltori nel prendere decisioni ponderate per efficientare la propria produzione agricola, tenendo in considerazione le condizioni meteorologiche più o meno favorevoli (Monteiro, 2009).

Invece, la geolocalizzazione dei trattori, l'interconnessione e la storicizzazione automatica dei dati di lavoro in un Cloud aziendale permettono la valutazione aggregata di tutti i parametri di costo effettivamente sostenuti per ogni coltura di ciascun appezzamento, in modo da poter stilare un bilancio complessivo sulle tecniche di lavorazione adottate per la coltivazione di una determinata piantagione e valutarne la profittabilità.

Tuttavia, il processo di evoluzione verso l'agricoltura 4.0 non si limita ad una semplice trasformazione del settore agricolo: si tratta piuttosto di un ambizioso passo verso un futuro che incarna i principi dell'innovazione tecnologica e della **sostenibilità ambientale**. Il nuovo paradigma agricolo non solo si propone di efficientare le pratiche colturali e la gestione delle risorse, bensì intende contribuire a risolvere sfide globali di cruciale importanza, come la sicurezza alimentare e l'impatto ambientale dell'agrifood.

Dunque, l'Agricoltura 4.0 sta rivoluzionando il settore primario grazie all'utilizzo di tecnologie innovative come l'intelligenza artificiale (AI), i trattori a guida autonoma, i Big data e dispositivi IoT (internet of things) che rappresentano un mezzo di supporto quotidiano per l'agricoltore nella **pianificazione delle strategie** per la propria attività, compresi i rapporti con tutti gli anelli della filiera, e creano valore sia per la singola azienda che per i suoi partner. Queste nuove soluzioni sembrano poter essere un valido strumento per dare avvio alla rinascita dell'agricoltura, in grado di garantire qualità e tracciabilità ai prodotti, migliorare l'efficienza dei processi di filiera e donare ad essa sostenibilità economica, ambientale e sociale, oltre ad un aumento della profittabilità [50].

L'adozione di tecnologie avanzate richiede, però, onerosi investimenti iniziali che sono spesso insostenibili autonomamente per le piccole e medie aziende agricole. Fortunatamente l'Unione Europea ha stanziato dei fondi per il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) post covid e l'Italia ha destinato buona parte di questi finanziamenti proprio all'Industria 4.0, in cui rientra anche l'agricoltura. Fornire sostegno finanziario agli agricoltori è essenziale per affrontare le difficoltà economiche riscontrate negli ultimi anni e stimolare gli investimenti innovativi in infrastrutture e macchinari.



Figura 17: andamento degli investimenti in Agricoltura 4.0 negli ultimi anni [51]

Come si può notare dal grafico, nel 2024 si è registrata un'inversione di tendenza del trend rappresentativo degli investimenti delle aziende agricole italiane in Smart Agrifood, probabilmente a causa del taglio delle aliquote contributive del credito d'imposta che per il 2024 era pari soltanto più al 20% dell'importo investito, meno della metà dell'agevolazione beneficiabile negli anni precedenti. Questo dimostra che ci troviamo in un momento storico in cui, in assenza di aiuti economici da parte dello Stato, l'Agricoltura rischia di arrestarsi, a causa di costi di produzione eccessivamente elevati.

La fase che sta attraversando attualmente l'agricoltura è particolarmente delicata siccome esige una buona organizzazione e competenze tecniche da parte degli utenti finali, ovvero gli agricoltori, che sono a diretto contatto con le soluzioni digitali a loro disposizione e con i servizi annessi. L'adozione di tecnologie avanzate richiede una **curva di apprendimento**, dunque, è necessario investire nella formazione, offrendo programmi di esercitazione e risorse didattiche che permettano agli agricoltori di cogliere appieno il potenziale delle tecnologie 4.0 e di sviluppare delle green skills per far fronte agli obiettivi globali di sviluppo sostenibile (Azzimonti & Caiello, 2025).

L'accesso a competenze digitali potrebbe essere d'aiuto per superare la **resistenza al cambiamento** che talvolta si manifesta nel settore agricolo. Non di rado, le consuetudini radicate e la tradizione possono ostacolare l'innovazione che comporta la trasformazione digitale. Quindi, è importante sensibilizzare gli agricoltori sui vantaggi tangibili dell'implementazione di queste tecnologie allo scopo di vincere questa resistenza e creare un ambiente favorevole al progresso. Attualmente, infatti, il mondo agricolo non è più

concepito in maniera tradizionale come in passato, ma è necessario conoscere le diverse opportunità per trasformare questo settore economico con strumenti all'avanguardia.

Con l'avvento della tecnologia in agricoltura si viene a creare un nuovo modello economico dove il lavoro nelle campagne per come lo si è sempre conosciuto cessa di esistere e si sviluppano mansioni nuove ed in costante trasformazione. Di conseguenza, è necessario un rinnovo generazionale che lasci spazio a giovani istruiti e desiderosi di stare al passo coi tempi. Ed è proprio questa la sfida che i giovani possono vincere grazie alle loro straordinarie potenzialità relative all'uso della tecnologia [52].

2.4 Agricoltura di precisione

L'agricoltura moderna tende a focalizzarsi sempre più sull'immissione di energia esterna al sistema sotto forma di fitofarmaci, fertilizzanti, miglioramento genetico delle piante e tecnologia di produzione. Si va, dunque, nella direzione di un'agricoltura essenzialmente intensiva. La crescita perenne dei fabbisogni alimentari mondiali, l'esigenza di mantenere concorrenziali i prezzi degli alimenti, la riduzione della superficie coltivabile, la necessità di coltivare anche in zone nettamente svantaggiate e di poter ottenere prodotti di qualità nutrizionale elevata spingono i coltivatori a cercare nuove soluzioni che siano compatibili con la buona riuscita del prodotto finale, ma anche con la sostenibilità ambientale. L'agricoltura intensiva, infatti, presenta evidenti problemi di sostenibilità e per questo è imprescindibile l'utilizzo di tecnologie di settore che giovano alle problematiche ambientali. Al giorno d'oggi si tende a parlare di "Agricoltura 4.0" la quale rappresenta uno sviluppo del concetto di Agricoltura di Precisione, ma che utilizza le medesime tecnologie di quest'ultima con l'aggiunta dell'interconnessione fra i vari dispositivi aziendali per sviluppare un unico sistema digitalizzato.

Il termine Agricoltura di Precisione (*Precision Farming*) [53] è stato coniato nel 1990 in un workshop nel Montana, anche se i principi di questa pratica innovativa si sono sviluppati sin dagli inizi della moderna agricoltura, con la divisione della terra in parcelle (campi) al fine di assicurare alle colture quantità ottimali di fertilizzanti, pesticidi e acqua in relazione alle condizioni eterogenee del terreno e, di conseguenza, ottimizzare la produzione agricola in termini di standard qualitativi e quantitativi. All'interno di un appezzamento, infatti, vi è un'alta probabilità che le condizioni in cui si trova la pianta non siano omogenee e che vi

siano, invece, delle discrepanze che portano ad avere una produzione non uniforme. Questa variabilità può dipendere da diversi fattori, quali: le caratteristiche morfologiche del suolo, la fertilità, la presenza di avvelenamenti, la porosità del terreno. Perdi più la variabilità non si manifesta solo nello spazio, ma anche nel tempo: affrontare la variabilità significa gestire il processo produttivo in maniera diversificata. Per mettere in pratica questa ideologia è necessario disporre di tecnologie e tecniche capaci, in primo luogo, di cogliere le disomogeneità, mediante l'acquisizione e l'elaborazione di un set informativo; in secondo luogo, di applicare in modo variabile gli input colturali all'appezzamento in questione [54].

L'unione dei sistemi di posizionamento globale (GPS) e dei sistemi di informazione geografica (GIS) rappresenta la spina dorsale dell'agricoltura di precisione. Infatti, consente la raccolta accurata di dati sito-specifici e offre agli agricoltori la possibilità di realizzare mappe dettagliate per applicazioni a tasso variabile degli input produttivi, nonché per analisi del suolo e rilevamento di parassiti.

Dunque, diventa fondamentale il ruolo dell'agricoltura di precisione che, grazie ad un insieme di tecniche atte all'acquisizione di informazioni, all'elaborazione e alla ricerca di metodi applicativi, permette trattamenti diversificati in base al suolo, per il raggiungimento di una produttività omogenea e di qualità, minimizzando gli sprechi. Si tratta di una metodologia che, attraverso l'utilizzo delle *Information Technologies* [55], fornisce gli strumenti per eseguire **le giuste azioni, nel posto e al momento giusto**. La precisione introdotta dalle tecnologie, difatti, permette di effettuare una distribuzione mirata dei principali elementi produttivi (acqua, fertilizzanti, fitofarmaci) solo dove necessario e nella misura corrispondente al reale fabbisogno della coltivazione in atto. Per questo motivo, l'agricoltura di precisione è il metodo che offre la possibilità di concretizzare a pieno il concetto di intensificazione sostenibile della produzione agricola.

In sintesi, l'ADP è un sistema di gestione integrato di osservazioni, misure e azioni, associate a fattori e variabili dinamiche negli ordinamenti produttivi, valutando di volta in volta gli effetti positivi dei fattori di produzione in funzione delle varietà in campo. Ciò allo scopo di implementare, in seguito ad un'analisi dei dati, un apparato di supporto decisionale per l'intera gestione aziendale, che offra una maggiore sostenibilità ambientale, economica, produttiva e sociale.

Le prime tecnologie caratterizzanti l'agricoltura di precisione si sono sviluppate intorno agli anni '70 nei centri di controllo degli Usa. Negli anni '80 sono stati introdotti il monitoraggio del campo e i microprocessori, mentre per l'avvento del Gps in agricoltura si è dovuto

attendere gli anni '90. L'evoluzione e il perfezionamento di questi elementi hanno contribuito a dare origine al fulcro del sistema di agricoltura di precisione, costituito da:

- **Strumenti di mappatura del campo;**
- **Sistemi di posizionamento e tracciamento globale**, come ad esempio il *GPS*;
- **Software gestionale**, per la raccolta dei dati dai terreni e per la loro traduzione in parametri economici e di business.

Le metodologie utilizzate per la distribuzione variabile sono sostanzialmente due: quella basata su mappe di prescrizione e quella su sensori. La prima modera la dose di prodotto da erogare in base alle informazioni riguardo alle caratteristiche dell'appezzamento contenute nelle mappe di prescrizione. La seconda, invece, fa uso di dispositivi che elaborano in tempo reale dati interessanti, come le caratteristiche chimico-fisiche del terreno, al fine di sfruttarli come indicatori per gestire e programmare le operazioni da svolgere. Queste due metodologie si differenziano in primis per la georeferenziazione, che è parte essenziale delle mappe di prescrizione e che non è invece necessaria in un sistema puramente sensoristico. A titolo di esempio si possono citare i **sensori NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) [56] che sono in grado di valutare in tempo reale la fotosintesi della vegetazione e variare il dosaggio di concime in base al grado di vigoria della coltura. Un altro esempio è l'installazione, sulle attrezzature agricole, di sensori ottici tarati per riconoscere le erbe infestanti e capaci di ordinare all'attrezzo di intervenire meccanicamente o con la distribuzione di un diserbante sulla vegetazione da eliminare.

L'incremento produttivo conseguibile con i mezzi dell'Agricoltura di Precisione si rivela vitale nell'attuale scenario che prevede per il 2050, secondo le stime della FAO, la necessità di produrre quasi il 50% in più di cibo, mangimi e biocarburanti rispetto al 2012, per soddisfare la domanda. Questa stima tiene in considerazione le recenti proiezioni delle Nazioni Unite (ONU) che mostrano come la popolazione mondiale potrebbe raggiungere i 9,7 miliardi nel 2050. Nell'Africa subsahariana e nell'Asia meridionale, la produzione agricola dovrebbe più che raddoppiare entro il 2050 per fronteggiare l'aumento della domanda, mentre nel resto del mondo l'incremento previsto dovrebbe essere di circa un terzo rispetto ai livelli attuali (Fao, 2022).

2.4.1 Sistema di guida satellitare

La concretizzazione del concetto di agricoltura di precisione necessita della possibilità di far percorrere ai mezzi agricoli **traiettorie predefinite**. Per conseguire tale scopo, i conducenti devono monitorare contemporaneamente sia le funzioni di lavoro dell'attrezzo che la direzione di avanzamento. Questa sovrapposizione di compiti comporta un elevato dispendio di energie psico-fisiche, assai gravoso quando si devono eseguire lavori di somministrazione degli input produttivi che richiedono la percorrenza di traiettorie parallele ed equidistanti, al fine di ridurre al minimo **sovrapposizioni** e porzioni di terreno non trattate.

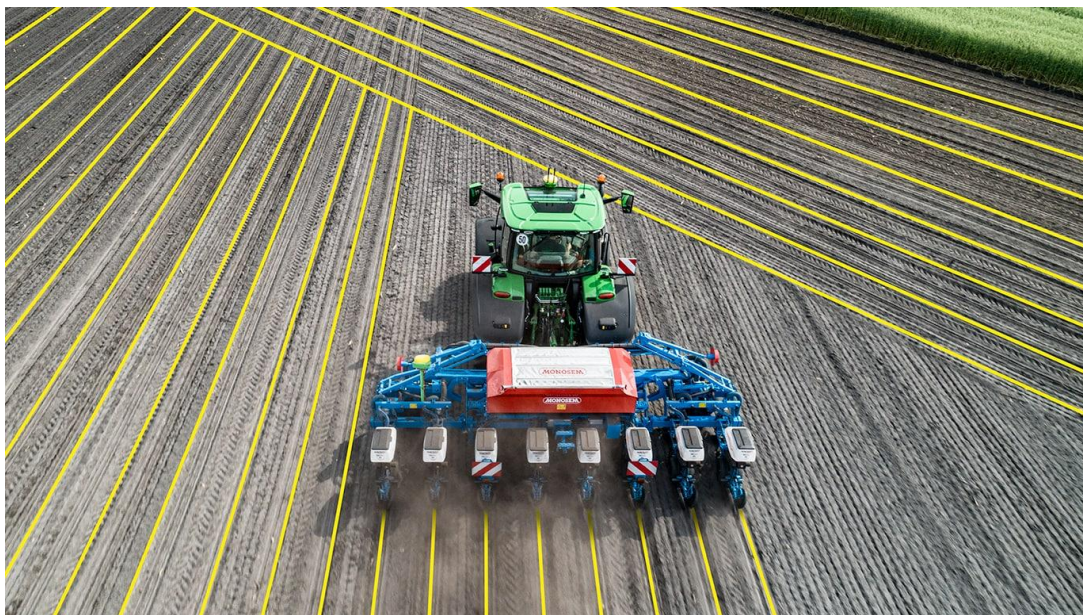


Figura 18: simmetria e precisione dei filari di mais seminato con guida satellitare [57]

La precisione di guida necessaria è elevatissima soprattutto nel caso di prodotti fitosanitari, in quanto le dosi irrorate sono spesso al limite dell'efficacia o, all'opposto, della tossicità e quindi vi è poco margine di tolleranza. In tali situazioni operative, la guida manuale risulta fortemente sconsigliata, in quanto imprecisa e condizionata dalle condizioni ambientali del momento: se la visibilità non è ottimale a causa di nebbia o di orario di lavoro notturno, l'accuratezza con la quale sono perseguite le traiettorie peggiora sensibilmente, siccome risulta difficoltoso individuare eventuali punti di riferimento. Pertanto, indipendentemente dall'abilità più o meno elevata dell'operatore, è improbabile evitare sovrapposizioni e distacchi tra una passata e l'altra affidandosi alla guida tradizionale, soprattutto con l'incessante crescita delle dimensioni delle macchine operatrici e della larghezza di lavoro coperta. Ipotizzando un soggetto esperto alla guida, studi dimostrano che nelle migliori condizioni il minimo grado di sovrapposizione si aggira intorno al 10%, con punte sino al

20-25% nel caso in cui ci si trovi ad effettuare lavorazioni in appezzamenti di piccole dimensioni e dalla forma irregolare. Di conseguenza, si incorre in un prolungamento dei tempi di lavoro, nonché incremento dei consumi di carburante e spreco di prodotto distribuito, con pesanti ricadute sugli aspetti agronomici, ambientali ed economici a livello aziendale (Casa, 2016).

In questo contesto applicativo si inseriscono con successo i **sistemi di guida satellitare**. Essi consentono di avere un'elevatissima precisione nelle lavorazioni, risparmiando **tempo e input produttivi** (gasolio, prodotti fitosanitari, fertilizzanti, ecc.) e contribuendo a minimizzare l'affaticamento dell'operatore e, di conseguenza, il rischio di incidenti.

La guida satellitare prevede l'installazione di sistemi di guida semi-automatica (tramite **Gps**) sui mezzi agricoli in modo da ridurre il compito dell'operatore alla sorveglianza del lavoro e alle manovre di fine campo, mentre la linea di guida è seguita autonomamente dal trattore. A seconda della conformazione dell'appezzamento e del tipo di lavorazione che si deve svolgere è possibile adottare traiettorie rettilinee, spezzate o percorsi curvi. Nel caso di percorsi rettilinei è sufficiente selezionare dal monitor in cabina due punti A e B, attraverso i quali il satellitare traccia una linea congiungente ed infinite rette parallele ad essa, che saranno seguite durante la lavorazione fino al confine dell'appezzamento. Tuttavia, può essere più utile seguire un lato curvilineo dell'appezzamento; dunque, si comincia eseguendo una prima passata manualmente, che viene registrata per intero dal sistema e ripetuta autonomamente per le successive passate, con la capacità di disegnare traiettorie equidistanti anche in curva, dove l'attrezzo tende a 'tagliare' rispetto al punto di percorrenza del trattore ed è quindi necessario allargare la sterzata. Inoltre, in presenza di un percorso che si caratterizzi di un tratto rettilineo seguito da una curvatura e da una successiva linea retta, la mappa del satellitare è in grado di trarre punti di riferimento dalla traiettoria eseguita manualmente e memorizzare una linea che segua la stessa direzione ma corregga le imperfezioni dei tratti rettilinei che inevitabilmente caratterizzano il tragitto percorso dall'operatore. Una volta mappato, l'appezzamento rimane in memoria per sempre, agevolando le successive lavorazioni per le quali sarà sufficiente selezionare le linee guida utilizzate la prima volta.

Il sistema di guida automatica necessita di un computer di bordo collegato ad un modulo di ricezione satellitare a doppia frequenza (GPS) con correzione RTK (Real time kinematic), che identifica la posizione del trattore nel campo con un errore massimo di 2-3 centimetri, oltre che di sensori e attuatori, responsabili della correzione automatica della traiettoria [58].

L'interfaccia si compone di un display grafico touchscreen che permette l'interazione istantanea con il sistema ed è caratterizzato da un layout semplice ed intuitivo.



Figura 19: interfaccia del sistema di guida satellitare John Deere [59]

A seconda che la guida automatica sia integrata dalla casa madre nel momento di fabbricazione del trattore o che sia installata in un secondo momento, si possono avere sistemi che intervengono direttamente sul circuito idraulico dello sterzo senza che l'operatore in cabina veda nulla, oppure dispositivi che pilotano meccanicamente il volante, sostituendosi all'azione dell'uomo. Nel primo caso, si procede ad inserire un'elettrovalvola proporzionale sul circuito idraulico dello sterzo, comandata dal computer di bordo. Quest'ultimo, elabora i dati di posizione dal ricevitore satellitare, calcola lo scostamento rispetto alla collocazione ideale e regola, di conseguenza, l'apertura del cilindro idraulico che movimentata le ruote direttrici. Il risultato è un aggiustamento immediato e notevolmente efficace della traiettoria. Nel secondo caso, invece, è installato un motore elettrico ad elevata coppia che opera direttamente sulla corona del volante per mezzo di un piccolo pignone, altrimenti è collegato al piantone dello sterzo. In ambedue le modalità, il dispositivo compie in automatico le correzioni necessarie della traiettoria, lasciando all'operatore il solo compito di effettuare la manovra di svolta a fine passata e di sorvegliare la lavorazione dell'attrezzo.

Trattandosi di un piccolo attuatore elettrico, il vantaggio di adottare un kit di guida satellitare in un secondo momento è quello di poter essere rimosso e installato in pochi minuti su più trattori, in base alle lavorazioni da svolgere.

Infine, la guida satellitare può agevolare una più efficiente **gestione aziendale**, poiché per ogni lavorazione eseguita è data facoltà di memorizzare sul computer di bordo data di svolgimento, durata, superficie lavorata e traiettoria selezionata per ogni singolo appezzamento, garantendo un'accurata compilazione, seppur semplificata, del sistema informativo aziendale (Sabry, 2021).

2.4.2 Mappatura digitale degli appezzamenti

La georeferenziazione è una tecnica che permette di associare un dato digitale alle coordinate geografiche (x, y) ed è sfruttata nell'Agricoltura di Precisione per conoscere l'esatta posizione nel corso delle lavorazioni, grazie alla connessione con dispositivi satellitari. Tale tecnologia consiste nell'applicazione sulle attrezzature agricole di sensori in grado di registrare, in maniera localizzata, informazioni relative alle caratteristiche del terreno e dei prodotti, come umidità, quantità e altri parametri qualitativi [60]. Successivamente, l'elaborazione di questi dati consente di ripartire e visualizzare le informazioni su mappe colorate, dette **mappe di prescrizione**. Il processo di analisi dei dati può cominciare con la mappa delle rese, la quale è realizzata a partire dalle informazioni sulla produzione ricavate dalle macchine da raccolta, ad esempio al momento della trebbiatura del mais, e permette di capire in che misura si manifesta la variabilità all'interno di un appezzamento nella resa della coltura raccolta, ma non le cause di questa discrepanza. È necessario, quindi, procedere ad acquisire altre informazioni, sempre strutturate in mappe, che permettano di capire quali sono le cause che portano ad una produzione non omogenea all'interno della superficie dell'appezzamento. In particolare, è doveroso analizzare la **composizione chimica del terreno** [61] attraverso un campionamento del suolo con una sonda in grado di prelevare carote di terreno del diametro di 4-6 cm con una profondità di 30-40 cm, effettuando un carotaggio ben distribuito in almeno 15 punti per ettaro, secondo un andamento a croce o a zig-zag. È fondamentale che la superficie da cui si preleva sia omogenea per colore, aspetto e coltura.

Una volta raccolte le carote di terreno (campioni elementari), la metodologia tradizionale prevedeva di mescolarle accuratamente per poi analizzare in laboratorio una porzione del prelievo complessivo. L'agricoltura di precisione, invece, intende analizzare singolarmente campione per campione, tenendo traccia della posizione precisa nella quale esso è stato

2.4.3 Monitoraggio delle rese e analisi NIR

L'integrazione dei set informativi ricavati dalle analisi del suolo con la mappatura delle rese permette di conseguire una piena ed efficace applicazione dell'Agricoltura di Precisione ed è il punto di partenza per lo sviluppo delle tecnologie 4.0 che, facendo tesoro delle informazioni sul terreno da lavorare, coordinano i diversi macchinari dell'agricoltura di precisione per ottimizzare l'efficienza degli input produttivi e le rese delle colture.

