



Università degli Studi della Tuscia di Viterbo

Dipartimento di Economia, Ingegneria, Società e Impresa

Corso di Dottorato di Ricerca in

ENGINEERING FOR ENERGY AND ENVIRONMENT
Curriculum "Biosystems and environment"
Ciclo XXXVII

TITOLO TESI DI DOTTORATO DI RICERCA

Studio di Tecnologie intelligenti nel campo dell'informazione e della comunicazione digitale per una filiera Agroalimentare sostenibile: dalla concettualizzazione alla progettazione di sistemi avanzati per l'ambiente e la salute

Settore scientifico-disciplinare

Area 09 - Ingegneria industriale e dell'informazione –
ING-IND/09 - Sistemi per l'energia e l'ambiente

Tesi di dottorato di:

Dott. Ing. Diego Donato

Firma

Coordinatore del corso

Prof. Ing. Andrea Facci

Firma

Tutore

Prof. Andrea Colantoni –
Università degli studi della
Tuscia

Firma

Co-tutore

Prof. Danilo De Marchi –
Politecnico di Torino

Firma

A.A. 2024/25

Sommario

1. Introduzione	4
1.1 Contesto della Ricerca	4
1.2 Obiettivi dello studio	6
1.3 Struttura della tesi	8
2. Fondamenti teorici e quadro metodologico [ideazione]	10
2.1 Definizione di Ricerca e Sviluppo	10
2.2 Sostenibilità, economia circolare e risparmio energetico in ambito agroalimentare	11
2.3 Principi dell'industria 4.0 e transizione 5.0	14
2.4 Metodologie di analisi e approcci interdisciplinari	18
3. Sistemi per la gestione sostenibile delle coltivazioni [concettualizzazione]	21
3.1 Tecnologie di irrigazione basate sull'impedenza elettrica delle piante e uso risorse idriche....	21
3.2 Sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica	24
3.3 Applicabilità delle soluzioni in contesti agricoli reali	27
4. Tecnologie innovative per la salute e sicurezza degli operatori agro-zootecnici [concettualizzazione]	30
4.1 Sistemi ergonomici e di supporto posturale	30
4.2 Microsensori per il monitoraggio delle condizioni di lavoro	37
4.3 Integrazione con strumenti digitali per il miglioramento delle condizioni operative della postura e ergonomia dei lavoratori.....	40
5. Analisi progettuale e sostenibilità economica [progettazione]	43
5.1 Progettazione di sistemi integrati per la gestione delle risorse idriche	43
5.2 Progettazione di sistemi integrati per la gestione delle corrette posture con l'ausilio di microsensori	56
5.3 Fattibilità economica e scalabilità delle soluzioni tecniche proposte	66
5.4 Valutazione degli impatti ambientali e sociali	69
6. Applicazione del quadro teorico al settore agroalimentare [prototipazione]	71
6.1 Implementazione del modello circolare nelle comunità rurali.....	71
6.2 Analisi delle criticità e potenziale risoluzione	74
6.3 Studio comparativo con altre soluzioni esistenti	75
7. Risultati del percorso di studio	78
7.1 Confronto con lo stato dell'arte	78
7.2 Risultati rispetto agli obiettivi della ricerca	81
7.3 Limiti dello studio e potenziali sviluppi futuri.....	84
8. Conclusioni e prospettive future	87
8.1 Sintesi dei risultati principali	87
8.2 Prospettive per la ricerca futura nel settore agroalimentare.....	89
Bibliografia e sitografia	92

ABSTRACT

La ricerca sviluppata esplora la possibilità di utilizzare e applicare tecnologie intelligenti per una filiera agroalimentare sostenibile, focalizzandosi su sistemi avanzati per ambiente e salute. L'obiettivo primario è coniugare sostenibilità e sviluppo economico tramite tecnologie digitali, analizzando il tutto in ottica di realizzazione di un modello circolare ESG (Environmental, Social, Governance) da applicare nelle comunità rurali.

Gli studi sono stati eseguiti analizzando possibili casi di ottimizzazione delle risorse idriche con sensori dedicati, di miglioramento della sicurezza degli operatori con dispositivi indossabili e non, il tutto con il supporto di soluzioni digitali innovative e l'utilizzo di tecnologie legate alla valorizzazione di sistemi basati sull'impiego di energie rinnovabili.

Vengono analizzati sistemi di irrigazione avanzati, la potenziale estrazione dell'acqua dall'umidità atmosferica e la possibilità di adozione da parte degli operatori di efficaci posture a salvaguardia del loro benessere fisico. Viene infine valutata la fattibilità economica e quali possano essere gli impatti ambientali e sociali.

Gli studi seguono il Manuale di Frascati come guida e prendono in considerazione tutti gli aspetti e i principi di "Industria 4.0" e della "transizione 5.0".

1. Introduzione

1.1 Contesto della Ricerca

La crescente necessità di coniugare sostenibilità ambientale e sviluppo economico rappresenta una delle sfide più pressanti del XXI secolo, in un contesto globale caratterizzato da cambiamenti climatici, degrado delle risorse naturali e aumento della popolazione. Le filiere agroalimentari, in particolare, rivestono un ruolo cruciale in questa dinamica, essendo direttamente coinvolte nella produzione di cibo, nella gestione delle risorse naturali e nella promozione di sistemi economici circolari. In tale contesto, l'adozione di tecnologie intelligenti e sistemi integrati rappresenta una soluzione fondamentale per affrontare le sfide globali e migliorare l'efficienza produttiva nel rispetto dell'ambiente.

Le tecnologie digitali e i sistemi interconnessi offrono oggi la possibilità di sviluppare modelli agricoli avanzati, che uniscono il monitoraggio in tempo reale delle colture e del suolo a una gestione efficiente delle risorse naturali. Secondo il Manuale di Frascati, tali attività rientrano a pieno titolo nelle definizioni di ricerca e sviluppo sperimentale, in quanto mirano all'acquisizione di nuove conoscenze e all'applicazione di soluzioni innovative a problemi pratici. La combinazione di ricerca di base e applicata risulta essenziale per creare tecnologie in grado di ottimizzare l'impiego di risorse idriche, ridurre l'uso di fertilizzanti chimici e minimizzare le emissioni di gas serra.

Un esempio concreto di applicazione di queste tecnologie riguarda l'impiego di sensori avanzati per la gestione dell'irrigazione. I dati raccolti in tempo reale consentono di regolare il consumo d'acqua in funzione delle effettive necessità delle piante, contribuendo non solo a un uso più efficiente delle risorse, ma anche alla mitigazione degli effetti della siccità. Tale approccio sistematico risponde ai requisiti classici della ricerca e sviluppo, e sottolineano l'importanza di attività pianificate e sistematiche nella definizione di progetti.

Il settore agroalimentare è inoltre un campo privilegiato per la sperimentazione di modelli di economia circolare. L'utilizzo di sottoprodotti agricoli per la produzione di biogas o biomateriali, combinato con il recupero di energia tramite fonti rinnovabili, può rappresentare un esempio virtuoso di integrazione tra tecnologia e sostenibilità. In questo senso, i principi di trasferibilità e riproducibilità trovano applicazione nelle attività progettuali finalizzate alla realizzazione di soluzioni scalabili e replicabili in contesti agricoli diversi.

La ricerca, inoltre, evidenzia anche la necessità di migliorare le condizioni di lavoro nel settore agricolo, caratterizzato da elevati rischi fisici e ambientali per i lavoratori. Attraverso l'impiego di dispositivi indossabili e sistemi di monitoraggio avanzati, è possibile ridurre i rischi associati a posture incongrue e all'esposizione a condizioni climatiche estreme. Queste

soluzioni, sviluppate secondo i criteri di creatività e incertezza, consentono di ipotizzare un passo importante in più verso un'agricoltura più sicura e tecnologicamente avanzata.

Un altro elemento centrale del contesto della ricerca sviluppata è il crescente interesse per l'automazione e l'intelligenza artificiale (IA) in agricoltura. L'implementazione di algoritmi anche con il supporto e aiuto di IA per analizzare grandi quantità di dati raccolti da sensori distribuiti sul territorio consente di ottimizzare non solo la gestione delle colture, ma anche la logistica e la distribuzione dei prodotti e il benessere posturale dei lavoratori. Tali applicazioni, benché ancora in fase di sviluppo, evidenziano un significativo potenziale per trasformare l'agricoltura in un settore più resiliente e innovativo, in linea con le linee guida delineate dal Manuale di Frascati.