La mappatura delle rese è elaborata in maniera istantanea dalle **macchine da raccolta** durante la mietitura dei cereali, grazie ad un equipaggiamento di apparecchi tecnologici 4.0 che analizzano il prodotto finito non solo limitatamente a parametri quantitativi come tonnello e umidità, ma anche dal punto di vista qualitativo, grazie alle informazioni che sono in grado di captare specifici sensori operanti sulle lunghezze d'onda del cosiddetto *near infrared* [63]. Parametri come sostanza secca, amido, contenuto di proteine e fibre sono oggi rilevabili con i sensori **NIR**, che sfruttano la riflessione ai raggi infrarossi di un flusso costante e calibrato di prodotto finito. Questi sensori sono posizionati all'interno di un condotto che deriva la granella dall'elevatore e la trasporta nel serbatoio del cereale e, dopo essere stati opportunamente tarati, forniscono un'analisi accurata del prodotto in tempo reale durante la fase di trebbiatura. La precisione che caratterizza i sensori NIR è assai elevata e, in alcuni Paesi, ha addirittura valore legale nelle negoziazioni commerciali. Un piccolo errore di misurazione non incide sulla valutazione della partita, dal momento che la misura complessiva proviene da una sequenza di rilevamenti che annullano gli errori di campionamento, sempre possibili al contrario con il singolo prelievo dal rimorchio.



Figura 21: mappatura in tempo reale delle rese e dei consumi durante la trebbiatura del frumento [64]

L'elemento di maggior interesse è che l'analisi è effettuata istante per istante: ogni misurazione è, perciò, riferibile alla porzione di superficie da cui proviene il prodotto, tenendo conto del ritardo tra l'istante del taglio della pianta e quello in cui il prodotto finale passa dinanzi al sensore, a causa della tempistica di trebbiatura della coltura. Combinando le funzionalità di tali sensori con il sistema di guida satellitare, è possibile inserire le informazioni sulle rese nella **mappatura degli appezzamenti**, la quale fornisce un'illustrazione accurata della produzione ricavata per ogni area dell'appezzamento considerato, con i rispettivi parametri qualitativi.

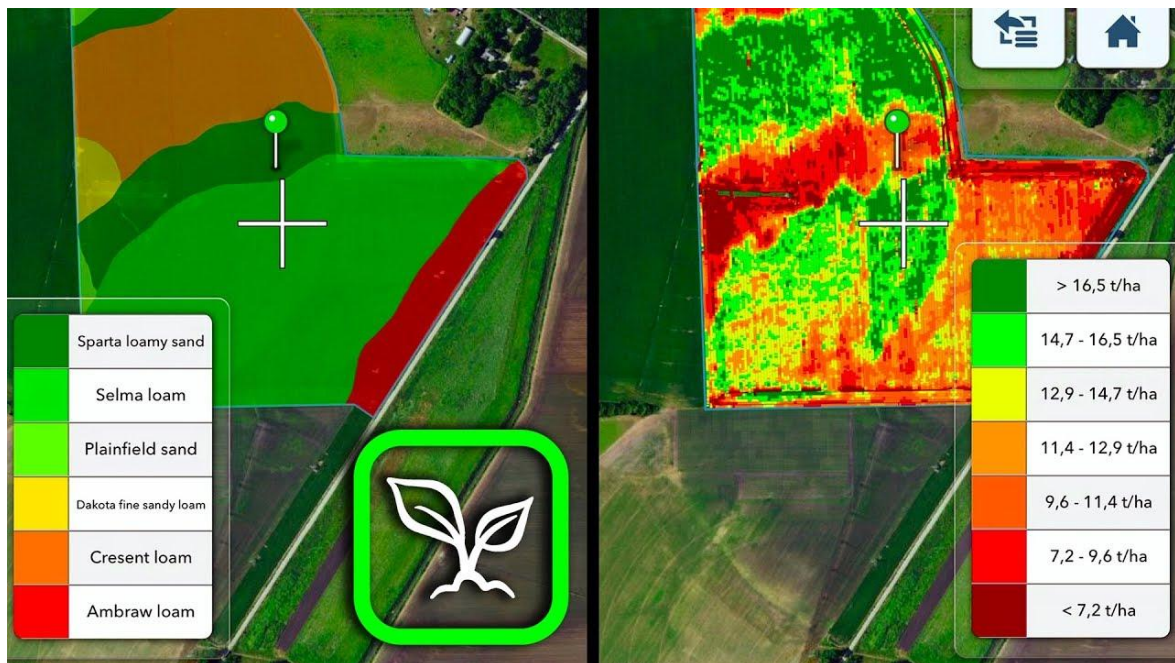


Figura 22: confronto fra mappa digitale del terreno e della resa produttiva [65]

Si crea così una banca dati utile per coordinare le lavorazioni di semina, diserbo e concimazione mirata negli anni successivi. I dati raccolti dal sistema EVO NIR possono essere trasferiti al PC aziendale tramite chiavetta USB o trasmissione Wi-Fi. Anche le trince semoventi sono dotate di sensori NIR, per l'analisi degli insilati destinati all'alimentazione zootecnica o ad impianti biogas [66].

Negli allevamenti zootecnici occorre pianificare razioni di alimentazione personalizzate per sfruttare in maniera ottimale la combinazione fra i prodotti stoccati in azienda e, dunque, risulta essenziale essere a conoscenza delle caratteristiche dei propri insilati, pastoni, farine e semiseccchi in modo da poter bilanciare al meglio i micronutrienti apportati agli animali. Perdipiù, i sistemi di interconnessione 4.0 permettono di tenere sotto controllo lo stato della macchina sul proprio pc o smartphone, osservando il livello di riempimento del serbatoio di

carburante e dell'AdBlue, la localizzazione GPS, la velocità di avanzamento del trattore e l'attrezzo ad esso collegato. Queste informazioni sono memorizzate e automaticamente incluse nella mappatura digitale dell'appezzamento, con l'attribuzione dei consumi di carburante ad ogni porzione specifica di superficie.

Avvalendosi della mappatura delle rese elaborata dalle macchine da raccolta, è possibile valutare a posteriori la bontà delle scelte compiute per la coltivazione di una pianta in un determinato appezzamento e agire di conseguenza negli anni successivi, per evitare di commettere i medesimi errori.

2.4.4 Attrezzature ISOBUS con dosaggio rateo variabile

La collocazione di sensori di monitoraggio in campo e l'impiego dei droni consente ormai una sorveglianza in tempo reale sullo stato di salute delle colture, tenendo sotto controllo, per esempio, l'insorgenza di fitopatogeni o condizioni ambientali sfavorevoli che stanno danneggiando la pianta. L'integrazione fra i dati provenienti dai sensori di monitoraggio, droni e dalla mappatura digitale degli appezzamenti consente all'agricoltura 4.0 di agire in maniera eterogenea all'interno dell'appezzamento, tenendo conto delle reali esigenze sito-specifiche della coltura.

Le tecnologie a rateo variabile sono uno strumento avanzato di agricoltura di precisione, nate per evitare le sovrapposizioni in capezzagna, ma che ben si adattano ad affrontare la variabilità del suolo. Esse offrono, infatti, agli agricoltori la possibilità di distribuire gli **input produttivi in modo non uniforme** all'interno dell'appezzamento, a seconda delle necessità della pianta in quel punto del campo. Il rateo variabile è un metodo di apporto dei fattori della produzione basato sulla lettura di mappe di prescrizione, al fine di uniformare la vigoria e raggiungere il miglior compromesso tra resa e qualità (Priori et al., 2016). Le lavorazioni colturali che ben si prestano a questo tipo di operazioni sono la **semina, la concimazione, la distribuzione dei reflui e i trattamenti** contro agenti patogeni ed erbe infestanti. Questi processi permettono di ridurre la quantità complessiva di input applicato e automatizzare la coltivazione delle piante. Grazie alla guida satellitare, collegata ad un ricevitore Gps, e alle mappe precaricate sul computer di bordo, è assegnata ad ogni area una quantità specifica di seme, fertilizzante e trattamento antiparassitario, tenendo in considerazione il grado di vigoria della pianta, la resa degli anni precedenti e la conformazione chimica del terreno. Sulla base di queste informazioni, l'attrezzo dosa automaticamente il rilascio del prodotto in virtù della propria localizzazione in campo.



Figura 23: Processo di concimazione con dosaggio a rateo variabile tre misure differenti [67]

In questo modo nelle zone più fertili, che produrrebbero il massimo della resa anche senza molte accortezze, vi sarà un apporto minimo di fertilizzanti, viceversa nelle aree a bassa spinta produttiva si cercherà di massimizzare l'ausilio esterno di sostanze nutritive per la pianta. Questo approccio si traduce innanzitutto in risparmio economico per l'agricoltore e in maggior efficienza produttiva, ma anche in un'evoluzione sostenibile delle pratiche agronomiche che mettono il rispetto dell'ambiente al centro delle proprie prerogative.

2.5 Climate Smart Agriculture

Il cambiamento climatico in atto richiede approcci innovativi che rispondano alle sfide della sicurezza alimentare, dello sviluppo sostenibile e del cambiamento climatico. A tal proposito la FAO ha diffuso, a partire dal 2010, un'ulteriore evoluzione dell'Agricoltura di Precisione che consiste nella Climate Smart Agriculture (CSA) (Lipper et al., 2017).

La CSA si basa sui tre seguenti principi fondamentali:

1. **Intensificazione sostenibile**, accrescendo la produttività e il reddito degli imprenditori agricoli nel rispetto dell'ecosistema. Questo principio spinge gli agricoltori a ottimizzare l'uso delle risorse, migliorare l'efficienza e adottare pratiche ecologicamente corrette avvalendosi degli strumenti che offrono l'Agricoltura di precisione e l'integrazione tecnologica.

2. **Adattamento ai cambiamenti climatici**, con l'adozione di misure proattive per migliorare la resilienza dei sistemi agricoli attraverso una diversificazione delle colture per mitigare il rischio, nonché l'implementazione di pratiche efficienti per la raccolta delle acque piovane e l'installazione di impianti d'irrigazione a goccia per fronteggiare alla scarsità d'acqua.
3. **Mitigazione delle emissioni di gas serra**, riducendo l'impatto dell'agricoltura sul clima e sulle risorse naturali. La CSA propone di contenere il più possibile le emissioni di gas serra prodotte da questo settore, ad esempio adottando fonti di energia rinnovabile per le attività agricole, e di incrementare la capacità dello stesso di sequestrare il carbonio integrando gli alberi nei paesaggi agricoli. A tal proposito, è doveroso citare l'iniziativa africana lanciata nel 2013, denominata "**Grande Muraglia Verde**" [68], la quale si propone di realizzare una barriera arborea di piante particolarmente resistenti alla siccità con un'estensione di 8mila km di lunghezza e 15km di larghezza, che attraverserà il continente africano orizzontalmente, dal Senegal al Gibuti. Lo scopo di questo progetto è di contenere l'avanzata della desertificazione del suolo africano e le sue disastrose conseguenze, con la creazione di 10 milioni di posti di lavoro e l'adozione di tecniche di agricoltura rigenerativa, in modo da salvare potenzialmente 100 milioni di ettari di terreno coltivabile.

La filosofia della CSA sostiene che, per affrontare le importanti sfide del futuro, il settore agro-alimentare debba divenire più resiliente oltre che più efficiente, cercando di prevenire fenomeni quali l'innalzamento delle temperature e gli eventi meteorologici, agendo sul fronte della mitigazione. Allo stesso tempo, è essenziale sviluppare dei sistemi di protezione che possano limitare l'impatto del cambiamento climatico e adattare le odierne pratiche produttive e abitudini alimentari alle nuove condizioni economiche e ambientali a cui esso potrebbe dare vita. Tuttavia, è importante precisare che la CSA non prescrive specifiche pratiche o politiche da adottare, né tanto meno delinea un nuovo modello agricolo: la sua finalità è piuttosto quella di stimolare un **nuovo approccio** allo sviluppo dei sistemi agro-alimentari, che tenga in considerazione la profonda interconnessione tra le minacce della sicurezza alimentare e del cambiamento climatico [69].

2.6 IOT in Agricoltura

L'impiego di nuove tecnologie del paradigma Internet of Things (IoT) in agricoltura sta rivoluzionando il settore, garantendo una maggior efficienza e sostenibilità. Attraverso lo sviluppo di applicativi di Smart Agriculture (SA) (Azroul et al., 2025) come sensori, droni e altre tecnologie connesse, l'IoT consente di monitorare e gestire le colture, il suolo e le risorse idriche in base alle condizioni meteorologiche in tempo reale, ottimizzando le pratiche agricole e riducendo gli sprechi. L'ottimizzazione delle risorse che ne deriva è dovuta al fatto che la gestione delle coltivazioni risulta più precisa ed efficiente, grazie alla mole di dati ed informazioni a disposizione.

Gli applicativi dell'IoT nell'agricoltura intelligente sono molteplici e di varia natura: dall'installazione di sensori specifici per le coltivazioni (come sensori nel suolo, rilevatori fogliari, telecamere, contatori idrici intelligenti) per il **monitoraggio di parametri rilevanti** sulla crescita delle colture, fino all'impiego di attuatori IoT (come, per esempio, impianti di irrigazione automatizzata, strumenti di controllo della temperatura, sistemi automatici di alimentazione per animali, ecc..) che sostituiscono l'intervento umano compiendo azioni in maniera autonoma sulla base delle informazioni ricevute dai sensori e di algoritmi sviluppati ad-hoc (Mukhtar et al., 2025).

Una seconda funzionalità estremamente rilevante delle applicazioni dell'IoT riguarda la **predizione delle informazioni agronomiche**. Infatti, grazie ad algoritmi basati su tecniche di Intelligenza Artificiale (IA), come la regressione lineare, si può prevedere, ad esempio, il momento ideale per la raccolta del mais con qualche settimana di anticipo; oppure si può anticipare la comparsa di malattie o parassiti sulle piante. La capacità di predire valori strettamente collegati alla crescita delle piante, a partire dallo storico dei dati raccolti dai sensori IoT, offre agli agricoltori la possibilità di pianificare in modo più efficiente le attività in campo.

2.6.1 Smart Irrigation

La complessità strutturale di un impianto di irrigazione e della sua applicazione in campo non rende immediata la comprensione della bontà del processo irriguo soprattutto in termini di **efficienza irrigua**. Questo parametro indica quanta acqua distribuita raggiunge effettivamente l'apparato radicale delle piante, rispetto alla quantità totale prelevata. Ad esempio, preso un impianto con efficienza irrigua del 90%, il 10% dell'acqua parte dal punto

di pescaggio, ma non arriva al terreno per perdite di diverso genere. Di conseguenza, un'elevata efficienza irrigua è fondamentale per un uso sostenibile delle risorse idriche, in quanto limita gli sprechi e ottimizza la produzione agricola. Sistemi di irrigazione come quello a goccia, se ben progettati e gestiti, possono raggiungere un'efficienza del 95%, contro un valore del 40-50% per quanto riguarda l'irrigazione tradizionale a scorrimento.

Le soluzioni smart per l'irrigazione propongono un approccio intelligente e sostenibile che fa uso di sistemi connessi e automatizzati, rendendo la cura delle piante più efficiente e meno dispendiosa in termini di tempo e risorse. La cosiddetta “**Smart Irrigation**” (Elbana, 2025) è un'architettura di comunicazione distribuita caratterizzata da automazione, controllo remoto e facilità di gestione del ciclo irriguo. Grazie all'impiego di centraline, sensori e attuatori, questi impianti monitorano condizioni atmosferiche, stato del terreno e fabbisogno idrico della pianta, attivando l'irrigazione solo quando strettamente necessario e nella misura opportuna. Dunque, si ha un approccio totalmente rivoluzionario rispetto ai sistemi tradizionali preimpostati per l'attivazione ad ogni intervallo temporale fisso o l'irrigazione manuale basata sulle valutazioni soggettive dell'agricoltore. La smart irrigation analizza concretamente le condizioni ambientali e le esigenze specifiche delle piante per fornire la **giusta quantità d'acqua al momento giusto**. Questo approccio consente di migliorare lo stato di salute delle piante e di generare un risparmio idrico significativo, riducendo l'impatto ambientale del settore primario sull'ecosistema [70].

Il suddetto modello e la sua implementazione sono applicabili in qualsiasi contesto sia esso il semplice orto casalingo o terreno di grandi dimensioni: ciò che differisce è il numero dei controller e dei sensori che dovranno essere installati a seconda delle dimensioni e della variabilità della composizione del terreno da gestire. Gli irrigatori, i sensori e le centraline di comando sono dotati di tecnologia Wi-Fi, che permette una comunicazione istantanea ed efficace fra di essi, oltre a rendere costantemente informato l'agricoltore attraverso un'applicazione sul proprio smartphone. La tecnologia della smart irrigation si può adattare anche ad un sistema di irrigazione preesistente oltre che essere implementata partendo da zero su un impianto di nuova generazione, sia esso a goccia o a pioggia.

2.6.1.1 Progetto Wappfruit

Il progetto Wappfruit [71], finanziato dalla regione Piemonte, è cominciato nel novembre 2020 in seguito all'iniziativa del Politecnico di Torino, rappresentato in questo caso dai

professori Danilo Demarchi e dai collaboratori Umberto Garlando e Mattia Barezzi, unitamente al contributo dell'Università di Torino, della fondazione Agrion, dell'azienda di progettazione elettronica Astel e di tre produttori agricoli locali.

Questo progetto riguarda lo sviluppo di tecnologie intelligenti applicate alla gestione dell'acqua in agricoltura, ovvero l'implementazione di un sistema di irrigazione totalmente automatizzato che sia in grado di valutare l'esatto fabbisogno idrico della pianta e consenta di ottimizzare l'utilizzo delle risorse idriche nella produzione di frutta. In particolare, i tre agricoltori che hanno partecipato all'iniziativa hanno messo a disposizione i loro appezzamenti di mele e kiwi per l'installazione di un impianto innovativo di irrigazione automatizzata, basato su sensori IoT localizzati a tre diverse profondità nel terreno (-20, -40 e -60cm), che monitorano costantemente la **potenza matriciale del suolo** (ovvero la pressione che la pianta deve esercitare sul terreno per estrarre l'acqua) e il **contenuto idrico volumetrico** (ossia la percentuale di acqua nel suolo rispetto alla fase solida), oltre alla temperatura del suolo.



Figura 24: collocazione dei sensori nel terreno [72]

I dati rilevati dai sensori sono elaborati dalla centralina di lettura *Wappsen*, la quale comunica via wireless tramite il protocollo LoRaWAN, caratterizzato da basso consumo energetico e ampio raggio d'azione, sia con la centralina di attuazione *Wappact*, responsabile del comando di apertura e chiusura dell'elettrovalvola, sia con il server del sistema detto *Wappbrain*. Quest'ultimo è il cervello del sistema e si occupa di elaborare i dati captati dai

sensori e valutare, in base alle soglie di attivazione preimpostate, quando è il momento di attivare l'irrigazione e, di conseguenza, inviare l'ordine di apertura alla Wappact. Stesso discorso vale per l'interruzione dell'irrigazione e la chiusura dell'elettrovalvola [73].

Tutti i dati raccolti dalle centraline (sensori, numero e tempistica delle attivazioni delle irrigazioni, temperatura, ecc.) sono memorizzati nel cloud del server e, dunque, fruibili da remoto mediante un'interfaccia web o tramite app per smartphone dedicata. In questo modo il produttore può monitorare in tempo reale i diversi settori irrigui e, se lo desidera, intervenire manualmente spegnendo o attivando l'impianto di irrigazione a distanza.

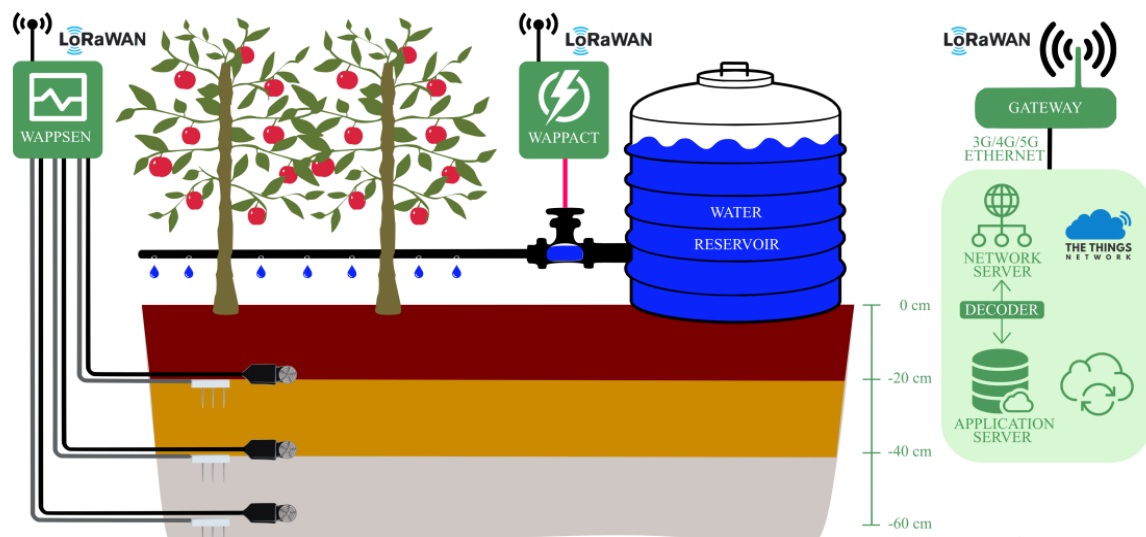


Figura 25: sistema di irrigazione realizzato da Wappfruit [74]

Tale sistema innovativo è stato messo a confronto con la consueta pratica irrigua aziendale, strutturata in un impianto a goccia temporizzato, azionato mediante centraline con programmatori a tempo predeterminati. Ovviamente questa metodologia è assai limitata in quanto non è possibile tarare a priori il sistema in modo da fornire l'esatto volume idrico necessario alla pianta, siccome vi sono molte variabili come temperatura, umidità, tipo di terreno e precipitazioni meteorologiche da tenere in considerazione. Di qui la necessità d'individuare parametri che consentano di conoscere in **real-time l'esigenza idrica** della pianta.

Al fine di esaminare in maniera oggettiva le differenze che i due sistemi irrigui (quello sperimentale col sistema Wappfruit e quello aziendale) hanno generato in termini di benessere della pianta durante il corso della stagione produttiva, sono stati monitorati parametri sia dal punto di vista fisiologico che da quello produttivo:

- *efficienza fotochimica fogliare* misurata attraverso l'utilizzo di un sensore Spad, ovvero un fotorivelatore in grado di misurare il contenuto di clorofilla nelle foglie e, dunque, indicatore della capacità della pianta di assorbire la luce solare e convertirla in energia chimica attraverso la fotosintesi [75].
- *accrescimento giornaliero del tronco* attraverso il posizionamento di dendrometri sul fusto degli alberi da frutto, per monitorare le variazioni di diametro dei tronchi in seguito alle irrigazioni e valutare lo stress idrico delle piante.
- *accrescimento dei frutti* nel corso della stagione, valutato grazie all'installazione di strumenti di misurazione della circonferenza del frutto detti fruttometri, che registrano quotidianamente le variazioni nelle dimensioni dei prodotti.
- *analisi quantitative* sulla produzione (kg/pianta) e *qualitative* (durezza, livello di amido e °Brix, ovvero concentrazione di zuccheri).



Figura 26: fruttometro installato su una mela [76]

Nella stagione 2023, nelle due aziende melicole che hanno aderito alla sperimentazione, è stato calcolato un risparmio idrico notevole nella porzione di appezzamento con irrigazione sperimentale rispetto a quella curata con la pratica aziendale tradizionale pari al 33,4% in una e pari al 43,4% nell'altra. Le proprietà organolettiche dei frutti sono state mediamente migliori nella tesi sperimentale rispetto a quella aziendale [77].

Punto di forza di Wappfruit è senza dubbio la scalabilità di questo sistema e la possibilità di adattarsi a diverse esigenze e ambienti agricoli: dalle piante da frutta alla verdura di ogni genere, dalla cerealicoltura alla floricoltura.