Infine, il contesto della ricerca sviluppata si inserisce in una cornice normativa e politica che promuove la transizione ecologica e digitale. Le politiche europee sulla sostenibilità agricola, come la strategia Farm to Fork e il Green Deal europeo, hanno incentivato la ricerca di soluzioni tecnologiche avanzate in grado di garantire la sostenibilità economica, sociale e ambientale delle filiere agroalimentari.

1.2 Obiettivi dello studio

Gli obiettivi dello studio si collocano nell'ambito dell'applicazione delle tecnologie intelligenti e dei sistemi digitali per rispondere alle esigenze del settore agroalimentare, integrando la sostenibilità ambientale con l'efficienza produttiva. Questo progetto di ricerca si prefigge di identificare, sviluppare e testare soluzioni innovative in grado di trasformare le filiere agroalimentari attraverso l'utilizzo di strumenti digitali avanzati e metodologie basate sull'analisi scientifica rigorosa. Tutto il lavoro sviluppato è stato implementato con approcci strettamente legati a quanto richiesto dal Manuale di Frascati, in particolare con riferimenti ai contenuti dei capitoli 1 e 2.

Ottimizzazione delle risorse naturali

Uno degli obiettivi principali è sviluppare tecnologie in grado di ottimizzare l'uso delle risorse naturali, con particolare attenzione alla gestione idrica e alla riduzione dell'impatto ambientale. In particolare si punta a realizzare una produzione circolare e sostenibile con un occhio rivolto ai principi ESG (Environmental, Social, Governance). L'impiego di sensori avanzati consente di monitorare il contenuto idrico del suolo e di adattare l'irrigazione alle esigenze specifiche delle colture, evitando sprechi e migliorando la qualità della produzione agricola. Lo sfruttamento di fonti di energia rinnovabili, invece, possono portare notevoli benefici per le coltivazioni permettendo di avere a disposizione acqua prodotta in modo alternativo laddove ve n'è l'esigenza. Queste pratiche inoltre si inseriscono nelle linee guida del Manuale di Frascati, che definisce come ricerca applicata tutte le attività che mirano a tradurre le conoscenze scientifiche in soluzioni pratiche per problemi specifici.

Sviluppo di tecnologie per la salute e sicurezza degli operatori

Un ulteriore obiettivo dello studio è migliorare la salute e la sicurezza degli operatori agricoli attraverso l'implementazione di dispositivi indossabili e sistemi di monitoraggio ergonomico. Tali dispositivi permettono di ridurre l'incidenza di infortuni e malattie professionali, monitorando parametri fisici come postura, stress e affaticamento. Questo obiettivo si allinea con il criterio di trasferibilità descritto nel Manuale di Frascati, che sottolinea l'importanza di risultati replicabili e utili a una vasta gamma di contesti lavorativi.

Automazione e intelligenza artificiale per l'efficienza produttiva

Negli studi sviluppati ci si propone inoltre di esplorare le potenzialità dell'intelligenza artificiale e dell'automazione per migliorare l'efficienza dei processi produttivi agricoli. L'analisi dei dati raccolti da sensori distribuiti, combinata con algoritmi di apprendimento automatico, consente di prevedere andamenti produttivi e ottimizzare le operazioni logistiche, riducendo al minimo le perdite e massimizzando i rendimenti. Questa parte dello studio rientra nel concetto di creatività delineato dal Manuale di Frascati, che richiede che le attività di ricerca producano nuove conoscenze applicabili a contesti specifici.

Integrazione di pratiche sostenibili

La ricerca intende inoltre favorire l'integrazione di modelli di economia circolare nelle filiere agroalimentari. L'utilizzo di sottoprodotti agricoli per la produzione di energia rinnovabile e biomateriali è già da tempo un esempio di come sia possibile ridurre gli sprechi e generare valore aggiunto per il settore. Questi approcci, così come quelli che si sono voluti sviluppare nel percorso triennale del Dottorato si basano sui principi della ricerca applicata, enfatizzando l'importanza di soluzioni innovative che affrontino sfide ambientali e produttive in modo sistematico e riproducibile.

Valutazione economica e sostenibilità

Infine, il progetto mira a condurre un'analisi di massima della fattibilità economica e dell'impatto ambientale delle soluzioni proposte. Lo studio valuta i costi di implementazione delle tecnologie, i benefici economici per gli operatori e le potenziali riduzioni di emissioni di gas serra, fornendo una base scientifica solida per le future decisioni politiche e imprenditoriali. Questo approccio multidisciplinare soddisfa i criteri di sistematicità e trasferibilità, garantendo la validità e l'applicabilità dei risultati su scala globale.



1.3 Struttura della tesi

La tesi è organizzata in otto capitoli principali, ciascuno dei quali è finalizzato a esplorare e analizzare aspetti specifici della ricerca condotta, seguendo un approccio progressivo e coerente con gli studi fatti. La struttura riflette l'integrazione tra obiettivi scientifici, metodologie adottate e risultati ottenuti.

Introduzione

La prima parte del lavoro ha riguardato il contesto generale della ricerca, delineando le motivazioni e gli obiettivi principali. Include inoltre una descrizione dettagliata della struttura della tesi, offrendo una panoramica delle tematiche affrontate nei capitoli successivi.

Materiali e Metodi

Si descrivono in dettaglio le metodologie utilizzate per condurre la ricerca. Sono incluse gli studi bibliografici, delle tecnologie adottate, come sensori avanzati, dei sistemi di intelligenza artificiale e dei possibili dispositivi indossabili, nonché l'analisi dei protocolli sperimentali sviluppati per garantire l'affidabilità e la replicabilità dei risultati.

Risultati

Ogni studio affronta un aspetto specifico, come l'ottimizzazione dell'uso dell'acqua, l'integrazione di modelli di economia circolare e l'analisi delle condizioni di lavoro degli operatori di settore. I risultati sono presentati anche attraverso grafici e tabelle che ne evidenziano la rilevanza scientifica e pratica, e con ipotesi sperimentali di algoritmi di base per la raccolta e analisi dei risultati ottenibili.

Conclusioni

I risultati vengono interpretati alla luce delle ipotesi iniziali e confrontati con studi precedenti. La discussione finale si concentra sul potenziale impatto delle soluzioni proposte,

evidenziando sia i vantaggi sia le eventuali limitazioni. L'analisi segue i criteri di creatività e trasferibilità definiti dal Manuale di Frascati. Le Conclusioni inoltre sintetizzano i principali risultati della ricerca, discutendo le implicazioni per il settore agroalimentare e delineando la fattibilità degli studi e le prospettive future. Viene inoltre proposta una ipotetica roadmap per la successiva implementazione pratica delle tecnologie sviluppate a livello teorico.

Bibliografia e sitografia

Viene fornito un elenco completo delle fonti consultate, in conformità con gli standard accademici, per garantire la trasparenza e la validità scientifica del lavoro.

2. Fondamenti teorici e quadro metodologico [ideazione]

2.1 Definizione di Ricerca e Sviluppo

La definizione di Ricerca e Sviluppo (R&S) delineata nel Manuale di Frascati costituisce il riferimento metodologico principale per identificare e classificare le attività che mirano alla produzione di nuove conoscenze e alla loro applicazione pratica. Secondo il Manuale di Frascati, le attività di R&S comprendono lavori creativi e sistematici intrapresi al fine di accrescere il patrimonio delle conoscenze, incluse quelle relative all'umanità, alla cultura e alla società, e per concepire nuove applicazioni delle conoscenze disponibili. Questo approccio integra aspetti teorici, sperimentali e applicativi, enfatizzando la rilevanza della pianificazione e della riproducibilità delle attività.

La R&S si distingue in tre categorie principali:

1. Ricerca di base: Indagine teorica o sperimentale condotta per acquisire nuove conoscenze sui fondamenti di fenomeni o fatti osservabili, senza uno scopo applicativo immediato.
2. Ricerca applicata: Attività orientata verso uno scopo pratico specifico, finalizzata a tradurre le conoscenze scientifiche in applicazioni concrete.
3. Sviluppo sperimentale: Lavoro sistematico basato su conoscenze esistenti, finalizzato alla produzione di nuovi prodotti o processi o al miglioramento di quelli esistenti.