2.6.1.2 Impianti pivot e rainger

Gli impianti pivot e rainger consistono in **sistemi di irrigazione a pioggia** altamente automatizzati, caratterizzati da una lunga tubazione sospesa e in movimento sulla coltura [78]. La condotta è suddivisa in diverse campate, le quali sono sorrette e collegate a torri mobili: su tutta la lunghezza della tubazione sono inseriti, a distanze prefissate e costanti, gli

irrigatori per la distribuzione dell'acqua sulle radici delle piante. Ad un'estremità delle campate è posta una torre di sostegno piramidale da cui accede l'alimentazione idrica dell'impianto.

Il movimento del sistema è generato per mezzo di un motore elettrico e può essere circolare attorno ad un punto fisso nel caso dei pivot, o traslante lungo una linea retta nel caso dei rainger.

Questi sistemi sono realizzati con una calata per avvicinare l'erogatore alla coltura, in modo da minimizzare l'evaporazione e le perdite per dispersione. È sufficiente una pressione di esercizio inferiore ai 3 bar, dunque, è richiesto un **ridotto dispendio energetico** per lo svolgimento del ciclo irriguo. Inoltre, queste apparecchiature sono dotate di un sistema di controllo dei volumi d'acqua erogati e della velocità di avanzamento che permette di raggiungere un'efficienza irrigua del 90%. Il tutto è monitorabile da remoto attraverso un'applicazione mobile che può essere altamente personalizzata, mediante la quale è possibile gestire l'attivazione e lo spegnimento dell'impianto, la regolazione della pluviometria da erogare, gli allarmi ed eventuali anomalie, oltre a verificare le condizioni idriche del terreno.



Figura 27: impianto d'irrigazione Pivot [79]

Oggi le tecnologie che offre l'**Agricoltura 4.0** sono di supporto anche nell'individuare il momento ideale per irrigare e le giuste quantità d'acqua da distribuire: software sofisticati,

elaborando i dati provenienti dai **sensori di umidità** in campo, hanno algoritmi di calcolo degli esatti fabbisogni irrigui delle colture. Inoltre, i dati satellitari che provengono da **sensori di telerilevamento** producono indici di *remote sensing* [80] che riescono ad evidenziare stress idrici e soprattutto cogliere eventuali differenze all'interno del medesimo appezzamento. Integrando le varie informazioni provenienti dai sensori in campo, dagli indici di remote sensing e dal bilancio idrico, è possibile mettere a punto nuove metodologie volte al risparmio idrico, come l'irrigazione a dosaggio variabile fra le diverse parcelle dello stesso appezzamento. Perdi più, essendo a conoscenza dell'attuale livello di umidità del terreno e del prospetto delle prossime irrigazioni (fra quanti giorni sarà necessario irrigare e con quanti mm), è possibile integrare questo calcolo con le previsioni meteorologiche per i giorni successivi, in modo da modulare le richieste del sistema suolo-pianta con le temperature attese e con l'arrivo di eventuali precipitazioni che causerebbero un posticipo del turno irriguo.

2.7 L'innovazione digitale nell'allevamento zootecnico

La produzione di alimenti di origine animale è cresciuta significativamente negli ultimi cinquant'anni (triplicata quella della carne, raddoppiata quella del latte). Di pari passo è aumentato anche il consumo in seguito alla crescita demografica e al miglioramento del benessere economico dei consumatori. Pertanto, è necessario portare **innovazione sostenibile** all'interno di un settore che oggi ha un ruolo chiave per la sopravvivenza umana, ma che ha un notevole impatto ambientale.

Dunque, l'innovazione digitale negli allevamenti zootecnici, oltre ad essere utile per efficientare i processi produttivi e migliorare le condizioni di lavoro, sarà determinante per attuare il principio cosiddetto "**One Health**" (Zinsstag et al., 2021), sostenuto da organizzazioni come FAO e OMS, che afferma come non si possano considerare aspetti separati la salute umana, animale e ambientale. Trascurare la salute animale significherebbe quindi privarsi di uno dei tre fondamenti per un ottimo sviluppo sostenibile. L'innovazione digitale, che si contraddistingue per trasversalità e applicabilità a problemi disparati, può risultare una risorsa preziosa per la tutela della salute globale ed integrarsi in maniera ottimale con le discipline specializzate in materia, come la medicina e le scienze ambientali.

Con lo scopo di promuovere la sostenibilità digitale del settore zootecnico italiano, nel 2024 il Senato ha siglato il Manifesto **SMART MEAT 2030** [81], un programma rivolto ad

associazioni, aziende e istituzioni che intendono impegnarsi nello sviluppo di un sistema produttivo più avanzato, sostenibile e tecnologico che migliori la qualità di vita degli animali, minimizzi l'impatto ambientale e incrementi l'efficienza operativa delle aziende.

Il Manifesto è stato concepito per sostenere le imprese del settore zootecnico italiano nel loro cammino verso il raggiungimento degli obiettivi europei per il 2030 in tema di sostenibilità. In particolare, il programma si articola in 10 punti cruciali che delineano un percorso di sensibilizzazione verso l'importanza della transizione digitale per affrontare le questioni più urgenti su problematiche ambientali, economiche e sociali. Si tratta di valorizzare la tecnologia digitale come valore aggiunto della filiera di produzione della carne e del latte, generando ecosistemi basati su dati orientati anche al monitoraggio delle emissioni e delle condizioni di salute degli animali. La sostenibilità digitale garantisce **l'ottimizzazione delle risorse, il miglioramento del benessere animale e la riduzione dell'impronta ecologica** dell'intera filiera, migliorando anche la qualità del prodotto finale. Secondo un recente rapporto Istat [83], nel 2020 il 38,5% delle aziende zootecniche italiane ha mostrato di avere una gestione informatizzata degli allevamenti, rispetto al 6,6% relativo al 2010: allora solo il 3,8% delle imprese agricole aveva avviato processi di digitalizzazione e l'1,2% navigava su Internet. Nel 2020, quasi una azienda su tre è risultata dotata di personal computer, di una connessione fissa in banda larga e di competenze digitali.



Figura 28: monitoraggio remoto della mandria grazie all'implementazione di tecnologie digitali [82]

Nonostante i potenziali benefici degli investimenti in Industria 4.0 e gli incentivi fiscali del PNRR, molte imprese stanno approfittando solo marginalmente delle opportunità che riserva

la digitalizzazione. I **principali ostacoli** consistono nella carenza di infrastrutture adeguate, limitatezza della cultura digitale nel settore e difficoltà nell'intraprendere un cambiamento complesso.

2.7.1 Collari UHT per rilevazione calori e ruminazione

Il settore zootecnico sta vivendo un processo di radicale cambiamento e innovazione tecnologica: la progettazione di tag sofisticati posizionati direttamente sull'animale mediante un collare ha reso possibile un controllo remoto completo sul proprio bestiame. Questi dispositivi analizzano le condizioni dell'animale e memorizzano continuamente i dati concernenti i segnali del calore, l'alimentazione, la ruminazione e l'inattività di ogni capo della mandria. In questo modo, l'allevatore ha la possibilità di perfezionare i vari processi dell'allevamento, prevenire l'incidenza di numerose patologie nonché prendere decisioni tempestive e ponderate.

Con questo sistema è possibile scindere immediatamente gli animali sani da quelli ammalati, per concentrarsi esclusivamente sui capi che necessitano di cure urgenti. Tuttavia, l'aspetto di maggior interesse è il rilevamento dei calori che genera un netto miglioramento della fertilità, siccome offre all'allevatore la possibilità di agire sul periodo di fecondazione con l'opportunità di cogliere l'istante ottimale per l'inseminazione. Inoltre, si ha un'anticipazione dell'età del primo parto delle manze e un salto qualitativo nella gestione del periodo di asciutta e del parto.

La tecnologia di questi collari permette di valutare anche l'ingestione e il livello di ruminazione, in modo da tenere sotto controllo il bilancio energetico e lo stato sanitario dell'animale, soprattutto nelle fasi più delicate della lattazione, ovvero i primi giorni successivi al parto, il picco di lattazione e il periodo parto, al fine di riconoscere le cause di incostanza nella produzione di latte e identificare immediatamente l'insorgenza di patologie metaboliche [84].

L'identificazione degli animali avviene tramite il **sensore C-Sense** installato sul collare, il quale è progettato con un peso preciso per garantirne il corretto posizionamento sul collo dell'animale, così da non interferire con il naturale comportamento delle vacche. Questo strumento si integra perfettamente con altri sistemi di automazione, come le sale di mungitura, i robot, i sistemi di raffrescamento e i software di gestione aziendale.

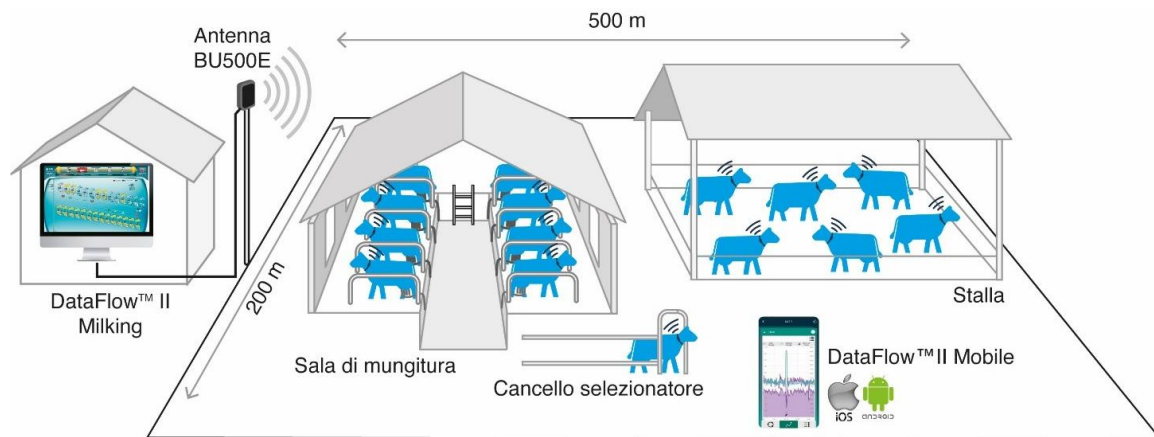


Figura 29: sistema di gestione della mandria tramite l'impiego di collari UHT [85]

Il sistema di gestione raccoglie, elabora e memorizza le informazioni su ogni animale e le associa ai dati di produzione di latte relativi ad ogni sessione di mungitura, per creare report specifici, grafici e allarmi. Si ha, dunque, una fotografia puntuale e dettagliata delle condizioni di benessere degli animali, che offre all'allevatore uno strumento integrato per il monitoraggio della mandria e la gestione della stalla.

2.7.2 Robot di mungitura

Il debutto dell'automazione nell'allevamento della bovina da latte ha indubbiamente rappresentato una svolta rivoluzionaria che ha portato, negli ultimi anni, parecchi allevatori ad affidarsi ai robot di mungitura automatizzata. La mungitura è senz'altro l'operazione da sempre più impegnativa nel settore zootecnico, sia sotto il punto di vista della frequenza richiesta, in quanto va compiuta due volte al giorno, sia per quanto riguarda la durata dell'attività.

Il passaggio dalla mungitura tradizionale a quella automatica ha apportato notevoli migliorie alla routine lavorativa degli allevatori e anche al benessere degli animali, introducendo un sistema innovativo di gestione della mandria. Di conseguenza, il lavoro in stalla è del tutto mutato: alcune operazioni non sono più necessarie, altre sono state rinnovate e adattate al nuovo metodo di mungitura, mentre ne sono state introdotte di nuove che prima non esistevano.

Con l'installazione di un robot di mungitura, il compito dell'allevatore si riduce a monitorare i ritardi, ovvero quelle vacche segnalate dal software del robot in quanto assenti in mungitura da più di dodici ore. Quest'eventualità è comunque rara e caratterizza perlopiù animali affetti da zoppie o stato di malessere generale.



Figura 30: vacca che si appresta ad essere munta da un robot Lely [86]

Il processo di mungitura automatizzata si compone di un braccio robotizzato che inizialmente pulisce e disinfetta le mammelle, dopodiché, mediante un sistema di riconoscimento laser, individua i quattro quarti (i capezzoli) e vi attacca le tettarelle così da avviare la mungitura vera e propria [87]. La sequenza di operazioni è costantemente monitorata: ogni deviazione o problematica è immediatamente segnalata. Una volta concluso il procedimento, i capezzoli sono nuovamente disinfettati ed il cancello si apre, permettendo l'uscita dell'animale.

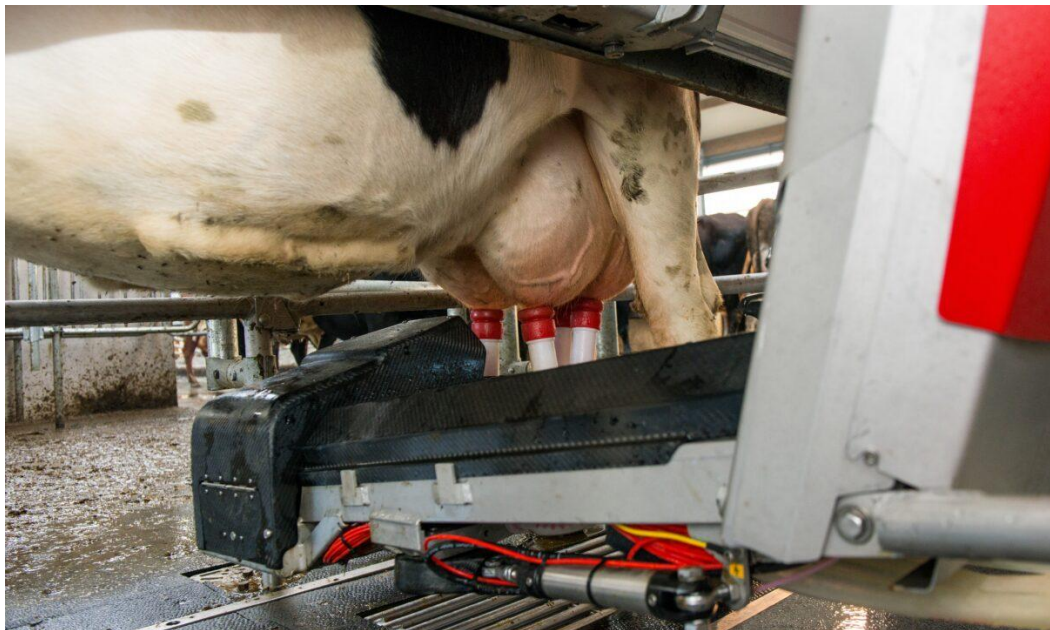


Figura 31: sistema di mungitura robotizzata [88]

Il robot ovviamente non permette l'ingresso ripetuto della stessa bovina, né la mungitura di un animale che è stato processato da meno di un lasso temporale prefissato (di solito 6 ore). Il latte, appena munto, è subito analizzato dal software dedicato, così da individuare per l'animale in questione parametri di qualità e quantità di latte e dati preziosi sullo stato della vacca. Le informazioni così elaborate sono fruibili dall'allevatore sia sul monitor del robot, sia da remoto sul proprio smartphone, al fine di avere un controllo completo sullo stato di salute della mandria.

Il sistema di mungitura robotizzata è stato progettato in modo che l'animale, dopo essersi abituato step by step per i primi giorni di adattamento, sarà in grado di rivolgersi alla postazione di mungitura in completa autonomia, anche più volte al giorno. Una volta entrato, infatti, l'animale è immediatamente riconosciuto dal robot tramite i **dispositivi di identificazione**, ubicati all'interno dei collari, e gli si fornisce una dose personalizzata di un alimento assai appetibile ed eventuali integratori durante l'intero processo di mungitura. Ciò farà sì che la vacca tenda ad associare il robot ad una locazione ove può reperire cibo prelibato e sarà stimolata a dirigersi spesso in tale posizione volontariamente. Ciò genera implicitamente una crescita della frequenza di mungitura degli animali, che passa da due volte al giorno nella mungitura tradizionale a più di tre in quella robotizzata, e di conseguenza anche della produzione giornaliera [89].

Questa tecnologia di origine olandese, inoltre, attua alla perfezione il concetto di **diversificazione delle quantità** a seconda dei reali fabbisogni: grazie ai dati puntuali di produzione della vacca, gli integratori, forniti dal sistema durante la mungitura, sono dosati in maniera proporzionale alla media litri e a fattori come età e genetica dell'animale in questione. Nell'alimentazione tradizionale, invece, gli integratori e i mangimi sono distribuiti uniformemente nell'unifeed in mangiatoia, ove la vacca può assumerne a piacimento.

Dunque, è evidente come anche nell'allevamento la trasformazione digitale porti con sé dei notevoli benefici, massimizzando il rendimento delle bovine maggiormente predisposte ed evitando lo spreco di concentrati, laddove l'animale non ne possa sfruttare pienamente l'apporto nutritivo.

2.7.3 Sistema di ventilazione automatizzato

Il cambiamento climatico in atto, che sta inasprendo le condizioni meteorologiche con un aumento delle temperature medie, in concomitanza con la selezione genetica sugli animali, sempre più specializzata sulla produzione di latte e meno attenta a preservare la robustezza e la vigoria delle vacche, stanno mettendo sempre più in risalto le problematiche che lo **stress termico** suscita sugli animali. È fondamentale, dunque, adottare una strategia di raffrescamento idonea alla propria azienda per garantire adeguate condizioni di benessere alle bestie anche nei periodi più calori dell'anno.

I bovini sono infatti animali omeotermi che sfruttano parte dell'energia ingerita per termoregolarsi e, di conseguenza, quanto più si trovano distanti dalla loro condizione di **termo-neutralità**, tanto più calano in efficienza e scadono in termini di performance sia produttive che riproduttive. Nei mesi più caldi la temperatura corporea delle bestie cresce in maniera considerevole, provocando un drastico calo dell'ingestione e malessere generale [90].

In virtù di questa consapevolezza, sono stati messi a punto svariati sistemi di controllo e gestione microclimatica dei ricoveri zootecnici, che consistono in soluzioni automatizzate di ventilazione forzata dotate di sistemi di raffrescamento.



Figura 32: impianto di ventilazione forzata in un allevamento bovino da latte [91]

Investire in tecnologie avanzate, come sistemi di ventilazione e raffrescamento automatizzati, connessi a **sensori di umidità e temperatura** installati in prossimità della stalla, può ottimizzare l'efficienza e assicurare un controllo preciso delle condizioni ambientali. I ventilatori ad alta velocità garantiscono un flusso d'aria costante all'interno della struttura, indispensabile per regolare la temperatura, ridurre gas nocivi come l'ammoniaca e favorire la dispersione del calore corporeo della vacca. Inoltre, sono stati sviluppati sistemi di raffrescamento consistenti in veri e propri getti d'acqua nebulizzata detti "a goccia pesante", da abbinare alle ventole, in modo da irrorare a intermittenza l'animale e asciugarlo immediatamente dopo, così da scongiurare il pericolo di polmoniti. Le ventole e i getti lavorano in sinergia e si attivano automaticamente nel momento del bisogno, grazie alle informazioni provenienti dai sensori ambientali a cui si appoggiano [92]. Nel pacchetto è fornita un'applicazione mobile su cui è possibile monitorare costantemente temperatura e umidità in stalla, nonché lo stato acceso/spento del sistema di raffrescamento, con la possibilità di attivare manualmente le ventole o i getti, se lo si desidera.

Inoltre, grazie all'installazione dei collari C-Sense trattati in precedenza, è possibile identificare la presenza di bovini che stanno soffrendo di stress da caldo e adeguare i parametri di lavoro del sistema di raffrescamento, in modo da contenere il più possibile l'insorgenza di condizioni sfavorevoli alla salute degli animali.

In conclusione, la scelta oculata di un sistema innovativo di ventilazione e raffrescamento microclimatico del ricovero zootecnico non solo crea un ambiente più confortevole per gli animali, ma concorre anche ad una gestione sostenibile ed efficiente dell'allevamento, migliorandone sensibilmente la produttività complessiva e, dunque, giovando al reddito dell'allevatore.

2.7.4 Piattaforma XFarm

XFarm soddisfa la necessità di digitalizzare la filiera agricola per amministrare ogni aspetto di un'azienda in modo smart, economico ed intuitivo: si tratta di un **sistema di gestione e interconnessione fra tutti i sistemi informativi aziendali**, materializzato in un'applicazione mobile progettata a partire dal 2017 dalla start-up XFarm Technologies, con l'obiettivo di escogitare uno strumento informatizzato su cui annotare in formato digitale le operazioni quotidianamente svolte dall'operatore e avere un controllo a 360 gradi dell'attività a portata di mano [93].

Infatti, trattandosi di un'applicazione online, è possibile servirsene sia tramite smartphone, che tramite tablet o pc aziendale. In sostanza, gli agricoltori possono monitorare comodamente su un'unica piattaforma tutti gli aspetti che riguardano le lavorazioni svolte, gli indici vegetativi, le giacenze, la capienza dei silos ma anche le fatture e gli ordini.

Nella sezione *Gestione dei campi* la registrazione e programmazione delle attività da svolgere è specifica per ogni appezzamento, identificato tramite dati catastali. Qui è inoltre possibile visionare la mappa dell'appezzamento, le colture seminate e lo storico delle coltivazioni, così come monitorare le caratteristiche del suolo provenienti dai sensori di umidità e temperatura installati nel terreno e pianificare i cicli di irrigazione [94].

Nella sezione *Macchinari*, invece, si ha una panoramica dettagliata delle performance del proprio parco macchine ove, grazie ai moduli di **telemetria 4.0** di cui sono dotati i mezzi, sono memorizzati automaticamente rifornimenti ed ore di lavoro, manutenzioni ordinarie e straordinarie, oltre alla compilazione dei registri di campo.

Perdipiù, vi sono dei moduli legati alla Finanza in cui si possono consultare i prezzi di mercato delle materie prime, analizzare spese e ricavi dell'impresa, al fine di gestire il bilancio aziendale e valutare la convenienza o meno degli investimenti in atto.

Di notevole importanza è sicuramente anche l'agevolazione offerta in termini di burocrazia: sono a disposizione dell'agricoltore documentazioni sull'azienda come incentivi **PAC** e bandi d'investimento. Le raccolte di questi documenti di contabilità possono essere salvate online risparmiando tempo, spazio e denaro.

Ecco l'elenco dettagliato dei servizi offerti dalla piattaforma:

- **Gestione dei campi**
- **Sostenibilità e clima**
- **Protezione delle colture**
- **Allevamento**
- **Macchinari**
- **Agricoltura di precisione**
- **Gestione delle attività**
- **Logistica**
- **Irrigazione**
- **Gestione economica**
- **Documentazione**



Figura 33: home page dell'applicazione mobile [95]

3. CASO DI STUDIO: AGRICOLTURA 4.0 NELLA CASCINA SANT'ANNA

3.1 Introduzione all'azienda

La Cascina Sant'Anna è un'azienda agricola situata nel territorio piemontese, precisamente tra Carmagnola e Ceresole d'Alba, di proprietà della mia famiglia. Fondata negli anni '50 da Alessandro Chiappero, nonché mio nonno, contava inizialmente di pochi ettari di terreno e qualche animale di razza piemontese al pascolo. Negli anni l'azienda è stata progressivamente ampliata con l'acquisto di terreni circostanti alla fattoria e la realizzazione di stalle all'avanguardia per la stabulazione degli animali, con il seguente passaggio all'allevamento di vacche di razza frisona e alla produzione di latte, per divenire a tutti gli effetti una **realità zootecnica specializzata nell'allevamento di bovine da latte** e nella coltivazione di foraggi e cereali destinati all'alimentazione animale. Ad oggi, l'azienda si estende su una superficie di circa 60 ettari, suddivisi tra prati stabili, seminativi e strutture dedicate alla stabulazione degli animali, allo stoccaggio delle materie prime e al rimessaggio dei macchinari.