Questi tre aspetti rappresentano il nucleo delle attività di R&S descritte nel Manuale di Frascati, che ne sottolinea anche i criteri fondamentali: novità, creatività, incertezza, sistematicità e trasferibilità.

Ogni progetto di R&S deve soddisfare tutti questi criteri per essere classificato come tale, come specificato nel Capitolo 2 del manuale.

Applicazione della definizione di R&S nella ricerca agroalimentare

Nel contesto del settore agroalimentare, le attività di R&S assumono un ruolo strategico nella creazione di soluzioni innovative per affrontare sfide quali la sostenibilità, la gestione delle risorse naturali, la sicurezza alimentare e l'ergonomia sul lavoro per un migliore benessere dei lavoratori. Ad esempio, lo sviluppo di sensori per il monitoraggio del suolo e delle colture è un esempio di ricerca applicata, in quanto mira a tradurre conoscenze scientifiche in strumenti pratici per l'ottimizzazione dell'irrigazione. Secondo i principi del Manuale di Frascati, questo tipo di ricerca soddisfa i criteri di creatività e trasferibilità.

In parallelo, l'utilizzo di algoritmi di intelligenza artificiale per analizzare i dati raccolti da sensori distribuiti rappresenta un esempio di sviluppo sperimentale, in quanto implica la creazione di nuovi modelli matematici e la loro implementazione per risolvere problemi specifici legati alla gestione agricola.

Il Manuale di Frascati evidenzia come queste attività debbano essere pianificate in modo sistematico e documentate per garantirne la replicabilità.

R&S e innovazione tecnologica

Un altro aspetto fondamentale è il ruolo della R&S nell'innovazione tecnologica. Come sottolineato nel Capitolo 1 del Manuale di Frascati, la ricerca sperimentale svolge un ruolo chiave nello sviluppo di soluzioni che combinano sostenibilità ambientale ed efficienza produttiva. Nel settore agroalimentare, ciò si traduce nello sviluppo di sistemi integrati per la gestione delle risorse, come i dispositivi indossabili per monitorare le condizioni degli operatori agricoli e ridurre i rischi professionali.

Infine, il concetto di trasferibilità è centrale per garantire che i risultati delle attività di R&S possano essere applicati in contesti diversi, favorendo una diffusione ampia delle conoscenze e delle tecnologie sviluppate.

Ad esempio, le pratiche di corretta e attenta postura adottate in un contesto agricolo locale possono essere replicate su scala globale, promuovendo modelli sostenibili. Lo stesso dicasi per una implementazione sostenibile delle colture basata su risparmio idrico e produzione energetica sostenuta da fonti rinnovabili.

2.2 Sostenibilità, economia circolare e risparmio energetico in ambito agroalimentare

La sostenibilità ambientale, l'economia circolare e il risparmio energetico rappresentano pilastri fondamentali per la trasformazione del settore agroalimentare. Questo quadro teorico si basa sull'esigenza di ridurre l'impatto delle attività agricole sull'ambiente e di garantire una gestione ottimale delle risorse naturali. La ricerca e sviluppo sperimentale in questo ambito gioca un ruolo cruciale nel proporre soluzioni innovative che rispondano a queste sfide, attraverso approcci sistematici e replicabili.

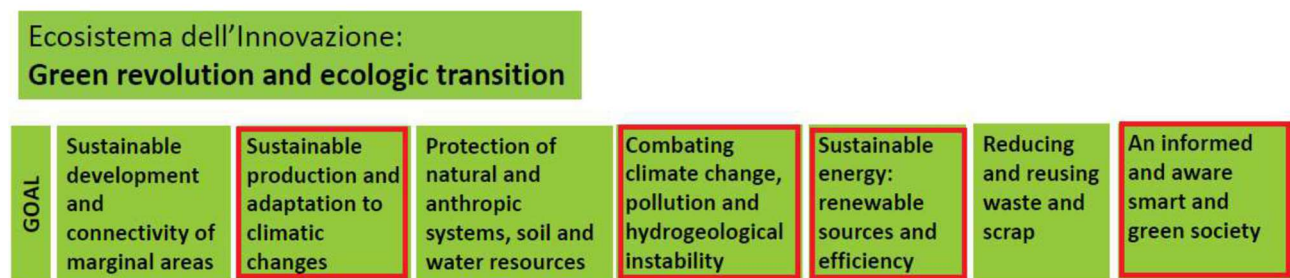
Approcci sostenibili per la gestione delle risorse