Le operazioni agronomiche per la coltivazione delle piante sono interamente meccanizzate tramite l'utilizzo di trattori di diverse dimensioni che ben si adattano alle varie attrezzature presenti nel parco macchine aziendale e spaziano dalla preparazione del terreno alla semina, concimazione, irrigazione e raccolta. Ciò permette di svolgere in totale autonomia ogni processo di lavorazione dei propri terreni, eccetto la trinciatura e mietitura di mais e frumento che è affidata ai terzisti.

L'azienda adotta pratiche agricole e zootecniche sostenibili, con una particolare attenzione alla rotazione delle colture, uso razionale dei fertilizzanti e riduzione dell'impatto ambientale. Le principali colture comprendono:

- **Mais da insilato e granella:** fonte di amido che costituisce la base energetica della razione delle vacche in lattazione. Il mais è seminato in primavera e trinciato a settembre/ottobre in fase di maturazione cerosa per poi essere stoccato in trincee prefabbricate, oppure si può attendere la completa maturazione per poi trebbiarlo e ricavare la granella che, dopo essere stata essiccata e macinata, diventerà farina da aggiungere nella razione alimentare.

- **Loietto e prati stabili:** fonti principali di fibre e vitamine nella razione, costituiscono alimento essenziale per l'allevamento zootecnico. Sono utilizzati per la produzione di foraggio essiccato e pressato in balle per la conservazione e lo stoccaggio nei magazzini aziendali.
- **Fumento:** in parte insilato per fornire un ulteriore apporto di fibre ad alta digeribilità, oltre che appetibilità alla razione e in parte trebbiato per separare il seme (venduto esternamente) dalla paglia, adoperata in azienda per il mantenimento di una lettiera pulita e confortevole per il riposo dell'animale.
- **Soia ed erba medica:** coltivate in rotazione sui terreni aziendali, offrono la componente proteica per eccellenza nell'alimentazione bovina. Inoltre, essendo piante azoto-fissatrici in grado di assorbire l'azoto atmosferico (N₂), trasformarlo in composti azotati e immagazzinarli nel terreno, tramite una simbiosi con batteri del genere *Rhizobium* presenti nelle loro radici, hanno il vantaggio di migliorare la fertilità del terreno e ridurre la necessità di apportare fertilizzanti chimici alle coltivazioni successive.

Pertanto, si cerca di raggiungere la quasi totale auto-produzione di ogni componente dell'alimentazione bovina, in modo da evitare l'acquisto esterno di materie prime, contenere i costi e garantire la tracciabilità dell'alimentazione animale. Tutti i prodotti, dopo essere stati raccolti nei campi, sono conservati in cascina tramite l'insilamento del mais o lo stoccaggio nei magazzini di foraggi essiccati. Successivamente, le varie componenti sono a poco a poco utilizzate e razionate per l'alimentazione dei propri animali con l'ausilio di un **carro unifeed** semovente, secondo piani nutrizionali redatti in collaborazione con un alimentarista zootecnico della ditta mangimistica Borello.

L'allevamento è composto da 160 capi, di cui 80 vacche in lattazione e le restanti vitelle e manze per la rimonta o vacche in asciutta. Gli animali sono ospitati in strutture moderne a stabulazione libera, con cuccette individuali, ventilazione forzata e impianti automatizzati per la gestione della mandria, tra cui la mungitura robotizzata. La gestione dell'allevamento, da sempre, è orientata al benessere animale, con ambienti spaziosi, lettieri ripulite quotidianamente e alimentazione bilanciata a base di prodotti coltivati in azienda con l'aggiunta di integratori alimentari acquistati esternamente.

Uno degli elementi strategici del modus operandi aziendale è l'adozione sistematica della fecondazione artificiale per la riproduzione delle proprie vacche, al fine di migliorare

gradualmente la genetica del bestiame. A tal proposito, ci si affida a specialisti del settore che redigono un piano di accoppiamento specifico per ogni vacca, assegnando ad essa il seme del toro che più si adatta alle sue caratteristiche genotipiche, in modo da dar vita ad una vitella che sia tendenzialmente più predisposta della madre alla produzione lattifera, senza precludere l'animale di buone caratteristiche morfologiche e sanitarie come forza, fertilità e longevità.

La produzione di latte si attesta, attualmente, su un media di **37 litri/vacca giornalieri**, per un totale di circa 3000 litri al giorno destinati al conferimento presso la cooperativa Piemonte Latte, con sede a Genola, di cui l'azienda agricola della famiglia Chiappero fa parte.

La gestione del lavoro è completamente interna alla famiglia: sono i proprietari stessi, con l'aiuto dei figli, ad occuparsi di ogni aspetto che riguardi sia la coltivazione dei campi che l'allevamento, senza l'ausilio di alcun dipendente. Questo permette di mantenere un controllo diretto su tutte le attività e di lavorare in un clima di fiducia e collaborazione familiare.

3.2 Analisi AS IS

Nel corso degli anni, l'azienda ha puntato fortemente su tecnologie innovative e investimenti in Agricoltura 4.0 come la mungitura robotizzata e l'acquisto di un trattore 4.0 dotato di guida satellitare e sistema di geolocalizzazione GPS, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza produttiva, la redditività d'impresa e la sostenibilità ambientale.

A fine 2021, anno in cui l'agevolazione fiscale del credito d'imposta 4.0 era pari al 50% dell'imponibile, l'azienda ha concluso il contratto di acquisto di un trattore John Deere 6155M, poi consegnato e messo in campo nel 2022. Questo mezzo è stato scelto come innesto ideale da integrare al parco macchine aziendale per la sua robustezza ed affidabilità: grazie ai suoi 155 cavalli di potenza erogata da un motore John Deere Powertech a 6 cilindri, è destinato principalmente a svolgere le lavorazioni pesanti, come aratura, fresatura e preparazione del terreno. Come anticipato in precedenza, il trattore in questione è dotato di un allestimento tecnologico avanzato che comprende il geolocalizzatore JDLink, la **guida satellitare AutoTrac** [96] e il controllo remoto. Il sistema di telemetria JDLink consente di monitorare in tempo reale la posizione, il livello di carburante, eventuali codici errore e l'attività del mezzo tramite il portale **John Deere Operation Center**, ovvero il sito web dedicato agli utenti possessori di un mezzo John Deere di ultima generazione. Questo

pacchetto garantisce il trasferimento wireless dei dati e l'attivazione di strumenti per l'agricoltura di precisione, facilitando la gestione delle lavorazioni e la tracciabilità degli interventi in campo, oltre ad essere utile in caso di guasti per agevolare il supporto tecnico da remoto degli operatori del centro di assistenza.

La **guida satellitare** permette al trattore di seguire percorsi precisi e paralleli con margini di errore minimi, riducendo le sovrapposizioni e gli sprechi di carburante, tempo e input agronomici (sementi, fertilizzanti e trattamenti chimici).

Il **controllo remoto** consente di visualizzare e gestire a distanza lo stato operativo del trattore, eventuali anomalie e i dati relativi alle lavorazioni svolte, direttamente da computer o dispositivi mobili.

La scelta di questo trattore ha permesso di ridurre i tempi di lavoro, alleggerire il carico sulle macchine più datate e garantire una maggiore produttività, oltre a migliorare la sicurezza e il comfort durante le operazioni in campo.



Figura 34: trattore acquistato dalla cascina Sant'Anna [97]

Nel 2022, invece, si è deciso di investire nella mungitura robotizzata del latte, con l'acquisto di un **robot Lely**. Questa scelta ha segnato un passo importante verso una gestione più moderna ed efficiente dell'allevamento: grazie a questa tecnologia, le vacche si dirigono spontaneamente verso il robot per essere munte, nel momento per loro più naturale, con una significativa riduzione dello stress e un miglioramento del benessere generale. Ne risulta una mungitura più frequente e regolare rispetto a quella tradizionale e ciò si traduce in un incremento sia della produzione di latte che della qualità dello stesso.

Dal punto di vista organizzativo, il robot ha consentito all'azienda di **ridurre il carico di lavoro manuale**, dando la possibilità alla mia famiglia di dedicare maggior attenzione alla gestione aziendale e al controllo dei processi produttivi.

Un ulteriore punto a favore di questo investimento è il **monitoraggio costante dei dati**: il sistema Lely memorizza informazioni dettagliate sulla produzione di ogni singolo capo e su parametri che rivelano precocemente eventuali malattie dei nostri animali, migliorando la tracciabilità del latte.

Nonostante il considerevole investimento iniziale, si può dunque affermare che l'adozione del robot di mungitura ha rappresentato per l'azienda una scelta strategica orientata al miglioramento dell'efficienza economica, alla sostenibilità e alla competitività nel lungo periodo, rafforzando al tempo stesso l'immagine della Cascina Sant'Anna come realtà agricola innovativa e attenta al rispetto del benessere animale.

3.3 Analisi degli investimenti

3.3.1 Costi e benefici – Trattore John Deere

Per quantificare i flussi di cassa derivanti dall'introduzione, a partire da inizio 2022, del trattore John Deere 6155M nel parco macchine aziendale è stata svolta un'attività di analisi e confronto incrociato di più fonti informative aziendali. In particolare, sono stati esaminati i dati di bilancio, il registro elettronico delle fatture e i diversi archivi aziendali, coprendo l'arco temporale compreso tra il 2020 e il 2025.

L'investimento è stato effettuato a fine 2021 e ha determinato una spesa di 101.500 euro + IVA, finanziati in 5 anni col beneficio della **Nuova Sabatini**, consistente in un contributo pari ad un interesse del **3,575%** annuo calcolato su un piano di ammortamento quinquennale per quanto riguarda i beni 4.0. Considerando un piano di ammortamento alla francese e detraendo le spese di istruttoria si è goduto di un contributo pari al 10% circa.

$$R = C \cdot \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} = 101.500 \cdot \frac{0,03575 \cdot (1 + 0,03575)^5}{(1 + 0,03575)^5 - 1} = 22.528 \text{ €}$$

Dove:

- R = rata annuale secondo il calcolo Sabatini
- C = capitale investito = 101.500 €

- i = tasso annuo decimale = 0,03575
- n = numero di anni = 5

Spesa complessiva secondo Sabatini = $22.528 \text{ €} \cdot 5 \text{ anni} = 112.640 \text{ €}$

Contributo totale corrisposto = $112.640 - 101.500 = 11.140 \text{ €}$

Spese di istruttoria = 800 €

Contributo netto incassato = 10.340 €

Tuttavia, gli interessi pagati dalla nostra azienda sono stati nettamente inferiori, in quanto il finanziamento è stato sottoscritto presso la John Deere Financial ad un tasso agevolato dell'**1,99%** annuo.

$$R_{reale} = C \cdot \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} = 101.500 \cdot \frac{0,0199 \cdot (1 + 0,0199)^5}{(1 + 0,0199)^5 - 1} = 21.528 \text{ €}$$

Spesa complessiva_{reale} = $21.528 \text{ €} \cdot 5 \text{ anni} = 107.640 \text{ €}$

Interessi pagati = $107.640 - 101.500 = 6.140 \text{ €}$

Profitto complessivo = Contributo corrisposto – spese di istruttoria – interessi pagati =
 $= 11.140 - 800 - 6.140 = \mathbf{4.200 \text{ €}}$

Inoltre, l'acquisto del trattore in questione ha permesso all'azienda di accedere al credito d'imposta per beni strumentali 4.0 pari, nel 2021, al 50% dell'imponibile della fattura di acquisto, ovvero 50.750 € utilizzabili in compensazione tramite modello F24 nei 5 anni seguenti l'investimento, con una quota annuale precisamente di **10.150 €**.

Per quanto riguarda i flussi di cassa riguardanti la gestione operativa, è spiccata la riduzione dei consumi di carburante, che si è registrata essere pari al 7-8% del totale consumato negli anni precedenti per le lavorazioni che ora sono svolte da questo mezzo e che prima erano affidate ai trattori tradizionali. Concretamente, la cascina Sant'Anna consumava in media 8.000 litri di gasolio all'anno per le lavorazioni di aratura, fresatura e preparazione dei 60 ettari di terreno seminativi (coltivati a mais e grano); ora ne consuma 7.400 circa. Stando ai prezzi medi degli ultimi anni del gasolio agricolo [98], che si aggirano attorno ai 90 centesimi/litro ciò si traduce in un risparmio di **540 €/anno**, considerato come costante in termini reali per tutta la vita dell'investimento, in quanto l'andamento del prezzo del gasolio è volatile ed imprevedibile e sarebbe scorretto stimarne un tasso di crescita futuro. Dunque,

si è tenuto conto soltanto di un tasso di crescita annuo pari al 2% per coprire l'inflazione, al fine di rendere coerenti i flussi di cassa nominali con quelli reali. Tuttavia, si tiene conto della forte incertezza legata a questo fattore, che penalizza la precisione del calcolo dei flussi di cassa, sovrastimando il tasso di sconto nominale.

Altro importante fattore da valutare è il miglioramento dell'efficienza operativa che, grazie alla riduzione delle sovrapposizioni fra le varie passate, ha generato una diminuzione delle tempistiche di lavoro nelle suddette operazioni del 10%. Considerando che in media sono necessarie 7 ore/ettaro per effettuare tutte le lavorazioni di preparazione del terreno, dall'aratura alla semina, il risparmio è quantificabile in: $0,1 \cdot \frac{7h}{ettaro} \cdot 60 \text{ ettari} = 42h$.

Considerando una retribuzione oraria lorda di 15 euro/h per le mansioni specializzate nelle lavorazioni agro-meccaniche secondo i rispettivi contratti CCNL [99], si può dedurre che il benefit economico dovuto all'utilizzo del trattore in questione ammonta a **630 €/anno** sui costi di manodopera.

D'altra parte, non bisogna trascurare il risparmio di sementi e fertilizzanti derivante dall'impiego della guida satellitare, che abbiamo registrato essere circa del 5%, grazie all'annullamento delle sovrapposizioni in capezzagna e sui lati irregolari dell'appezzamento. Tenendo presente che per quanto riguarda il mais ed il grano il costo delle sementi è approssimativamente di 300 €/ettaro, considerando per il grano un dosaggio di 300kg/ha al prezzo di 1€/kg e per il mais di 80.000 semi/ha al prezzo di 190€/sacco (ogni sacco è composto da 50.000 semi), ciò significa un risparmio di 15 €/ettaro di sementi, ovvero **900€/anno** sul totale di 60 ettari. Stesso discorso vale per i fertilizzanti, il cui costo in conformità ai nostri dosaggi si aggira attorno ai 400€/ettaro; perciò, un'ottimizzazione del 5% nella distribuzione corrisponde a 20€/ettaro risparmiati ogni anno, che complessivamente ascende a **1200€/anno**. Tutti questi costi operativi sono caratterizzati, in media, da un tasso di crescita annuale del prezzo pari al 5%, pertanto si è tenuto conto di questo nella stima dei flussi di cassa rilevanti per il calcolo del NPV.

Infine, è bene evidenziare che grazie ai sensori e ai sistemi di connettività di cui è dotato, il trattore acquistato registra in modo continuo informazioni dettagliate sulle lavorazioni agricole svolte, come ore effettive di lavoro per tipo di operazione, consumi di carburante per ettaro e per coltura, prestazioni del mezzo in relazione al tipo di terreno. Questi dati trasformano l'agricoltura da professione fondata sull'esperienza ad attività basata su **evidenze oggettive**.

Incrociando queste informazioni con il canone di affitto dei terreni, i costi degli input produttivi e le rese medie per ettaro l'azienda può calcolare il costo unitario reale della materia prima prodotta internamente e, in base ai prezzi di mercato della merce in questione, valutare quando è economicamente conveniente l'integrazione verticale della produzione e quando, invece, è preferibile acquistare dall'esterno gli alimenti per i propri animali. Questo significa migliorare notevolmente la pianificazione aziendale nel medio-lungo periodo, offrendo la possibilità di prendere decisioni sulla base di indicatori misurabili e non più "a sensazione".

Perdipiù, nel caso in cui l'azienda non avesse acquistato il trattore in questione, per garantire la continuità delle lavorazioni agricole sarebbe stata costretta a noleggiare un altro trattore, con un costo che inizialmente ammontava a **12.000 euro** l'anno [100] per un mezzo di pari cavalleria, considerando 6 mesi lavorativi al costo di 2.000 euro/mese, ma l'importo cresce di anno in anno del 5% rispetto al valore dell'anno precedente, di pari passo con gli aumenti dei prezzi dei trattori nuovi. Nel calcolo dei flussi di cassa incrementali è stato perciò incluso il risparmio derivante dal mancato noleggio di un altro trattore, che nello scenario controfattuale sarebbe stato necessario per garantire il medesimo livello di operatività. Tale risparmio rappresenta un beneficio economico diretto attribuibile al progetto.

Questo costo di noleggio avrebbe rappresentato una spesa ricorrente, che:

- non genera alcun bene di proprietà per l'azienda;
- non produce valore patrimoniale nel lungo periodo;
- non consente l'accesso ad agevolazioni fiscali come quelle previste dal piano Industria 4.0;
- non offre sistemi avanzati di monitoraggio e raccolta dati comparabili a quelli di un trattore 4.0.

Tuttavia, l'acquisto di un trattore di proprietà presuppone delle spese di manutenzione ordinaria e straordinaria, che nel caso di noleggio del trattore sarebbero invece totalmente a carico della società di leasing. Questi costi sono minimi nei primi anni di utilizzo del mezzo, ma con il passare del tempo e l'aumentare delle ore di lavoro cresce la frequenza degli interventi, aumenta la probabilità di guasti e diventa necessario sostituire componenti sempre più rilevanti, determinando un significativo incremento dei costi di manutenzione. Pertanto, si sono stimati dei costi di manutenzione pari a **500€** per il primo anno di vita del trattore, con un tasso di crescita annuale del 15%, che tiene in considerazione anche l'aumento progressivo dei prezzi della manodopera e dei ricambi.

È stato considerato anche un valore residuo del bene al termine della vita utile, pari a **20.000** euro, che si potrebbe realizzare vendendo il bene nell'ultimo anno di analisi.

Costi/Benefici	Temporalità	Importo	Tasso di crescita annuo
Nuova Sabatini	Anno 1	+ 10.340 €	-
Credito d'imposta	Primi 5 anni	+ 10.150 €	-
Rata finanziamento	Primi 5 anni	- 21.528 €	-
Risparmio noleggio	Tutti e 15 gli anni	+ 12.000 €	+ 5%
Manutenzione	Tutti e 15 gli anni	-500 €	+ 15%
Fertilizzanti	Tutti e 15 gli anni	+ 1200 €	+ 5%
Sementi	Tutti e 15 gli anni	+ 900 €	+ 5%
Manodopera	Tutti e 15 gli anni	+ 630 €	+ 5%
Gasolio	Tutti e 15 gli anni	+ 540 €	+ 2%
Valore residuo	Anno 15	+ 20.000 €	-

Tabella 1: riepilogo dei costi e benefici legati all'acquisto del trattore

3.3.2 Calcolo NPV, DPP e IRR – Trattore John Deere

Al fine di valutare se l'investimento nel trattore acquistato a fine 2021 al costo di **101.500 €** genera, nel corso della sua vita utile di 15 anni, un valore economico superiore al capitale investito, è opportuno calcolare l'**NPV (Net Present Value)** [101], ovvero una metrica finanziaria che stima la redditività di un investimento attualizzando al loro valore odierno i flussi di cassa operativi che il progetto genera durante tutta la sua vita utile, mediante l'applicazione di un tasso di attualizzazione coerente, in questo caso, con il settore agricolo e con il finanziamento bancario sottoscritto, in modo da tenere in considerazione il fattore **tempo** (un euro oggi vale più di un euro domani). In sostanza, si procede a sottrarre i costi

iniziali dai ricavi futuri generati prestando attenzione, in questo caso, alle agevolazioni fiscali, ai risparmi operativi annuali generati e ponendo tutto sulla stessa linea temporale. In questo caso, poiché i flussi di cassa legati all'investimento sono espressi in termini nominali e incorporano l'effetto dell'inflazione, è stato calcolato un tasso di sconto nominale secondo la logica del "judgmental rate", ovvero un tasso ragionevole per l'investimento in questione. Partendo dal costo del finanziamento bancario pari all'1,99%, assunto come tasso base, sono stati aggiunti l'inflazione attesa di medio-lungo periodo pari al 2% e dei premi per il rischio operativo, climatico e di obsolescenza del mezzo agricolo, senza dimenticare la volatilità del prezzo di gasolio e fertilizzanti, ottenendo un tasso di sconto complessivo che spazia fra un lower bound ed un upper bound rispettivamente pari al 6% e l'8%, a seconda che si adotti un approccio prudente e cautelativo oppure uno più ottimistico. Questo range può essere ritenuto rappresentativo del costo opportunità del capitale investito e dell'incertezza dei flussi di cassa.

Va precisato che i flussi di cassa dell'investimento non modificano il reddito imponibile reale, siccome nelle aziende agricole che si limitano alla coltivazione del fondo e non effettuano attività connesse il reddito è determinato catastalmente e la tassazione è agevolata [102]; dunque, i costi di ammortamento non risultano fiscalmente deducibili e l'investimento **non genera alcuno scudo fiscale**. Inserire un'aliquota fiscale avrebbe portato ad una valutazione distorta ed errata dell'investimento, di conseguenza non è stato tenuto in considerazione l'effetto che l'investimento avrebbe in un'azienda di altro tipo. Pertanto, nel calcolo dell'NPV sono stati considerati flussi di cassa al lordo delle imposte.

Per il calcolo dell'NPV è stata utilizzata la seguente formula:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^T}$$

Dove:

- I_0 = investimento iniziale, pari a 0 poiché rateizzato in 5 anni a partire dall'anno 1
- t = intervallo di tempo
- T = durata (vita utile del trattore)
- CF_t = flusso di cassa al tempo t
- r = tasso di sconto %
- VR = valore residuo al termine della vita utile

Anni	CF	CF attualizzato (6%)	CF attualizzato e cumulato (6%)	CF attualizzato (8%)	CF attualizzato e cumulato (8%)
0	-	-	-	-	-
1	+ 13.732 €	+ 12.955 €	+12.955 €	+12.715 €	+12.715 €
2	+ 4.064 €	+3.617 €	+16.572 €	+3.484 €	+16.199 €
3	+4.762 €	+3.998 €	+20.570 €	+3.780 €	+19.979 €
4	+5.486 €	+4.345 €	+24.915 €	+4.032 €	+24.011 €
5	+6.236 €	+4.660 €	+29.575 €	+4.244 €	+28.255 €
6	+18.390 €	+12.964 €	+42.539 €	+11.589 €	+39.844 €
7	+19.191 €	+12.763 €	+55.302 €	+11.198 €	+51.042 €
8	+20.017 €	+12.559 €	+67.861 €	+10.815 €	+61.857 €
9	+20.866 €	+12.351 €	+80.212 €	+10.438 €	+72.295 €
10	+21.737 €	+12.138 €	+92.350 €	+10.068 €	+82.363 €
11	+22.629 €	+11.921 €	+104.271 €	+9.705 €	+92.068 €
12	+23.539 €	+11.698 €	+115.969 €	+9.348 €	+101.416 €
13	+24.463 €	+11.469 €	+127.438 €	+8.995 €	+110.411 €
14	+25.398 €	+11.234 €	+138.672 €	+8.647 €	+119.058 €
15	+46.339 €	+19.336 €	+158.008 €	+14.608 €	+133.666 €

Tabella 2: Cash flow attualizzato e NPV dell'investimento sul trattore

Come si evince dal calcolo dei flussi di cassa e dalla relativa sommatoria concernente l'anno 15, l'NPV è nettamente positivo sia nel caso in cui si adotti un criterio ottimistico con tasso di sconto pari al 6%, sia che si segua un'impostazione più prudente come nel secondo caso, dove si è studiata la redditività dell'investimento per un tasso di sconto coincidente con l'upper bound di cui si è parlato in precedenza, ovvero l'8%.

A questo punto è bene esaminare l'investimento sotto un'altra prospettiva, che consiste nell'ipotizzare **l'assenza degli incentivi legati all'Agricoltura 4.0**. Questa analisi ha

l'obiettivo di valutare la convenienza economica intrinseca dell'investimento, ossia verificare se l'acquisto del trattore risulti sostenibile e redditizio a prescindere dal supporto pubblico: confrontando l'NPV calcolato senza agevolazioni fiscali con quello ottenuto nello scenario incentivato, è possibile comprendere in che misura gli incentivi incidano sulla redditività complessiva e stabilire se l'investimento sia giustificabile esclusivamente sulla base dei flussi di cassa generati dall'attività, oppure se la sua convenienza dipenda in modo determinante dalla presenza delle agevolazioni.

Anni	CF (senza incentivi)	CF attualizzato (6%)	CF attualizzato e cumulato (6%)	CF attualizzato (8%)	CF attualizzato e cumulato (8%)
0	-	-	-	-	-
1	-6.758 €	-6.375 €	-6.375 €	-6.257 €	-6.257 €
2	-6.086 €	-5.417 €	-11.792 €	-5.218 €	-11.475 €
3	-5.388 €	-4.524 €	-16.316 €	-4.277 €	-15.752 €
4	-4.664 €	-3.694 €	-20.010 €	-3.428 €	-19.180 €
5	-3.914 €	-2.925 €	-22.935 €	-2.664 €	-21.844 €
6	+18.390 €	+12.964 €	-9.971 €	+11.589 €	-10.255 €
7	+19.191 €	+12.763 €	+2.792 €	+11.198 €	+943 €
8	+20.017 €	+12.559 €	+15.351 €	+10.815 €	+11.758 €
9	+20.866 €	+12.351 €	+27.702 €	+10.438 €	+22.196 €
10	+21.737 €	+12.138 €	+39.840 €	+10.068 €	+32.264 €
11	+22.629 €	+11.921 €	+51.761 €	+9.705 €	+41.969 €
12	+23.539 €	+11.698 €	+63.459 €	+9.348 €	+51.317 €
13	+24.463 €	+11.469 €	+74.928 €	+8.995 €	+60.312 €
14	+25.398 €	+11.234 €	+86.162 €	+8.647 €	+68.959 €
15	+46339 €	+19.336 €	+105.498 €	+14.608 €	+83.567 €

Tabella 3: Cash flow attualizzato e NPV per l'investimento sul trattore senza agevolazioni fiscali

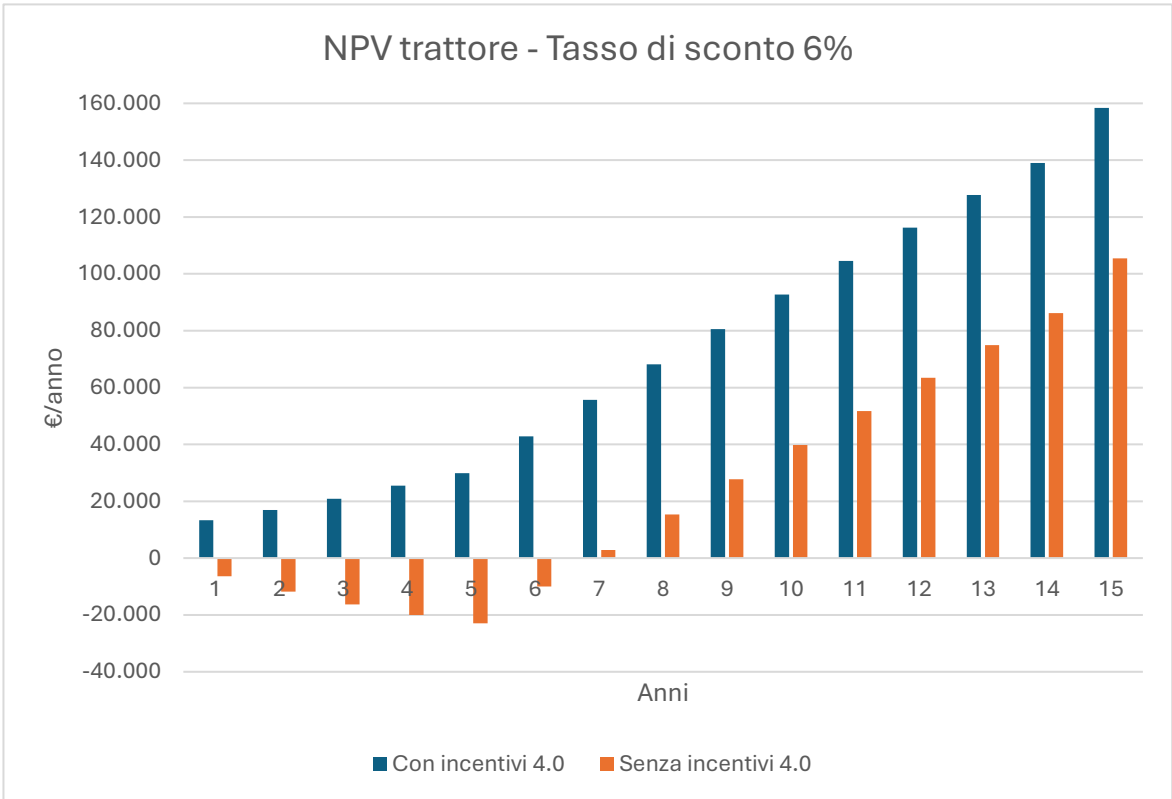


Tabella 4: grafico del CF cumulato e attualizzato (6%) per i 15 anni di vita del trattore

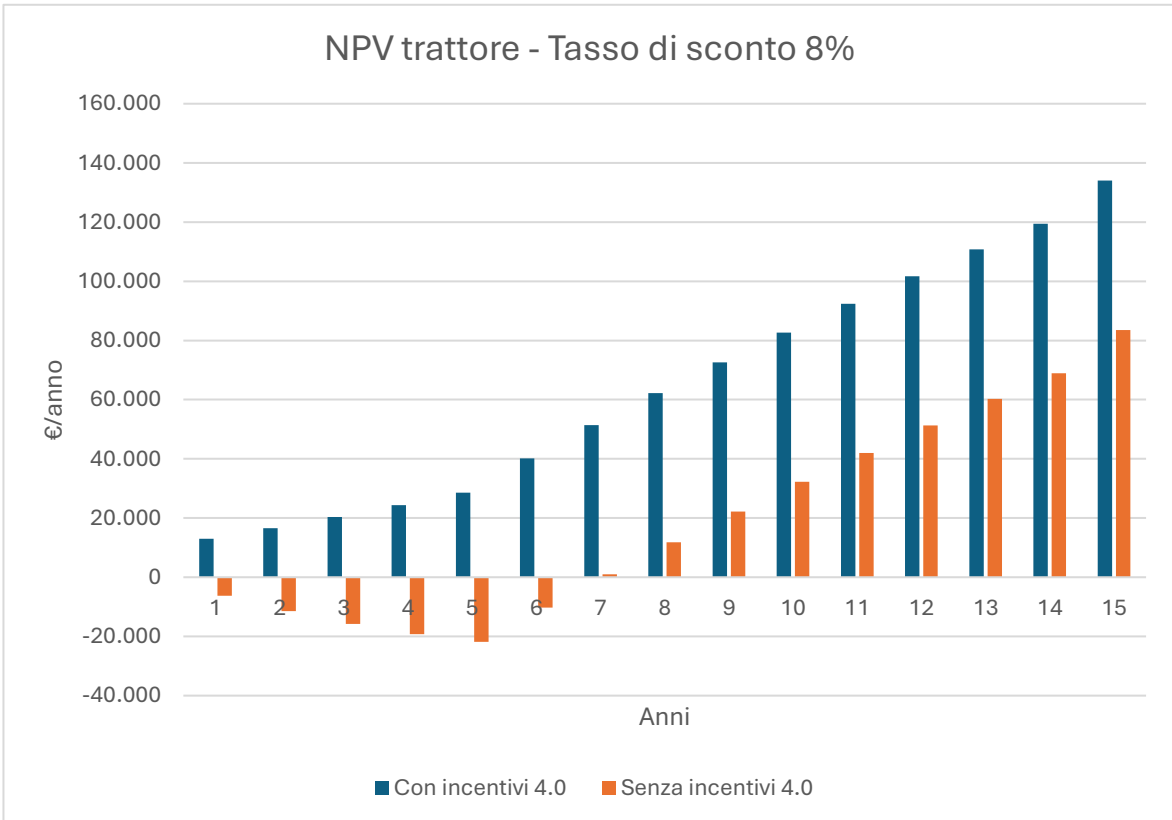


Tabella 5: grafico del CF cumulato e attualizzato (8%) per i 15 anni di vita del trattore

Osservando i grafici soprastanti, si può ben notare che il trend per i due approcci con i diversi tassi di sconto è il medesimo: il bilancio dell'investimento è positivo sin dall'inizio e migliora col passare degli anni nel caso con gli incentivi, mentre è negativo e peggiora fino al quinto anno, ovvero per tutta la durata dell'ammortamento, senza la presenza di agevolazioni fiscali, per poi riprendersi e incrementare progressivamente fino al termine della vita del trattore. Tuttavia, ciò che si differenzia fra l'approccio prudente e quello ottimistico è l'ampiezza delle perdite e dei profitti. Invece, l'aspetto interessante è che, indipendentemente dal tasso di sconto utilizzato, nello scenario privo di agevolazioni fiscali l'investimento presenta, per i primi anni, un saldo negativo: in questa fase iniziale, infatti, le spese connesse al nuovo acquisto superano i ricavi che ne derivano a causa dei costi di ammortamento del trattore, che incidono in modo significativo sui flussi di cassa iniziali. Proseguendo lungo l'orizzonte temporale considerato, la situazione si riequilibra progressivamente e, al termine dei 15 anni di vita utile del trattore, il bilancio complessivo dell'investimento risulta comunque positivo. Ciò indica che l'investimento è in grado di generare valore anche in assenza di incentivi, sebbene la redditività complessiva sia più contenuta rispetto alla situazione attuale in cui sono presenti agevolazioni fiscali legate all'Agricoltura 4.0, che contribuiscono a far sì che il bilancio dell'investimento sia positivo fin dal primo anno e che il valore finale dell'NPV sia nettamente maggiore.

Nell'eventualità in cui non siano presenti agevolazioni fiscali, si può notare che il **Discounted Payback Period (DPP)** [103], ovvero l'arco temporale necessario per recuperare il denaro investito nel progetto è compreso fra i 6 e i 7 anni, rispettivamente pari a 6,78 anni nel caso di approccio ottimistico (tasso di sconto 6%) e pari a 6,92 anni laddove si adotti un approccio maggiormente prudentiale (tasso di sconto 8%), mentre nella situazione incentivata il recupero del capitale investito è immediato in quanto il flusso di cassa netto è positivo già dal primo anno. Siccome la liquidità in una medio-piccola azienda agricola è un vincolo critico (stagionalità dei ricavi, incertezza climatica, volatilità dei prezzi), questo fattore potrebbe rivelarsi determinante nella decisione di effettuare o meno l'investimento, poiché l'azzeramento del tempo di recupero riduce significativamente il rischio finanziario e il fabbisogno di liquidità dell'impresa.

In conclusione, è utile valutare anche l'**Internal Return Rate (IRR)** dell'investimento, ossia il tasso di attualizzazione che rende nullo l'NPV. Esso rappresenta il rendimento percentuale annuo implicito del progetto e il confronto tra questo valore ed il tasso di sconto utilizzato per il calcolo dell'NPV permette di determinare non solo la convenienza economica del

progetto, ma anche il suo margine di sicurezza: quanto maggiore è la differenza tra IRR e costo del capitale, tanto più l'investimento è in grado di assorbire eventuali variazioni negative dei flussi di cassa, peggioramento delle performance operative o un aumento dei tassi. In tal modo, l'IRR diventa uno strumento complementare alle metriche dell'NPV e del Discounted Payback Period, utile per valutare la solidità e la sostenibilità finanziaria complessiva dell'operazione.

Per determinare il valore dell'IRR si è dunque proceduto a sviluppare la seguente formula:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^{15} \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} + \frac{VR}{(1 + IRR)^{15}} = 0$$

Poiché con flussi di cassa distribuiti su 15 anni l'equazione polinomiale che ne deriva è di grado elevato e non è risolvibile analiticamente, la soluzione si è ottenuta tramite un algoritmo iterativo implementato in Excel. Il risultato che ne è derivato mostra un **IRR = 35%**, valore significativamente superiore al judgmental rate adottato (6% - 8%): tale differenza evidenzia un ampio margine di sicurezza e conferma la forte convenienza economico-finanziaria dell'investimento, che risulta in grado di generare un rendimento ben più alto del costo opportunità del capitale a prescindere dalla concessione di incentivi fiscali, assegnando indiscutibilmente robustezza al progetto.

3.3.3 Costi e benefici – Robot di mungitura

L'introduzione, nel 2022, di un robot di mungitura Lely nella cascina Sant'Anna, con l'obiettivo di automatizzare la mungitura delle 80 vacche in lattazione, ha generato un esborso economico per l'acquisto del bene pari a **149.000 euro+ IVA**, oltre alla contestuale sottoscrizione di un contratto di assistenza h24 per la manutenzione ordinaria e straordinaria durante tutta la vita utile dell'investimento, pari a 10 anni, al costo di 15.000 euro/anno. Occorre tuttavia precisare che una spesa per la manutenzione si sarebbe comunque dovuta sostenere anche nell'ipotesi di prosecuzione dell'attività mediante la sala di mungitura tradizionale, la quale richiede interventi periodici di riparazione e sostituzione delle componenti meccaniche soggette a usura, sebbene per importi assai più contenuti, ravvisabili in circa 2.000 euro annui. Perciò, in coerenza con il principio dei flussi di cassa incrementali, secondo cui nell'analisi degli investimenti devono essere considerati esclusivamente i costi e i benefici differenziali rispetto all'alternativa di riferimento, ai fini della valutazione è stato

imputato unicamente il maggior onere riconducibile all'adozione del robot di mungitura, pari a **13.000 €** l'anno.

Anche per questo investimento il costo iniziale I_0 è stato spalmato su un arco temporale di 5 anni mediante finanziamento agevolato con la legge Nuova Sabatini ad un tasso del 2,5% annuo, con un contributo, però, pari al 3,575% annuo. Complessivamente l'incentivo goduto grazie alla suddetta agevolazione fiscale è stato pari al 10% circa dell'imponibile.

$$R = C \cdot \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} = 149.000 \cdot \frac{0,03575 \cdot (1 + 0,03575)^5}{(1 + 0,03575)^5 - 1} = 33.071 \text{ €}$$

Dove:

- R = rata annuale secondo il calcolo Sabatini
- C = capitale investito = 149.000 €
- i = tasso annuo decimale = 0,03575
- n = numero di anni = 5

Spesa complessiva = 33.071 € · 5 anni = 165.355 €

Contributo totale corrisposto = 165.355 - 149.000 = 16.355 €

Spese di istruttoria = 1.000 €

Contributo netto incassato = 15.355 €

Come detto in precedenza, però, il tasso d'interesse effettivamente corrisposto dall'azienda sul finanziamento agrario presso la Banca Territori del Monviso equivale al **2,5% annuo**, dunque, il bilancio dell'operazione finanziaria risulta anche in questo caso positivo.

$$R_{reale} = C \cdot \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} = 149.000 \cdot \frac{0,025 \cdot (1 + 0,025)^5}{(1 + 0,025)^5 - 1} = 32.072 \text{ €}$$

Spesa complessiva_{reale} = 32.072 € · 5 anni = 160.360 €

Interessi pagati = 160.360 - 149.000 = 11.360 €

Profitto complessivo = Contributo corrisposto - spese di istruttoria - interessi pagati =
= 16.355 - 11.360 - 1.000 = **3.995 €**

Anche in questo caso, l'azienda è stata fortemente motivata all'investimento dalla permanenza del credito d'imposta per beni strumentali 4.0 pure nel 2022, nonostante l'aliquota fosse scesa al 40% del capitale investito, corrispondente in questa fattispecie ad un'agevolazione di 59.600 € detraibili tramite modello F24 nei 5 anni successivi all'investimento, con una quota annuale precisamente di **11.920 €**.

Passando ai benefici riscontrati dalla consultazione dei registri aziendali e dai dati di bilancio, si è notato che l'installazione del robot di mungitura ha determinato una significativa riduzione dei costi operativi aziendali, oltre a un incremento dei ricavi derivanti dalla produzione di latte.

Innanzitutto, l'automazione del processo di mungitura ha reso superflua la presenza dell'unico dipendente dell'azienda assunto fino a quel momento, il quale svolgeva la funzione di operatore all'interno della sala di mungitura tradizionale: la cessazione di tale rapporto di lavoro ha comportato un risparmio lordo pari a 2.400 € mensili, corrispondenti a **28.800 €** annui. Ciò rappresenta una delle principali voci di miglioramento della struttura economica aziendale, incidendo direttamente sul taglio dei costi operativi.

Parallelamente, nell'arco dei primi mesi successivi all'installazione del robot si è registrata una crescita importante della produzione media giornaliera di latte per capo, che è passata da 35 a 37 litri per vacca e si è mantenuta costante negli anni seguenti. Considerando l'ammontare di 80 vacche in mungitura, l'aumento complessivo è risultato pari a 160 litri giornalieri retribuiti al prezzo medio di vendita del latte degli ultimi 5 anni pari a 0,50 € al litro. Pertanto, si è registrato un surplus di 80 € sul ricavo giornaliero, equivalente, su base annua, a circa **29.200 €**. Questo incremento produttivo è riconducibile principalmente alla maggiore frequenza e regolarità delle mungiture consentite dal sistema automatizzato, che permette agli animali di accedere volontariamente al robot secondo i propri ritmi fisiologici, migliorando così la resa produttiva.

Un ulteriore fattore positivo è stato riscontrato nella riduzione della spesa sanitaria: si è infatti osservata una diminuzione dei costi per medicinali pari a circa **700 € l'anno** dopo aver installato il robot. Tale miglioria è verosimilmente correlata al monitoraggio costante che effettua il robot sui parametri produttivi e fisiologici di ciascun animale grazie ai collari UHT, confrontando i dati rilevati con lo storico individuale. In questo modo eventuali anomalie sono individuate tempestivamente, consentendo interventi precoci e mirati, con effetti positivi sul benessere animale e sulla prevenzione delle patologie.

Di contro, si è registrato un aumento della spesa per detersivi, prodotti igienizzanti e materiali specifici necessari al corretto funzionamento del robot e alla sanificazione automatizzata dell'impianto, quantificabile in circa **3.200 €** annui in più rispetto a prima. Il sistema robotizzato, infatti, effettua automaticamente cicli di lavaggio frequenti e impiega prodotti specifici per garantire elevati standard igienico-sanitari, sia a tutela della qualità del latte sia per preservare gli animali dalla contaminazione dei batteri.

Si è inoltre registrata un'aggiuntiva variazione nei costi operativi in merito al consumo di energia elettrica, in quanto, a differenza della precedente sala di mungitura che operava mediamente per quattro ore al giorno, il robot di mungitura rimane in funzione 24 ore su 24. Inoltre, la maggiore complessità tecnologica del sistema, caratterizzato dalla presenza di numerosi componenti elettronici quali sensori, laser di posizionamento, attuatori meccanici e unità di elaborazione dati, comporta necessariamente un fabbisogno energetico superiore rispetto all'impianto tradizionale. Ciò ha determinato un incremento delle bollette dell'energia elettrica ravvisabile in circa **5.500 €** l'anno.

Infine, come era ragionevole prevedere, la presenza di un mangime concentrato specifico all'interno del robot ha modificato parzialmente il comportamento alimentare delle bovine: attratte dall'elevata appetibilità dell'alimento, le vacche tendono infatti a recarsi in mungitura con maggiore frequenza rispetto alle due volte giornaliere previste per la mungitura tradizionale, con un numero medio di passaggi al robot che attualmente si aggira su 2,7 volte/giorno.

Va precisato che il sistema robotizzato dosa la quantità giornaliera di concentrato somministrabile a ciascun animale attraverso un algoritmo di calcolo che incrocia dati produttivi, i giorni di lattazione e il numero di parti, indipendentemente dalla frequenza dei passaggi nel robot. Tuttavia, proprio perché la produzione media per capo è aumentata, anche la quantità di mangime assegnata risulta, in linea generale, superiore rispetto a quella precedentemente fornita in mangiatoia secondo l'alimentazione tradizionale. Questo incremento della quantità di mangime somministrata, unito ad un prezzo più elevato di questo concentrato rispetto a quello standard, ha indotto un esborso incrementale di circa **11.000 €** annui.

A ben pensare, il valore residuo del robot al termine della vita utile è stato ragionevolmente ipotizzato su livelli modesti, alla luce del significativo deterioramento cui risultano esposte le numerose componenti elettroniche di cui è dotato, operando in modo continuativo in

ambienti caratterizzati da elevata umidità e scarsa igienicità. Precisamente, la cifra recuperabile stimata è pari a **13.000 €**.

Costi/Benefici	Temporalità	Importo	Tasso di crescita annuo
Nuova Sabatini	Anno 1	+ 15.355 €	-
Credito d'imposta	Primi 5 anni	+ 11.920 €	-
Rata finanziamento	Primi 5 anni	- 32.072 €	-
Surplus latte	Tutti e 10 gli anni	+ 29.200 €	+ 2%
Manodopera	Tutti e 10 gli anni	+ 28.800 €	+ 5%
Manutenzione	Tutti e 10 gli anni	- 13.000 €	+ 5%
Detergenti	Tutti e 10 gli anni	- 3.200 €	+ 5%
Energia elettrica	Tutti e 10 gli anni	- 5.500 €	+ 2%
Mangime	Tutti e 10 gli anni	- 11.000 €	+ 5%
Spese sanitarie	Tutti e 10 gli anni	+ 700 €	+ 5%
Valore residuo	Anno 15	+ 13.000 €	-

Tabella 6: riepilogo dei costi e benefici legati all'acquisto del robot di mungitura

3.3.4 Calcolo NPV, DPP, IRR – Robot di mungitura

Analogamente a quanto effettuato per l'investimento sul trattore, anche per il robot di mungitura si è proceduto al calcolo di specifici indicatori finanziari, in modo da quantificarne la redditività e valutarne l'impatto economico sull'azienda.

Anzitutto, sono stati stimati i flussi di cassa attesi per tutti e dieci gli anni di vita del robot, sulla base dei flussi certi verificatisi dal 2023 al 2025 e reperiti dai dati di bilancio. Il tasso di crescita riscontrato per i costi operativi varia dal 2% annuo sul prezzo di latte ed energia elettrica al 5% sul costo della manodopera, medicinali, detergenti e mangimi.

Per quanto concerne il tasso di sconto, l'analisi è stata svolta adottando il medesimo "judgmental rate" compreso fra il 6% e l'8% considerato in precedenza. Questa assunzione è ragionevole poiché, sebbene il finanziamento sia stato sottoscritto ad un tasso leggermente superiore (2,5%) rispetto all'investimento sul trattore, questo mezzo punto percentuale risulta compensato da un profilo di rischio complessivamente inferiore, in quanto viene meno la componente legata agli eventi climatici.

Anni	CF	CF attualizzato (6%)	CF attualizzato e cumulato (6%)	CF attualizzato (8%)	CF attualizzato e cumulato (8%)
0	-	-	-	-	-
1	+21.203 €	+ 20.002 €	+20.002 €	+19.632 €	+19.632 €
2	+ 6.437 €	+5.729 €	+25.731 €	+5.519 €	+25.151 €
3	+7.041 €	+5.912 €	+31.643 €	+5.589 €	+30.740 €
4	+7.661 €	+6.068 €	+37.711 €	+5.631 €	+36.371 €
5	+8.297 €	+6.200 €	+43.911 €	+5.647 €	+42.018 €
6	+29.102 €	+20.516 €	+64.427 €	+18.339 €	+60.357 €
7	+29.772 €	+19.800 €	+84.227 €	+17.372 €	+77.729 €
8	+30.460 €	+19.111 €	+103.338 €	+16.457 €	+94.186 €
9	+31.166 €	+18.447 €	+121.785 €	+15.591 €	+109.777 €
10	+44.892 €	+25.067 €	+146.852 €	+20.794 €	+130.571 €

Tabella 7: Cashflow attualizzato e NPV per l'investimento sul robot di mungitura

Già a un primo esame dei risultati è possibile affermare che l'operazione consistente nell'acquisto del robot Lely ha generato un significativo valore per la Cascina Sant'Anna sin dai primi anni. Nonostante l'entità rilevante dell'investimento iniziale, la ripartizione di questo costo su un periodo di ammortamento quinquennale risulta ampiamente bilanciata dagli sgravi fiscali ottenuti nei primi 5 esercizi tramite credito d'imposta e Nuova Sabatini,

oltre che dalle migliorie sulla produzione e sul taglio dei costi operativi, evidenziando la sostenibilità economico-finanziaria dell'operazione lungo tutto il periodo analizzato.

Similmente ai risultati ottenuti per il trattore, si può ben notare che l'NPV per l'investimento in questione è assolutamente positivo sia nel caso in cui si adotti un criterio ottimistico con tasso di sconto pari al 6% (146.852 €), sia che si preferisca una maggior cautela nella valutazione dell'investimento (130.571 €), ovvero l'ipotesi analizzata nella colonna di destra, ove si è calcolata la redditività dell'investimento per un tasso di sconto dell'8%.

È interessante, a questo punto, ripetere l'analisi escludendo dal calcolo dei flussi di cassa rilevanti per l'NPV gli introiti dovuti al credito d'imposta 4.0 e alla Nuova Sabatini, al fine di verificare eventuali stravolgimenti nella valutazione del medesimo investimento in assenza di agevolazioni fiscali.

Anni	CF (senza incentivi)	CF attualizzato (6%)	CF attualizzato e cumulato (6%)	CF attualizzato (8%)	CF attualizzato e cumulato (8%)
0	-	-	-	-	-
1	-6.072 €	-5.728 €	-5.728 €	-5.622 €	-5.622 €
2	-5.483 €	-4.880 €	-10.608 €	-4.701 €	-10.323 €
3	-4.879 €	-4.097 €	-14.705 €	-3.873 €	-14.196 €
4	-4.259 €	-3.374 €	-18.079 €	-3.130 €	-17.326 €
5	-3.623 €	-2.707 €	-20.786 €	-2.466 €	-19.792 €
6	+29.102 €	+20.516 €	-270 €	+18.339 €	-1.453 €
7	+29.772 €	+19.800 €	+19.530 €	+17.372 €	+15.919 €
8	+30.460 €	+19.111 €	+38.641 €	+16.457 €	+32.376 €
9	+31.166 €	+18.447 €	+57.088 €	+15.591 €	+47.967 €
10	+44.892 €	+25.067 €	+82.155 €	+20.794 €	+68.761 €

Tabella 8: Cashflow attualizzato e NPV per l'investimento sul robot di mungitura senza agevolazioni fiscali

Si procede ora alla rappresentazione grafica delle informazioni così ottenute, al fine di agevolare la lettura dell'andamento dei flussi di cassa lungo l'intero orizzonte temporale dell'investimento.

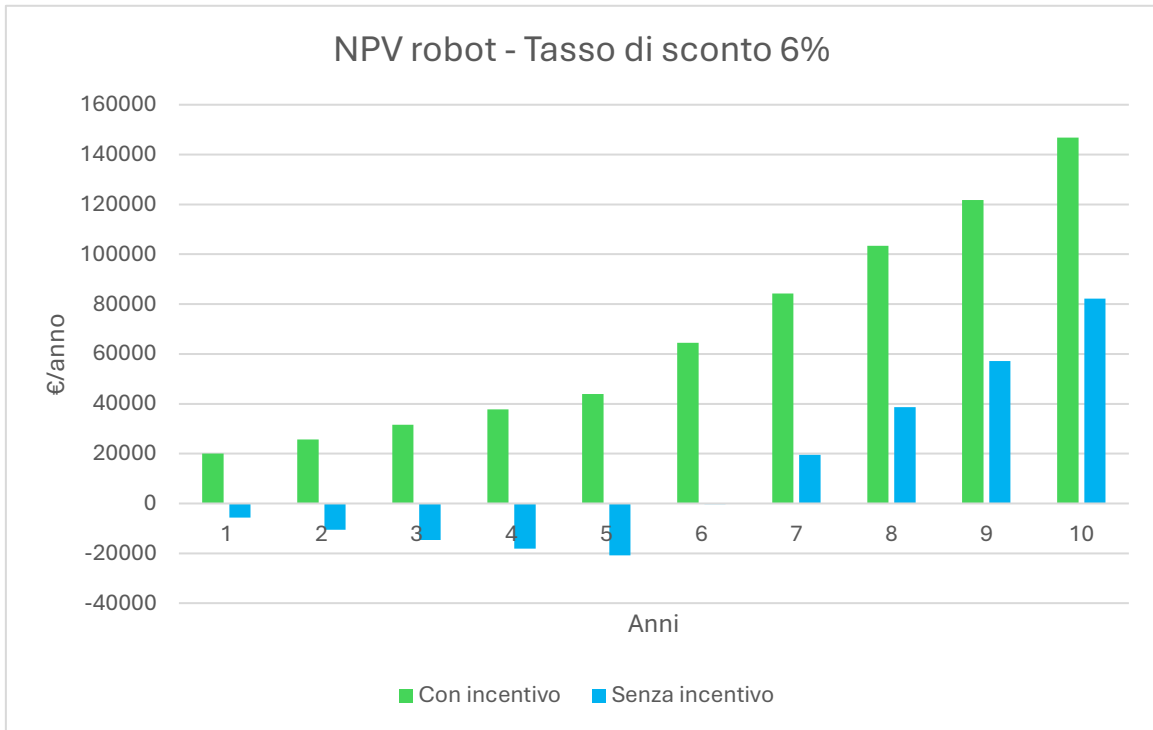


Tabella 9: grafico del CF cumulato e attualizzato (6%) per i 10 anni di vita del robot

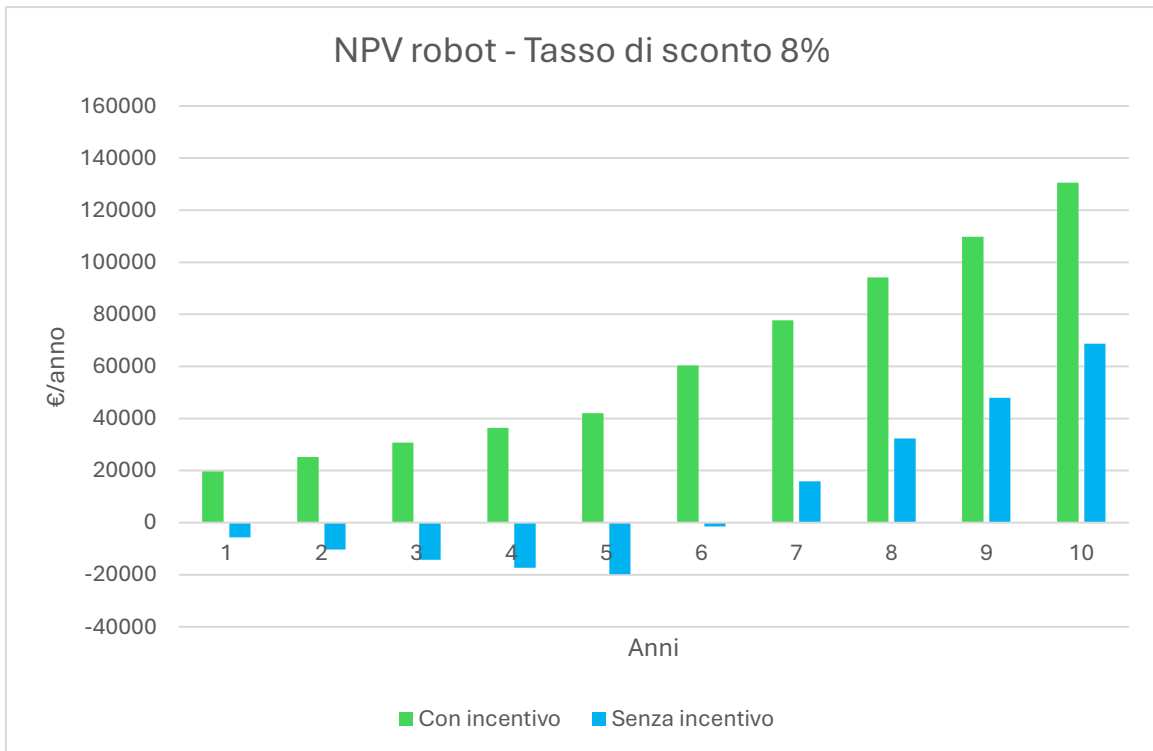


Tabella 10: grafico del CF cumulato e attualizzato (8%) per i 10 anni di vita del robot

Dall'ispezione visiva emerge come il profilo temporale dell'investimento presenti un andamento analogo nei due approcci considerati, pur in presenza di differenti tassi di sconto. Nella situazione reale, ove l'azienda ha beneficiato delle agevolazioni, il saldo cumulato dell'investimento risulta positivo sin dal principio e mostra un progressivo miglioramento nel corso dell'orizzonte temporale analizzato. Al contrario, nell'ipotesi di assenza di incentivi, il bilancio evidenzia un valore negativo nei primi esercizi, con un progressivo peggioramento fino al quinto anno, coincidente con la terminazione del pagamento delle rate del finanziamento; successivamente, si registra una graduale ripresa, con un incremento costante sino al termine dei 10 anni di vita utile dell'investimento. Questo andamento si verifica indipendentemente dal tasso di sconto impiegato ed è dovuto all'incidenza dei costi di ammortamento del robot, che, seppur spalmati su 5 anni, determinano un peso significativo sui flussi di cassa iniziali, facendo sì che le spese connesse all'acquisto superino temporaneamente i benefici generati dall'investimento, anche se il bilancio complessivo al termine dell'orizzonte temporale considerato sarebbe comunque ampiamente positivo, a dimostrazione del fatto che l'investimento gode di una redditività intrinseca che non dipende dalla presenza dei sussidi pubblici.

La differenza tra l'approccio prudente e quello ottimistico non riguarda tanto la dinamica del trend economico legato al prospetto dell'investimento, quanto piuttosto l'entità delle perdite iniziali e dei profitti successivi, che risultano più o meno accentuati a seconda delle ipotesi adottate.

Anche per codesto investimento il periodo di rientro del denaro investito, determinato dall'indicatore finanziario cosiddetto **Discounted Payback Period (DPP)**, è stato calcolato ovviamente solo nel caso privo di agevolazioni fiscali, siccome nella situazione incentivata il saldo è sempre positivo e il recupero dell'investimento è immediato. L'arco temporale così ottenuto risulta quasi esattamente di 6 anni, rispettivamente 6,01 anni nel caso di approccio ottimistico (tasso di sconto 6%) e 6,08 anni laddove si adotti un approccio maggiormente prudentiale (tasso di sconto 8%).

È bene sottolineare che, nonostante il DPP sia simile per ambedue gli investimenti sul trattore e sul robot, questo dato non può essere interpretato nello stesso modo, in quanto è essenziale che esso sia sempre rapportato alla durata complessiva del progetto. Nel caso dell'investimento sul trattore, che ha una vita utile di 15 anni, il recupero del capitale avviene dopo quasi 7 anni, dunque, restano più di 8 anni di flussi di cassa attualizzati positivi; mentre per quanto riguarda il robot si ha una vita utile di 10 anni con un DPP di 6 anni, quindi, una

volta recuperato il capitale restano solamente 4 anni di flussi di cassa attualizzati positivi. Questo significa che, a differenza del trattore, il periodo durante il quale l'investimento sul robot genera valore netto dopo aver recuperato l'esborso iniziale è relativamente breve.

Pertanto, pur presentando tempi di recupero attualizzati pressoché comparabili, il primo investimento risulta potenzialmente più conveniente sotto il profilo della creazione di valore nel lungo periodo, perché offre un orizzonte temporale più ampio di flussi positivi dopo il recupero iniziale, anche se bisogna considerare che spostandosi avanti sulla linea temporale il fattore tempo incide maggiormente sull'attualizzazione dei flussi.

Pertanto, è bene concentrarsi anche sulla valutazione dell'**Internal Return Rate (IRR)** dell'investimento che, come enunciato in precedenza, rispecchia il tasso di attualizzazione che rende nullo l'NPV.

Per determinare il valore dell'IRR si è sviluppata la seguente formula:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^{10} \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} + \frac{VR}{(1 + IRR)^{10}} = 0$$

Sebbene in questo caso l'equazione polinomiale che ne deriva è di grado inferiore rispetto all'investimento sul trattore, è comunque troppo complessa per essere risolta analiticamente, dunque, il calcolo è stato affidato all'algoritmo iterativo implementato in Excel. La soluzione risultante rivela un **IRR = 43%**, valore altissimo e significativamente superiore al judgmental rate adottato (6% - 8%). Il margine di sicurezza su questo investimento è ancora più elevato rispetto a quello sul trattore e mostra l'indiscutibile convenienza economico-finanziaria del passaggio dalla mungitura tradizionale a quella robotizzata, che pare anch'essa capace di generare un rendimento ben più alto del costo opportunità del capitale a prescindere dai sussidi pubblici.

3.4 Analisi TO BE

Fino ad oggi, l'azienda agricola oggetto di studio ha sempre adottato il sistema di irrigazione "a scorrimento" [104], tecnica tradizionale ampiamente diffusa nella Pianura Padana. Questo metodo consiste nel distribuire l'acqua direttamente sulla superficie del campo, tipicamente a partire dalla capezzagna più alta dell'appezzamento per poi lasciarla scorrere per gravità, infiltrandosi nel terreno fino a saturare lo strato esplorato dalle radici delle colture e dandogli il tempo di coprire tutta la superficie dell'appezzamento. In presenza di

abbondante disponibilità d'acqua, questo sistema garantisce un rapido apporto idrico su ampie superfici.

Pur essendo una tecnica storicamente consolidata, quest'ultima è però caratterizzata da scarsa uniformità di distribuzione, forte dipendenza dall'intervento manuale dell'uomo ed una gestione poco efficiente della risorsa idrica, con elevate perdite dovute ad evaporazione, ruscellamento superficiale e percolazione profonda. Di conseguenza, una parte significativa del volume d'acqua immesso in circolo non viene effettivamente utilizzato dalle piante.



Figura 35: irrigazione per scorrimento di un campo di mais [105]

Dal punto di vista agronomico, questo sistema non consente di modulare l'apporto idrico in base alle reali esigenze della coltura, con potenziali effetti negativi sia dal punto di vista produttivo che ambientale. Infatti, in condizioni di pendenza pressoché nulla si rischia il ristagno idrico e l'asfissia radicale delle piante, mentre in caso di pendenze troppo elevate del campo, l'acqua "corre" senza penetrare nel terreno col risultato di una scarsa irrigazione che va ripetuta soventemente, oltre al compattamento del terreno ed alla lisciviazione dei fertilizzanti. Perdi più, è necessario che la pendenza sia uniforme in tutto l'appezzamento, in quanto la presenza anche solo di un minimo rilievo impedirebbe il transitò dell'acqua con la conseguente morte, nelle zone ove non è giunta acqua, della coltura per siccità.

D'altro canto, è bene però evidenziare che questa tecnica vanta di semplicità e basso costo di realizzazione dell'impianto e non necessita di tecnologie complesse né di competenze tecniche avanzate per la gestione quotidiana.

Alla luce dei limiti sopra citati, la cascina Sant'Anna sta pensando di innovare profondamente l'irrigazione nei propri appezzamenti con l'installazione di un impianto pivot [106] integrato con la sensoristica e l'automazione **Wappfruit**, che rappresenterebbe una nuova applicazione dei principi dell'Agricoltura 4.0 all'interno della nostra azienda.

L'introduzione di un impianto di irrigazione a pioggia del tipo pivot costituisce già in sé un primo passo verso una gestione più moderna e razionale dell'acqua. Il pivot permette una distribuzione uniforme e controllata, offre la possibilità di modulare i volumi irrigui e riduce significativamente le perdite per evaporazione e percolazione. Ciononostante, il vero elemento di innovazione emerge dall'integrazione di questo sistema con le tecnologie digitali di ultima generazione.

In questo contesto, la sensoristica e la piattaforma di automazione che propone Wappfruit svolgono un ruolo chiave. Il cuore di Wappfruit è un sistema **IoT (Internet of Things)** che prende decisioni di irrigazione basate sui dati reali del suolo invece che su orari prefissati o sensazioni empiriche. Si potrebbero installare nel suolo i sensori che monitorano in modo continuo lo stato idrico nella zona esplorata dalle radici, fornendo dati oggettivi e aggiornati sulle condizioni del terreno. Tuttavia, sorge un problema: a differenza delle piantagioni di frutta che hanno in media vita ventennale, i cereali vanno seminati ogni anno e, di conseguenza, il terreno deve essere lavorato spesso. Dunque, i sensori al di sopra dei 40 cm di profondità potrebbero essere di intralcio alle lavorazioni agricole e la soluzione ideale sarebbe studiare una planimetria ben distribuita dei sensori all'interno dell'appezzamento senza sovrapporlo, in modo da cogliere le differenze fra le condizioni di una zona piuttosto che un'altra, lasciando però il giusto spazio per lavorare il terreno. Una misura raccomandabile potrebbe essere quella di 50 metri di raggio di copertura per ogni sensore.

L'interazione tra pivot e sensoristica Wappfruit permetterebbe di realizzare un sistema di irrigazione completamente automatizzato, in cui le informazioni ricavate dai sensori ed elaborate dal server Wappbrain sarebbero valorizzate al punto di essere unico parametro per l'attivazione e la gestione dell'irrigazione del pivot da parte della centralina di attuazione Wappact. Grazie a queste informazioni sarebbe possibile stabilire con precisione *quando* e *quanto* irrigare, superando la logica dell'irrigazione "a calendario".

Dal punto di vista della sostenibilità, questa realizzazione consentirebbe una significativa riduzione dei consumi idrici, contribuendo alla tutela di una risorsa sempre più limitata. Allo stesso tempo, una **distribuzione dell'acqua a dosaggio variabile** favorirebbe un migliore

equilibrio idrico delle colture, riducendo lo stress delle piante e giovando anche all'assorbimento dei nutrienti.

Inoltre, l'automazione dell'irrigazione comporterebbe una notevole riduzione di lavoro manuale, un maggiore controllo delle operazioni colturali e una migliore tracciabilità degli interventi, rendendo la nostra azienda agricola più efficiente e competitiva.

In conclusione, la sinergia tra irrigazione pivot e sistema Wappfruit potrebbe essere un esempio emblematico di come l'Agricoltura 4.0 consenta di passare da una semplice pratica irrigua a una vera e propria gestione intelligente dell'acqua nella coltivazione del mais, basata su dati, automazione e sostenibilità ambientale.

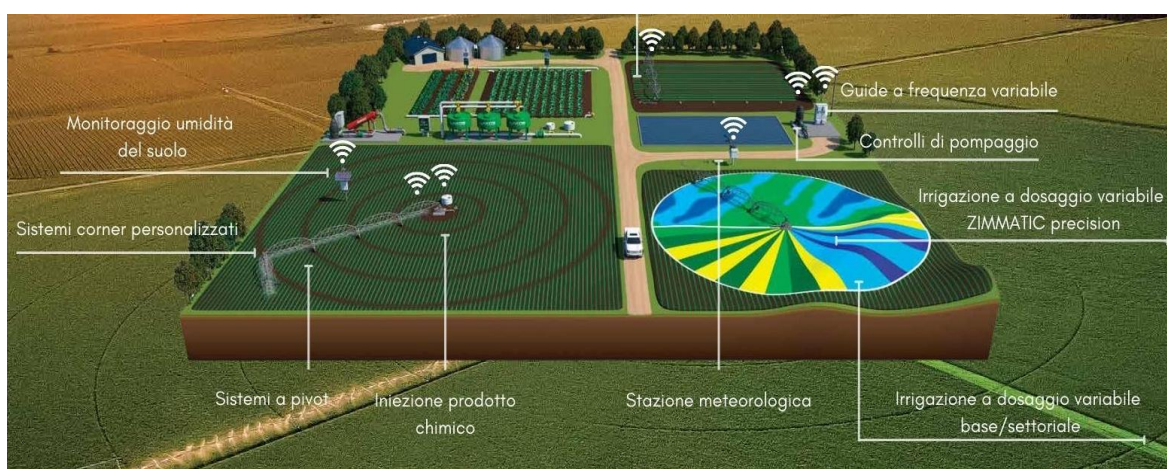


Figura 36: schema illustrativo del nuovo sistema di irrigazione [107]

3.5 Impatto economico del nuovo sistema di irrigazione

L'introduzione del sistema di irrigazione intelligente Wappfruit con pivot sui 40 ettari di terreno coltivati a mais nella nostra azienda agricola potrebbe generare benefici economici rilevanti, sia in termini di risparmio idrico sia in termini di incremento della produttività colturale, grazie alla diminuzione dello stress idrico nelle fasi fenologiche più sensibili.

Per quanto riguarda le spese legate all'irrigazione tradizionale, sulla base dei dati aziendali, si registra un costo energetico dei pozzi pari a 30 €/h e la manodopera caratterizzata dalla medesima tariffa oraria di 15€ considerata per gli altri investimenti, per un totale di 15 ore annue di irrigazione per ettaro, avendo considerato 5 ore/ha per ogni ciclo irriguo ed una media di 3 cicli all'anno. L'adozione del sistema Wappfruit, in virtù dei dati sperimentali analizzati nel capitolo 2.6.1.1, potrebbe dar luogo ad un **risparmio idrico in media del 35%**, comportando una riduzione proporzionale delle tempistiche di funzionamento dei pozzi e

l'azzeramento delle ore di manodopera. Ciò si tradurrebbe, quindi, in un risparmio economico annuo di 225 €/ha di manodopera, con tasso di crescita annuo del 5% come per gli investimenti analizzati in precedenza, e di 157,5 €/ha di corrente elettrica per l'azionamento dei pozzi, con tasso di crescita nominale annuo del 5%, che incorpora sia l'inflazione attesa di medio-lungo periodo sia una crescita reale del prezzo dell'elettricità legata all'aumento strutturale della domanda energetica, per un totale complessivo sui 40 ettari aziendali di **15.300 €/anno** sui soli costi di irrigazione dei 40 ettari di terreni aziendali. A questo beneficio diretto si aggiunge l'effetto positivo sulla produzione agricola: una gestione irrigua a dosaggio variabile basata sul reale stato idrico del suolo consente di ridurre lo stress idrico del mais e incrementarne, di conseguenza, la produttività. Assumendo un valore incrementale del 10%, sulla base dei dati sperimentali ricavati dalle piantagioni di kiwi [73], e considerando il valore medio della produzione di mais che per la nostra azienda si aggira intorno a 3.500 €/ha, il maggior valore della produzione risulta pari a 350 €/ha all'anno. Sul totale di 40 ettari, questo significa una crescita dei ricavi pari a circa **14.000 €/anno**, con un tasso di crescita stimato del 2% annuo, rappresentante l'inflazione attesa di medio-lungo periodo.

Nel complesso, sommando il risparmio sui costi irrigui e l'aumento produttivo di mais, l'adozione del sistema pivot-Wappfruit originerebbe un flusso di cassa positivo stimato di circa **29.300 € all'anno** sul bilancio della nostra azienda agricola.

D'altra parte, l'investimento sottintende degli oneri iniziali non indifferenti: il pivot ha un prezzo generalmente elevato, ma varia a seconda della dimensione dell'appezzamento, con una tendenza decrescente al crescere dell'estensione di quest'ultimo. Tenendo conto della suddivisione dei terreni destinati a mais, in 4 lotti da circa 10 ettari ciascuno in media, il preventivo per la realizzazione dei nuovi impianti pivot nella nostra cascina ammonta complessivamente a **180.000 euro**, con la possibilità di sottoscrivere un'estensione di garanzia che comprenda i costi di manutenzione ordinaria e straordinaria per tutta la vita utile del pivot pari a 15 anni al costo forfettario di **35.000 euro** da pagare in anticipo. Il valore residuo del pivot al termine dei 15 anni è stato stimato pari al 10% del costo storico dell'impianto, dunque **18.000 euro**, in linea con le perizie agrarie e le valutazioni dei macchinari agricoli.

Oltre a ciò, bisogna considerare il costo dell'insieme degli strumenti di gestione dell'irrigazione che propone Wappfruit, fra sensori per il monitoraggio delle condizioni del suolo e dell'ambiente, centraline di acquisizione ed elaborazione dei dati e attuatori in grado

di gestire in modo automatico l'irrigazione. Allo stato attuale, però, i dispositivi Wappfruit non sono ancora presenti sul mercato e non esiste pertanto un listino ufficiale dei prezzi, né tantomeno dei costi di manutenzione di questo impianto. L'obiettivo della presente tesi è quindi quello di stimare un prezzo congruo dell'intero sistema comprensivo anche della quota di un'estensione di garanzia che copra i costi del servizio di assistenza per tutta la durata dei 15 anni senza ulteriori esborsi, valutando quanto un'azienda come la nostra sarebbe disposta a spendere per l'acquisto del sistema di irrigazione, sulla base del punto di pareggio fra i costi e i benefici generati dall'investimento.

Dunque, anche per codesto investimento la valutazione economico-finanziaria è stata condotta attraverso l'analisi dei flussi di cassa attesi lungo l'intera vita utile dell'impianto, assunta pari a **15 anni**. Essendo composto prevalentemente da sistemi elettronici (centraline, sensori, moduli di comunicazione, software, componentistica digitale), l'impianto Wappfruit è soggetto ad un'obsolescenza tecnica generalmente più rapida rispetto alla struttura meccanica del pivot con evidenti difficoltà di rivendita sul mercato dell'usato e un valore di recupero materiale trascurabile; pertanto, è stato assunto un **valore residuo pari a zero** al termine della vita utile considerata.

In virtù di tali flussi, è stata determinata la **Willingness to Pay (WTP)** [108], ovvero il prezzo massimo al quale la nostra azienda sarebbe disposta ad acquistare il bene oggetto di investimento, individuato come il valore che rende nullo l'NPV. Il calcolo dell'NPV è stato effettuato adottando gli stessi tassi di sconto utilizzati nelle analisi precedenti, considerati all'interno di un intervallo compreso tra un lower bound del 6% e un upper bound dell'8%, al fine di tenere conto dell'inflazione, dell'incertezza associata al costo del capitale e al profilo di rischio dell'investimento.

A ben vedere, nel presente lavoro si è optato per valutare la profittabilità di questo investimento senza tenere in considerazione gli incentivi fiscali riconducibili al **piano "Agricoltura 4.0"**, pur essendo questa spesa potenzialmente ammissibile alle relative agevolazioni. Tale scelta metodologica risponde a due principali fattori:

- In primo luogo, l'analisi è finalizzata a vagliare la convenienza economica intrinseca dell'installazione di questo innovativo sistema di irrigazione in qualsiasi azienda agricola, indipendentemente da misure di sostegno pubblico che non risultano uniformemente accessibili a tutte le imprese. Infatti, solo una parte di esse ha la possibilità di beneficiare realmente del credito d'imposta previsto dalla normativa

vigente: nel caso di aziende agricole operanti in regime forfettario IVA, ad esempio, non detraendo l'imposta sugli acquisti, esse presentano una struttura fiscale che può limitare l'effettivo godimento dell'agevolazione. Altresì, se si tratta di cascine a conduzione familiare, prive di dipendenti, si riduce ulteriormente la possibilità di compensazione in F24, potendo detrarre soltanto più i propri contributi previdenziali, spesso non sufficienti ad assorbire integralmente il credito maturato. Ne deriva che l'agevolazione fiscale, seppur formalmente prevista per i beni in questione, potrebbe non tradursi in un vantaggio economico pienamente fruibile per una parte significativa del potenziale bacino di utenza.

- In secondo luogo, gli incentivi fiscali in genere e nello specifico anche per l'Agricoltura 4.0 sono solitamente proposti per via di policy caratterizzate da orizzonti temporali di breve periodo e soggette eventualmente a proroghe definite annualmente dal legislatore a seconda della disponibilità di fondi, senza alcuna garanzia di continuità strutturale nel medio-lungo termine. In sostanza, basare la determinazione del prezzo di lancio sul mercato dell'impianto di irrigazione o la valutazione della sua redditività su misure di sostegno potenzialmente non più vigenti negli anni a venire introdurrebbe un elemento fallace in un'analisi economica di lungo periodo.

Alla luce di tali considerazioni, si è preferito condurre lo studio dell'investimento indipendentemente dalla presenza di incentivi pubblici, allo scopo di esaminarne la sostenibilità economico-finanziaria in condizioni ordinarie di mercato e garantire maggiore robustezza e scalabilità ai risultati dell'analisi.

La formula utilizzata per il calcolo del prezzo massimo è la seguente:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^T} = 0$$

Dove:

- I_0 = prezzo dell'investimento complessivo (pivot + Wappfruit)
- t = intervallo di tempo
- T = durata (vita utile del sistema)
- CF_t = flusso di cassa al tempo t
- r = tasso di sconto %
- VR = valore residuo del pivot al termine della vita utile

Anni	CF	CF attualizzato (6%)	CF attualizzato e cumulato (6%)	CF attualizzato (8%)	CF attualizzato e cumulato (8%)
0	$-I_0$	$-I_0$	$-I_0$	$-I_0$	$-I_0$
1	+29.300 €	+27.642 €	+27.642 €	+27.129 €	+27.129 €
2	+30.345 €	+27.007 €	+54.649 €	+26.016 €	+53.145 €
3	+31.434 €	+26.393€	+81.042 €	+24.953 €	+78.098 €
4	+32.569 €	+25.798 €	+106.840 €	+23.939 €	+102.037 €
5	+33.751 €	+25.221 €	+132.061 €	+22.970 €	+125.007 €
6	+34.984 €	+24.662 €	+156.723 €	+22.046 €	+147.053 €
7	+36.270 €	+24.122 €	+180.845 €	+21.163 €	+168.216 €
8	+37.610 €	+23.597 €	+204.442 €	+20.320 €	+188.536 €
9	+39.008 €	+23.089 €	+227.531 €	+19.514 €	+208.050 €
10	+40.467 €	+22.597 €	+250.128 €	+18.744 €	+226.794 €
11	+41.988 €	+22.119 €	+272.247 €	+18.008 €	+244.802 €
12	+43.575 €	+21.655 €	+293.902 €	+17.304 €	+262.106 €
13	+45.232 €	+21.207 €	+315.109 €	+16.632 €	+278.738 €
14	+46.961 €	+20.771 €	+335.880 €	+15.988 €	+294.726 €
15	+66.766 €	+27.859 €	+363.739 €	+21.047 €	+315.773 €

Tabella 11: Cash flow attualizzato dell'investimento nel nuovo impianto di irrigazione

Da questi dati si evince che l'azienda agricola della mia famiglia sarebbe disposta ad investire in questo sistema di irrigazione se il costo complessivo dell'operazione I_0 fosse inferiore o uguale a 363.739 euro nell'ipotesi di approccio ottimistico, mentre se si segue un orientamento più cautelativo la cifra scende a 315.773 euro. Detraendo da questi valori il costo del pivot e dell'estensione di garanzia associata pari a 215.000 euro in totale, si può facilmente determinare la quota relativa al sistema Wappfruit, comprensiva anch'essa dell'estensione di garanzia col pacchetto manutenzioni per tutta la durata dei 15 anni.

Perciò, in presenza di eterogeneità nei tassi di sconto, la stima della WTP per quanto concerne l'inserimento del complesso di automazione dell'irrigazione offerto da Wappfruit ad un'azienda agricola di 40 ettari, strutturata similmente alla nostra in termini di suddivisione degli appezzamenti e costi operativi, è quantificabile in un intervallo tra **100.773 €** e **148.739 €**. Questo divario riflette le diverse attitudini al rischio delle imprese potenzialmente acquirenti e rappresenta la loro massima disponibilità a pagare, ossia il prezzo che rende l'investimento economicamente indifferente: in corrispondenza di tale importo, infatti, **il valore attuale dei benefici attesi eguaglia esattamente il valore attuale dei costi sostenuti**. In questa situazione l'operazione non genera né distruzione né creazione di valore, poiché la redditività dell'investimento coincide con il tasso di attualizzazione adottato (costo opportunità del capitale).

In un'ottica di massimizzazione della diffusione della tecnologia, risulta strategicamente opportuno per Wappfruit assumere come prezzo di riferimento il limite inferiore dell'intervallo pari a circa 100.000 €, al fine di garantire un NPV non negativo anche per le imprese meno propense al rischio legato all'investimento, ampliando così la platea dei potenziali clienti e favorendo la penetrazione del mercato. Un prezzo superiore, pur incrementando la marginalità unitaria, comporterebbe di fatto l'esclusione a priori di un certo numero di imprese, con conseguente calo della domanda e rallentamento della velocità di adozione dell'innovazione. Per questa ragione, se Wappfruit fissasse il prezzo a 100.000 €, la sua offerta sarebbe appetibile per tutte le tipologie di aziende ma così facendo rinunciarebbe a parte del surplus dei clienti più "ricchi" o meno avversi al rischio, mentre se scegliesse l'apice di circa 149.000 € perderebbe tutti i clienti più prudenti. Questo ragionamento si collega, infatti, direttamente alla **teoria del surplus del consumatore**, secondo cui il surplus è dato dalla differenza tra la disponibilità massima a pagare e il prezzo effettivamente corrisposto.

A tal proposito, un'opzione alternativa più intelligente potrebbe essere quella di valutare **strategie di discriminazione di prezzo**, al fine di intercettare i diversi livelli di WTP sulla base della segmentazione della clientela in virtù della dimensione aziendale, dell'intensità produttiva nonché della struttura finanziaria e proporre un prezzo diverso per ogni categoria di aziende oppure si potrebbe pensare ad una **differenziazione dell'offerta** per mezzo della combinazione di un prezzo base accessibile ad una moltitudine di aziende con la possibilità di avere servizi o funzionalità aggiuntive come optional.

Tale valore evidenzia come l'innovazione tecnologica applicata alla gestione dell'acqua non rappresenti solo un vantaggio ambientale, ma anche uno strumento efficace di miglioramento della redditività aziendale, con potenziali effetti positivi sul tempo di rientro dell'investimento e sulla resilienza dell'azienda in un contesto di crescente scarsità idrica.

Conclusioni e prospettive

L'analisi condotta nel presente elaborato ha permesso di verificare come il paradigma di Industria 4.0 e la sua declinazione nel settore primario attraverso l'Agricoltura 4.0 non rappresenti un semplice progresso tecnologico, bensì una trasformazione sistemica dei modelli produttivi e gestionali: la digitalizzazione dei processi agricoli si configura come una leva strategica in grado di incidere contemporaneamente su efficienza tecnica, sostenibilità ambientale e solidità economico-finanziaria.

Dall'esame del quadro normativo nazionale ed europeo, in particolare dei programmi di incentivazione quali il Piano Nazionale per l'Industria 4.0 e il successivo Piano Transizione 4.0, emerge con chiarezza come il ruolo delle politiche pubbliche sia stato determinante nel ridurre le barriere all'investimento iniziale. Le agevolazioni fiscali, come il credito d'imposta e la Nuova Sabatini analizzati nel caso di studio, hanno agito da moltiplicatori finanziari, incidendo in modo significativo sugli indicatori di redditività dei progetti analizzati.

Tuttavia, l'esempio della Cascina Sant'Anna, che ha consentito di tradurre il quadro teorico in un'analisi empirica sugli investimenti riguardanti un trattore a guida assistita e un robot di mungitura, ha evidenziato come i miglioramenti tangibili in termini di produttività del lavoro, riduzione dei costi operativi e ottimizzazione della gestione aziendale, che si sono registrati in seguito all'introduzione dei beni acquistati, sono ampiamente sufficienti a giustificare, sotto il profilo economico-finanziario, la scelta di puntare sull'adozione di soluzioni riconducibili al paradigma dell'Agricoltura 4.0. Gli indicatori NPV, IRR e DPP, hanno mostrato come la redditività intrinseca dei beni strumentali oggetto di analisi sia ampiamente positiva, a prescindere dalla presenza degli incentivi pubblici, anche se questi ultimi indubbiamente accelerano il recupero del capitale investito, addirittura sino al suo sostanziale azzeramento in questo caso, e incrementano la profittabilità dell'operazione, ma non si configurano come condizione necessaria per la convenienza economica dell'investimento.

È opportuno precisare i limiti della stima dei benefici operativi considerati nel caso di studio, dal momento che essi non sono esclusivamente riconducibili al singolo bene oggetto di investimento, bensì risultano in parte condizionati dalla presenza di asset complementari e da specifiche caratteristiche organizzative dell'azienda: ad esempio l'efficacia del trattore a guida assistita e del robot di mungitura è strettamente connessa all'esistenza di una struttura

aziendale già adeguatamente meccanizzata, da infrastrutture compatibili e da una base organizzativa in grado di integrare efficacemente le nuove tecnologie nei processi produttivi. Analogamente, il capitale umano ricopre un ruolo fondamentale: la capacità di utilizzare correttamente i sistemi digitali, di interpretare i dati generati e di riorganizzare i flussi operativi incide in maniera significativa sull'effettivo conseguimento dei vantaggi attesi. In tal senso, parte dei risultati ottenuti è riconducibile non soltanto alla tecnologia in sé, ma anche al contributo del sottoscritto in merito alle competenze gestionali e alla propensione all'innovazione.

Inoltre, non può essere ignorata l'influenza del contesto macroeconomico: variabili quali l'andamento del prezzo del latte e dei cereali, il costo dei vettori energetici e della manodopera incidono direttamente sulla profittabilità complessiva dell'investimento. Sebbene si sia tenuto conto di tali elementi nella valutazione finanziaria attraverso l'utilizzo del tasso di sconto, una parte dell'incertezza rimane strutturalmente non eliminabile.

Ne consegue che i benefici operativi stimati devono essere interpretati come risultati contestualizzati, validi all'interno dello specifico assetto aziendale analizzato, e non automaticamente generalizzabili a tutte le realtà agricole.

In sostanza, se ci si attiene esclusivamente ai dati quantitativi emersi dall'analisi, si potrebbe sostenere che le policy governative di incentivazione all'Agricoltura 4.0 siano state essenzialmente fallimentari a livello statale, in quanto non hanno indotto comportamenti d'investimento radicalmente aggiuntivi rispetto a quelli che sarebbero stati adottati nelle condizioni di mercato ordinarie, limitandosi piuttosto a sostituire, in parte, capitale privato con risorse pubbliche a sostegno di scelte già economicamente razionali.

Malgrado ciò, l'esperienza personale del sottoscritto suggerisce come gli incentivi fiscali svolgano una funzione di trigger psicologico nella decisione d'investimento, rafforzando la percezione di convenienza e riducendo l'avversione ad investire ulteriormente in un settore caratterizzato da margini estremamente contenuti e da un'elevata incertezza legata al futuro, siccome in seguito allo sviluppo della globalizzazione le piccole realtà italiane si sono trovate a dover competere con le materie prime provenienti dall'estero, ove in virtù delle grandi estensioni a disposizione vi è possibilità di fare economia di scala e vendere i propri prodotti a prezzi inferiori rispetto a quelli italiani.

Perciò, il problema centrale non risiede tanto nella redditività degli investimenti in Agricoltura 4.0 che, come dimostrato, risulta nettamente positiva, quanto nella scarsa remunerazione dell'attività primaria nel suo complesso, che alimenta una diffusa cautela fra

gli imprenditori e li induce a rinviare o ridimensionare ogni progetto di sviluppo, temendo per la continuità stessa dell'attività nel medio-lungo periodo.

Tale contesto si riflette anche nelle dinamiche generazionali: al giorno d'oggi solo una quota limitata di giovani sceglie di proseguire l'attività familiare, mentre la maggioranza orienta il proprio percorso formativo e professionale verso altri settori, percepiti come più stabili e remunerativi. A ciò si aggiunge la particolare intensità dell'impegno richiesto dall'attività agricola, che, seppur alleggerita rispetto al passato grazie alla meccanizzazione e alla digitalizzazione, continua a richiedere una presenza costante e una disponibilità continuativa, sette giorni su sette, senza festività né giorni di riposo, salvo nelle realtà di dimensioni tali da consentire una strutturazione organizzativa più articolata, con l'assunzione di dipendenti che siano in grado di sostituire temporaneamente il titolare.

In questa prospettiva, è ragionevole ipotizzare che, in assenza di incentivi fiscali, una parte significativa delle scelte di investimento verrebbe verosimilmente rinviata o abbandonata, con il rischio di innescare un progressivo indebolimento strutturale del settore agricolo. Le politiche di sostegno pubblico vanno quindi rivalutate in un'ottica che si spinge oltre la mera dimensione finanziaria: esse contribuiscono a preservare la capacità competitiva complessiva del comparto, scongiurando dinamiche di stagnazione che nel lungo periodo potrebbero comprometterne la sostenibilità economica, e rendono l'agricoltura maggiormente attrattiva per le nuove generazioni. Al contempo, tuttavia, il finanziamento dell'innovazione digitale può configurarsi come un'arma a doppio taglio: da un lato incentiva il ricambio generazionale ma dall'altro richiede la presenza di competenze più avanzate; perciò, rischia di accentuare il divario tra imprese guidate da giovani imprenditori digitalmente abili e quelle condotte da agricoltori più anziani, meno avvezzi all'utilizzo delle tecnologie moderne.

Ne deriva che la trasformazione digitale del settore primario deve essere accompagnata da adeguate politiche formative, strumenti di assistenza tecnica e percorsi di aggiornamento professionale, affinché l'innovazione si traduca in un reale rafforzamento strutturale dell'agricoltura italiana. La modernizzazione tecnologica deve essere intesa come leva di competitività sistemica, idonea a consolidare il posizionamento delle imprese agricole nazionali in un contesto di mercato sempre più competitivo: una transizione digitale inclusiva e consapevole potrebbe garantire al comparto primario la capacità di confrontarsi efficacemente con la concorrenza internazionale, preservandone al contempo sostenibilità economica e identità produttiva.

Bibliografia

- Abie, H., Ferrario, D., Troiano, E., Soldatos, J., Di Peppo, F., Jovanović, A., Gkotsis, I., & Markakis, E. (2021). *Consolidated Proceedings of the first ECSCI Workshop on Critical Infrastructure Protection, Virtual Workshop, June 24–25, 2020*. Steinbeis-Edition.
- Azrou, M., Mabrouki, J., & Ahmad, S. (A c. Di). (2025). *IoT and advanced intelligence computation for smart agriculture* (First edition). Taylor and Francis.
- Azzimonti, O., & Caiello, S. (2025). *Azioni concrete, impronte leggere: Educare alla transizione. Le scuole e i territori per una transizione ambientale equa e giusta*. Ledizioni.
- Becattini, G. (2015). *La coscienza dei luoghi: Il territorio come soggetto corale*. Donzelli editore.
- Casa, R. (2016). *Agricoltura di precisione: Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi culturali*. Edagricole.
- Elbana, M. (2025). *Irrigation Management: Strategies, Sustainability and Agricultural Advancements* (1st ed). Nova Science Publishers, Incorporated.
- Fabbrini, F. (2022). *Next generation EU: il futuro di Europa e Italia dopo la pandemia*. Il mulino.
- Fao (A c. Di). (2022). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2021 - systems at breaking point: Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ferraris, G. (1882). *Sulle Applicazioni industriali della corrente elettrica alla Mostra internazionale di elettricità, tenuta in Parigi nel 1881: Relazione di Galileo Ferraris*. Tipogr. Eredi Botta.
- Giusti, F. (1996). *La nascita dell'agricoltura: Aree, tipologie e modelli* (Vol. 2). Donzelli Editore.
- Grigg, D. B. (2000). *Rivoluzioni agricole*. Istituto della Enciclopedia Italiana.
- Guatri, G., & Villani, M. (2015). *Le valutazioni per il Patent Box*. EGEA spa.
- Iammarino, S., Jona-Lasinio, C., & Mantegazza, S. (2001). Sviluppo e diffusione dell'ICT: l'Italia negli anni Novanta. *Studi e note di economia*, 2, 13–44.
- Lipper, L., McCarthy, N., Zilberman, D., Asfaw, S., & Branca, G. (2017). *Climate smart agriculture: Building resilience to climate change*. Springer Nature.
- Monteiro, J. E. B. D. A. (2009). *Agrometeorologia Dos Cultivos: O Fator Meteorológico Na Produção Agrícola*. Instituto Nacional De Meteorologia - Inmet.
- Mukhtar, S., Bhat, J. A., Chesti, M. H., Ganie, M. A., Renuka, Mansoor, T., & Dolker, T. (2025). AI and Smart Technologies for Smart Agriculture Environment. In D. A. Jadhav, S. Khaple, P. S. Wable, & A. D. Chendake (A c. Di), *Integrated Land and Water Resource Management for Sustainable Agriculture Volume 2* (Vol. 5, pp. 67–87). Springer Nature Singapore.
- National Reserch Council, & et al. (2014). *3D Printing in Space*. National Academies Press.
- Petras, J., & Veltmeyer, H. (2002). *La globalizzazione smascherata. L'imperialismo nel XXI secolo* (Vol. 594). Editoriale Jaca Book.

- Piras, F. (2024). *RICAMBIO GENERAZIONALE IN AGRICOLTURA: Gli strumenti a sostegno dei giovani in italia e in... sardegna*. ADMIT HUB REF SERVICE PR.
- Priori, S., De Benedetto, D., Stellacci, A. M., Losciale, P., & Manfrini, L. (2016). Sensori e metodi per rilievi prossimali delle proprietà del suolo e della coltura. In *AGRICOLTURA DI PRECISIONE-Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali* (pp. 129–153). Il Sole 24 Ore Edagricole srl.
- Russo, A. (2023). Strategie e governo dell'impresa. Scritti in onore di Pietro Genco. In *Sostenibilità e Supply Chain Management: Driver di Conoscenza e Impatto sulla Performance* (pp. 193–204). G. Giappichelli Editore srl.
- Sabry, F. (2021). *Robotica Agricola: In che modo i robot vengono in soccorso del nostro cibo?* (Vol. 1). One Billion Knowledgeable.
- Schwab, K. (2016). *La quarta rivoluzione industriale*. FrancoAngeli.
- Venier, F. (2017). *Trasformazione digitale e capacità organizzativa. Le aziende italiane e la sfida del cambiamento*. EUT Edizioni Università di Trieste.
- Vicentini, F. (2017). *La Robotica Collaborativa; Sicurezza E Flessibilità Delle Nuove Forme Di Collaborazione Uomo-Robot*. Tecniche nuove.
- Zinsstag, J., Schelling, E., Crump, L., Whittaker, M., Tanner, M., & Stephen, C. (2021). *One Health: The theory and practice of integrated health approaches*. Cabi.

Sitografia

- [1] Industry 4.0: Welfare literacy to face the challenges of rural community - Scientific Figure on ResearchGate. Available from:
https://www.researchgate.net/figure/Revolution-of-industry-40_fig1_337711815
- [2] Sreedharan V, R., P, A., Persis, J., & KM, S. (2019). Industry 4.0: key findings and analysis from the literature arena. *Benchmarking: An International Journal*, 26(8), 2514-2542. Available from:
https://www.researchgate.net/profile/Drarunprasad-P/publication/334764928_Industry_40_key_findings_and_analysis_from_the_literature_arena/links/5e871a7ca6fdcca789ed4286/Industry-40-key-findings-and-analysis-from-the-literature-arena.pdf
- [3] Figure available from:
<https://elteterni.it/industria-4-0-il-futuro-della-manifattura-tra-nuove-sfice-ed-opportunita/>
- [4] Thoben, K. D., Wiesner, S., & Wuest, T. (2017). “Industrie 4.0” and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. *International journal of automation technology*, 11(1), 4-16. Available from:
<https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>
- [5] Kaur, H., & Bhatia, M. (2024). Scientometric Analysis Of Digital Twin in Industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/384025288_Scientometric_Analysis_Of_Digital_Twin_in_Industry_40
- [6] Wced, U. (1987). Our common future—The Brundtland report. *Report of the World Commission on Environment and Development*, 11. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/312448629_Report_of_the_world_commission_on_environment_and_development_our_common_future_the_Brundtland_Report
- [7] Tronci, M., Mercadante, L., & Ricciardi, P. (2018). Industria 4.0: rischi e opportunità per la tutela e la sicurezza dei lavoratori. *INAIL (2018), Sfide e cambiamenti per la salute e la sicurezza sul lavoro nell'era digitale*. Available from:
https://www.inail.it/cs/internet/docs/pubb-sfide-cambiamenti-salutesicurezza-lavoro-era-digitale-all_6443124890004.pdf (09/12/2019).
- [8] Vivarelli, M., Piga, C., & Piva, M. (2004). Il triangolo competitivo: innovazione, organizzazione e lavoro qualificato. *L'industria*, 25(4), 655-674. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/253383674_Il_triangolo_competitivo_innovazione_organizzazione_e_lavoro_qualificato
- [9] Tiraboschi, M., & Seghezzi, F. (2016). Il Piano nazionale Industria 4.0: una lettura lavoristica. *Labour & Law Issues*, 2(2, I.), 1-41. Available from:

https://www.researchgate.net/publication/311921810_Il_Piano_nazionale_Industria_40_una_lettura_lavoristica

[10] Figure available from:

<https://farelettronica.it/web/app/uploads/2024/09/pilastri-industria-4-0.jpg>

[11] Tsai, C. W., Lai, C. F., Chao, H. C., & Vasilakos, A. V. (2015). Big data analytics: a survey. *Journal of Big data*, 2, 1-32. Available from:

https://www.researchgate.net/publication/282425320_Big_data_analytics_A_survey

[12] Figure available from:

<https://www.fostec.com/en/competences/big-data/>

[13] Aaqib, M. & Khan, M. & Chandra, D. (2025). Big Data Analytics. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 13. 2111-2116. 10.22214/ijraset.2025.67766. Available from:

https://www.researchgate.net/publication/390336980_Big_Data_Analytics

[14] Mattern, F., & Floerkemeier, C. (2010). From the Internet of Computers to the Internet of Things. *From active data management to event-based systems and more: Papers in honor of Alejandro Buchmann on the occasion of his 60th birthday*, 242-259. Available from:

[https://www.researchgate.net/profile/Dimka-](https://www.researchgate.net/profile/Dimka-Karastoyanova/publication/221350101_On_Scientific_Experiments_and_Flexible_Service_Compositions/links/02e7e5281f20b047e2000000/On-Scientific-Experiments-and-Flexible-Service-Compositions.pdf#page=258)

[Karastoyanova/publication/221350101_On_Scientific_Experiments_and_Flexible_Service_Compositions/links/02e7e5281f20b047e2000000/On-Scientific-Experiments-and-Flexible-Service-Compositions.pdf#page=258](https://www.researchgate.net/profile/Dimka-Karastoyanova/publication/221350101_On_Scientific_Experiments_and_Flexible_Service_Compositions/links/02e7e5281f20b047e2000000/On-Scientific-Experiments-and-Flexible-Service-Compositions.pdf#page=258)

[15] Moro Visconti, R. (2016). Internet delle cose, Networks e plusvalore della connettività. *Il Diritto industriale*, (6), 536-544. Available from:

<https://hdl.handle.net/10807/91857>

[16] Civallero, S. (2021). *Studio prototipale e simulazione multibody di un dispositivo indossabile IoT per il monitoraggio in ambiente di lavoro= Modeling and prototyping of an IoT wearable device for the safety and monitoring in the workspace* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino). Available from:

<https://webthesis.biblio.polito.it/secure/20207/1/tesi.pdf>

[17] Figure available from:

<https://vitolavecchia.altervista.org/caratteristiche-sicurezza-e-architettura-dei-dispositivi-iot/>

[18] Figure available from:

<https://quifinanza.it/innovazione/ai-come-impiegarla-e-implementarla-nellindustria-manfatturiera/689643/>

[19] Figure available from:

https://www.corriere.it/economia/16_giugno_19/barilla-ecco-pasta-misura-pronta-2-minuti-stampante-3d-1a177172-3609-11e6-88d7-7a12a568ff47.shtml

- [20] Menduni, E., De Pascalis, I., Massidda, L., Neri, A., Battisti, F., Carli, M., ... & Brembilla, P. (2014). Future Internet: scenari di convergenza, fattori abilitanti e nuovi servizi. Available from:
<https://hdl.handle.net/11585/305539>
- [21] Mell, P., Grance, T. (2011). The NIST definition of cloud computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Available from:
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf>
- [22] Abildinova, G., Sembayev, T., Abykenova, D., Alzhanov, A. (2025). An overview of research on augmented reality in education. *Bilim scientific and pedagogical journal*. 112. 10-19. 10.59941/2960-0642-2025-1-10-19. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/390686339_An_overview_of_research_on_augmented_reality_in_education
- [23] Arduini, G. (2012). La realtà aumentata e nuove prospettive educative. *Education sciences & society*, 3(2). Available from:
https://scholar.archive.org/work/tk22qxop75amdpsildt6bjzomu/access/wayback/https://riviste.unimc.it/index.php/es_s/article/viewFile/532/371
- [24] Figure available from:
<https://airlapp.com/blog/realta-aumentata-ar/>
- [25] Caso, M. (2018). La Realtà Virtuale per la Comunicazione Dell'architettura: Literature Review. *Retrieved March, 3, 2023*. Available from:
https://www.researchgate.net/profile/Marco-Caso/publication/341767335_La_realta_virtuale_per_la_comunicazione_dell'architettura_Literature_review/links/5ed2c8e392851c9c5e6c100b/La-realta-virtuale-per-la-comunicazione-dellarchitettura-Literature-review.pdf
- [26] Figure available from:
<https://www.paroledimagement.it/realta-virtuale-e-realta-aumentata-per-il-business/>
- [27] Istat (2018). *Rapporto sulla competitività dei settori produttivi*. Capitolo 3. Innovazione, nuove tecnologie e occupazione. Available from:
<https://www.istat.it/storage/settori-produttivi/2018/Rapporto-competitivita-2018.pdf>
- [28] Brunetti, I., & Ricci, A. (2021). Imprese, lavoro e politiche pubbliche: analisi ed evidenze empiriche. Available from:
https://iris.uniroma3.it/retrieve/handle/11590/407961/290264/INAPP_Ricci_Imprese_lavoro_e_politiche_pubbliche_analisi_ed_evidenze_empiriche_IR_21_2021.pdf
- [29] Cefis, E., Scrofani, S., & Tubiana, M. (2025). Innovation policies and firms' productivity: the Italian Industry 4.0 Plan for digital transformation. *The Journal of Technology Transfer*, 1-33. Available from:
<https://doi.org/10.1007/s10961-024-10179-2>

- [30] Figure available from:
<https://www.madeinitaly.it/2018/01/08/piano-nazionale-impresa-4-0/>
- [31] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2017/12/29/17G00222/s>
- [32] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/06/21/13G00116/sg>
- [33] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2024/12/31/24G00229/sg>
- [34] Calenda, C. (2017). Piano Nazionale Industria 4.0. *Ministero Dello Sviluppo Economico: Roma, Italy*. Available from:
https://bcee.it/wp-content/uploads/2022/12/industria_40_MISE.pdf
- [35] Cirillo, V., Fanti, L., & Tubiana, M. (2021). Tecnologie I4. 0 e profili di innovazione delle imprese italiane. *Economia & lavoro*, 55(1), 99-120. Document available from:
<https://iris.polito.it/handle/11583/2981959>
- [36] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2019/12/30/19G00165/s>
- [37] Figure available from:
<https://www.warranhub.it/newsletter/credito-dimposta-beni-strumentali-elevato-consegne-entro-novembre-2023/>
- [38] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/12/29/22G00211/sg>
- [39] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/12/30/23G00223/SG>
- [40] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2024/12/31/24G00229/sg>
- [41] Document available from:
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2024-08-06&atto.codiceRedazionale=24A04160&elenco30giorni=false
- [42] Figure available from:
<https://www.gfinance.it/il-nuovo-piano-transizione-5-0/>
- [43] Figure available from:
<http://www.rivisondoliantica.it/la%20voce%20di%20rivisondoli/1%27ara.htm>
- [44] Document available from:
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2025/12/30/25G00212/SG>
- [45] Figure available from:
<https://www.collinedoro.net/foto-video/foto-storiche-spolto-re-galleria-memorie>

- [46] Document available from:
<https://barsantiematteucci.it/documenti-e-brevetti/>
- [47] De Filippis, F., & Romano, D. (2010). Crisi economica e agricoltura. Available from:
<https://flore.unifi.it/bitstream/2158/395323/1/Crisi%20economica%20e%20agricoltura.pdf>
- [48] Figure available from:
<https://publichealth.arizona.edu/news/2023/38m-nih-grant-fund-southwest-center-resilience-climate-change-and-health>
- [49] Document available from:
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tag00093/default/table?lang=en&category=t_agr.t_apro.t_apro_cp
- [50] Rondelli, V., Sartori, L., & Catania, P. (2024). La digitalizzazione e le macchine intelligenti in agricoltura e zootecnia: il contributo della ricerca alla bioeconomia. *Le scienze agrarie nella bioeconomia*, 105. Available from:
https://aissa.it/_docs/240212_Quaderni_AISSA_volume5.pdf#page=109
- [51] Figure available from:
<https://www.esg360.it/agrifood/osservatorio-smart-agrifood-2025-meno-macchine-piu-intelligenza/>
- [52] Berto, L. (2024). Digital transformation e lavori ibridi. Available from:
https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/68889/1/Berto_Lorenzo_2032083_ProvaFinale.pdf
- [53] Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1), 313-335. Available from:
<https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- [54] Blackmore, S. (1994). Precision farming: an introduction. *Outlook on agriculture*, 23(4), 275-280. Available from:
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/003072709402300407>
- [55] Chhachhar, A. R., Qureshi, B., Khushk, G. M., & Ahmed, S. (2014). Impact of information and communication technologies in agriculture development. *Journal of Basic and Applied scientific research*, 4(1), 281-288. Available from:
https://www.researchgate.net/profile/Barkatullah-Qureshi/publication/260700892_Impact_of_Information_and_Communication_Technologies_in_Agriculture_Development/links/0deec532052b88680f000000/Impact-of-Information-and-Communication-Technologies-in-Agriculture-Development.pdf
- [56] Tassoni, F. (2019). Determinazione Di Zone Omogenee Per Applicazioni Di Agricoltura Di Precisione Su Frumento Duro (*Triticum turgidum* subsp. *durum* Desf.). Available from:

- <https://tesi.univpm.it/handle/20.500.12075/4629>
- [57] Figure available from:
<https://www.deere.ch/de/prazisions-landwirtschaft/automatisierungssysteme/autopath/>
- [58] Gatto, S. (2013). Applicazione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione nella coltivazione del Mais in una azienda cerealicola-zootecnica. Available from:
https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/15940/1/Gatto_Simone.pdf
- [59] Figure available from:
<https://www.deere.it/it/agricoltura-di-precisione/elementi-essenziali/gen-4-integrated-displays/>
- [60] Rondelli, V., Sartori, L., & Catania, P. (2024). La digitalizzazione e le macchine intelligenti in agricoltura e zootecnia: il contributo della ricerca alla bioeconomia. *Le scienze agrarie nella bioeconomia*, 105. Available from:
https://aissa.it/_docs/240212_Quaderni_AISSA_volume5.pdf#page=109
- [61] Mosca, G., Alpi, A., & Piovan, D. (2021). Agricoltura di precisione applicata ai cereali: la mappatura dei terreni. *Georgofili: atti dell'Accademia dei Georgofili: Serie VIII, Vol. 17, supplemento, 2020*, 38-41. Available from:
<https://www.torrossa.com/en/resources/an/5009280>
- [62] Figure available from:
<https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-innovazioni-prodotti-aziende/corteva-agriscienze-dal-campo-alla-tavola-a-sostegno-del-made-in-italy/>
- [63] PAPI, S. (2018). Agricoltura di precisione. Sensori applicati alle operazioni meccanizzate. Available from:
<https://tesi.univpm.it/retrieve/c06caac5-164b-4b51-aa94-0941f642ecab/Agricoltura%20di%20precisione.%20Sensori%20applicati%20alle%20operazioni%20meccanizzate.pdf>
- [64] Figure available from: <https://www.claasagricoltura.com/notizie/comunicati-stampa/claas-italia-e-xfarm-sono-lieti-di-annunciare-una-nuova-partnership-per-la-formazione-in-agricoltura-di-precisione-sul-territorio-nazionale-/2558008>
- [65] Figure available from:
<https://www.omnitrattore.it/reviews/516801/climate-fieldview-precision-farming/>
- [66] Comparetti, A. (1998). Fondamenti dell'agricoltura di precisione. *INFORMATORE AGRARIO*, 54, 29-38. Available from:
https://iris.unipa.it/retrieve/handle/10447/56061/44287/1998_IA_FondamentiAgricolturaPrecisione.pdf
- [67] Figure available from:
<https://contoterzista.edagricole.it/tecnica/spandiconcime-nel-nome-del-rateo-variabile/>

- [68] Ghironi, F. (2025). Effetti della crisi climatica nel Sahel; il caso della grande muraglia verde. Available from:
<https://unire.unige.it/handle/123456789/11293>
- [69] Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., ... & Torquebiau, E. F. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature climate change*, 4(12), 1068-1072. Available from:
<https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- [70] Kumar, A., Ranjan, P., & Saini, V. (2022). Smart irrigation system using IoT. In *Agri-Food 4.0: Innovations, Challenges and Strategies* (pp. 123-139). Emerald Publishing Limited. Available from:
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/S1877-636120220000027009/full/html>
- [71] Gisolo, D., N'sassila, M., Gentile, A., Pettiti, F., Barezzi, M., Garlando, U., ... & Canone, D. (2023). Wappfruit: a project for the optimisation of water use in agriculture. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-1485). Available from:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023EGUGA..25.1485G/abstract>
- [72] Figure available from:
<https://www.innovarurale.it/it/innovainazione/bancadati/wappfruit-tecnologie-intelligenti-applicate-alla-gestione-dellacqua>
- [73] Barezzi, M. (2021). *Long-range low-power electronic system for precision agriculture*. Available from:
<https://webthesis.biblio.polito.it/19147/>
- [74] Figure available from:
https://www.agrion.it/2021/wp-content/uploads/2023/10/20231016_WAPPFRUIT_Final_Polito.pdf
- [75] Barezzi, M., Sanginario, A., Canone, D., Gisolo, D., Gentile, A., Nari, L., ... & Garlando, U. (2024). WAPPFRUIT—An Automatic System for Drip Irrigation in Orchards Based on Real-Time Soil Matric Potential Data. *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*. Available from:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10703073/>
- [76] Figure available from:
https://www.agrion.it/2021/wp-content/uploads/2023/10/20231016_WAPPFRUIT_Final_Polito.pdf
- [77] Zangeneh, K. (2024). *Design of a Graphic Interface for Precision Agriculture*. Available from:
<https://webthesis.biblio.polito.it/31842/>

- [78] Ragab, M. A., Badreldeen, M. M. M., Sedhom, A., & Mamdouh, W. M. (2022). IOT based smart irrigation system. *International Journal of Industry and Sustainable Development*, 3(1), 76-86. Available from:
https://ijisd.journals.ekb.eg/article_252796.html
- [79] Figure available from:
<https://ernstirrigation.com/valley-linears-and-pivots>
- [80] Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., & Cervantes, C. (2010). Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote sensing*, 2(9), 2274-2304. Available from:
<https://www.mdpi.com/2072-4292/2/9/2274>
- [81] Frojo, M. (2024). Filiera della carne, rivoluzione digitale. *La Repubblica*. Available from:
https://www.repubblica.it/economia/rapporti/osservazioni/italia/mercati/2024/06/10/news/filiera_della_carne_rivoluzione_digitale-423207328/
- [82] Figure available from:
<https://www.qualeformaggio.it/scienza-e-cultura/18066-vacche-in-stalla-la-visione-distorta-dei-tecnologi-al-servizio-del-business-produttivo/>
- [83] Document available from:
https://www.istat.it/it/files/2021/05/Report-tecnologie-aziende-zootecniche_2020.pdf
- [84] SORGATO, E. Sistemi di monitoraggio automatico per la gestione della riproduzione negli allevamenti delle vacche da latte. Available from:
<https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/67835>
- [85] Figure available from:
<https://www.milkline.com/it/73-collare-per-vacche-c-sense>
- [86] Figure available from:
<https://www.lely.com/it/soluzioni/mungitura/astronaut/>
- [87] Marin, I. L'uso del Robot di Mungitura negli allevamenti di bovine da latte. Available from:
https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/18652/1/Marin_Irene.pdf
- [88] Figure available from:
https://cdn.agriland.ie/uploads/2018/04/Lely__Lely-Astronaut-A5-Lower-Arm-LR-1280x720.jpg
- [89] Spolders, M., Meyer, U., Flachowsky, G., & Coenen, M. (2004). Differences between primiparous and multiparous cows in voluntary milking frequency in an automatic milking system. *Italian Journal of Animal Science*, 3(2), 167-175. Available from:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4081/ijas.2004.167>
- [90] Cedeño, A. J. R. (2011). Efecto del estrés calórico en el bienestar animal, una revisión en tiempo de cambio climático. *Revista ESPAMCIENCIA ISSN 1390-8103*, 2(1), 15-25. Available from:

- https://revistasespam.espam.edu.ec/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/download/39/22
- [91] Figure available from:
<https://www.cmp-impianti.it/prodotti/ventilazione-stalla/>
- [92] Sirtori, F., Parrini, S., Bozzi, R., Mancini, M., & Messeri, M. (2021). Zootecnia di precisione e stress termico. Sistemi di precisione in supporto all'allevamento bovino da latte per far fronte ai cambiamenti climatici. Available from:
<https://www.torrossa.com/en/resources/an/5009257>
- [93] Meneghello, M. (2022) XFarm, scommessa svizzera da 17 milioni sulla fattoria «smart». Available from:
<https://www.ilsole24ore.com/art/xfarm-scommessa-svizzera-17-milioni-fattoria-smart-AE9KRXrB>
- [94] Ramondo, L. (2022). *Agricoltura Digitale ed Internazionalizzazione: il caso xFarm= Digital Agriculture and Internationalization: the xFarm case* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino). Available from:
<https://webthesis.biblio.polito.it/24767/>
- [95] Figure available from:
<https://onesmartagro.com/>
- [96] Thomasson, J. A., Baillie, C. P., Antille, D. L., Lobsey, C. R., & McCarthy, C. L. (2019). Autonomous technologies in agricultural equipment: a review of the state of the art. Available from:
<https://elibrary.asabe.org/data/pdf/6/913c0119/913C0119.pdf>
- [97] Figure available from:
<https://www.bassan.com/it/nuovo/trattori/trattori-john-deere/6m-155.html>
- [98] Dati presi da Confagricoltura. Available from:
<https://lombardia.confagricoltura.it/news/comunicati-stampa/101219/quotazione-gasolio-agricolo.html>
- [99] Dati presi da Il Sole 24 Ore. Available from:
<https://ntpluslavoro.ilsole24ore.com/art/ccnl-agricoltura-impiegati-AF9CkG0C>
- [100] Dati presi da Agricam scrl. Available from:
<https://www.agricam.it/macchine-agricole/noleggio-macchine-agricole-trattori-e-sollevatori/>
- [101] Shou, T. (2022, July). A literature review on the net present value (NPV) valuation method. In *2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022)* (pp. 826-830). Atlantis Press. Available from:
<https://www.atlantispress.com/proceedings/icemed-22/125975449>
- [102] Giovanelli, B. (2021). Il regime fiscale dell'impresa agraria. Available from:

- <https://morethesis.unimore.it/theses/available/etd-11132021-181043/>
- [103] Lefley, F. (1996). The payback method of investment appraisal: A review and synthesis. *International Journal of Production Economics*, 44(3), 207-224. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925527396000229>
- [104] Guardo, A. D., & Monchiero, M. (2018). Water saving and irrigation systems in horticulture. Available from: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193166502>
- [105] Figure available from: <https://aulascienze.scuola.zanichelli.it/materie-scienze/tecnologia-14/vecchie-e-nuove-frontiere-irrigazione/>
- [106] Ghinassi, G. (2024). Storia, sviluppi e prospettive dell'irrigazione. In *Digital irrigation, l'agricoltura per il prossimo millennio* (pp. 21-90). Edizioni Angelo Guerini e Associati srl. Available from: <https://flore.unifi.it/handle/2158/1400883>
- [107] Figure available from: <https://www.acquafertagri.it/irrigazione-agricola/pivot-e-torri-semoventi/>
- [108] Breidert, C., Hahsler, M., & Reutterer, T. (2006). A review of methods for measuring willingness-to-pay. *Innovative marketing*, 2(4). Available from: http://www.reutterer.com/papers/breidert&hahsler&reutterer_2006.pdf