La gestione sostenibile delle risorse naturali in ambito agroalimentare si basa sull'implementazione di tecnologie avanzate, quali sensori per il monitoraggio idrico e modelli predittivi per l'ottimizzazione dell'irrigazione. Tali sistemi, integrando dati in tempo

reale, permettono di ridurre lo spreco d'acqua e di migliorare la resa agricola. Questo approccio, oltre a garantire una maggiore efficienza, è in linea con i principi del Manuale di Frascati, che enfatizza la necessità di creare soluzioni trasferibili e innovative per affrontare problemi concreti.

Il tema in oggetto viene sviluppato andando a identificare negli obiettivi legati ad un concetto di ECOSISTEMA dell'innovazione quelli più attinenti a un concetto di "rivoluzione verde e transizione ecologica". In particolare, in questo ambito si rivela necessario studiare in particolare questi quattro temi:

- 1) sostenibilità della produzione e adattamento ai cambi climatici
- 2) guerra ai cambi climatici all'inquinamento e alle instabilità idrogeologiche
- 3) sostenibilità a livello energetico utilizzando solo sorgenti rinnovabili e più efficienti
- 4) perseguimento di uno sviluppo produttivo più verde e più consapevole sì attenta ai temi ambientali



Economia circolare nel settore agricolo

L'economia circolare rappresenta una strategia chiave per ridurre gli sprechi e valorizzare i sottoprodotti agricoli. Attraverso lo sviluppo di nuove idee tecnologiche per la produzione di energia rinnovabile o gestione ottimizzata delle coltivazioni, il settore agroalimentare può contribuire allo sviluppo di nuovi cicli produttivi, cercando di diminuire la dipendenza da risorse esterne. Questo modello, che combina sostenibilità ambientale ed economica, è in linea con il criterio di trasferibilità definito nel Manuale di Frascati.

Risparmio energetico e innovazione

L'adozione di tecnologie innovative per il risparmio energetico è fondamentale per aumentare l'efficienza delle operazioni agricole. Sistemi di energy harvesting (raccolta di energia dall'ambiente e sua conversione in energia utilizzabile). Questa energia può provenire da fonti naturali), come pannelli fotovoltaici integrati con sistemi di monitoraggio, impianti mini eolici ecc. permettono di ipotizzare la possibilità di alimentazione di dispositivi sia passivi che attivi, minimizzando l'impatto ambientale. Secondo il Manuale di Frascati,

queste attività rappresentano esempi di ricerca applicata e sviluppo sperimentale, in quanto si basano su conoscenze scientifiche esistenti per sviluppare nuove soluzioni pratiche.

Integrazione di sostenibilità e innovazione

La combinazione di pratiche sostenibili e tecnologie avanzate è essenziale per affrontare le sfide globali legate alla sicurezza alimentare e ai cambiamenti climatici. L'integrazione di modelli di economia circolare e di tecnologie per il risparmio energetico consente di ridurre significativamente l'impatto ambientale del settore agroalimentare, contribuendo a promuovere una crescita sostenibile. Queste tipologie di risultati sottolineano l'importanza di un approccio sistematico e pianificato.

2.3 Principi dell'industria 4.0 e transizione 5.0

Industria 4.0 rappresenta un paradigma di trasformazione tecnologica basato sull'integrazione di sistemi digitalmente interconnessi e tracciabili, automazione avanzata e connettività, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza produttiva e la flessibilità dei processi industriali. Questo concetto si è evoluto nella transizione verso l'industria 5.0, che pone al centro le esigenze umane e ambientali, integrando la sostenibilità e l'intelligenza artificiale nelle strategie industriali.

Entrambi i paradigmi trovano fondamento nei principi delineati dal Manuale di Frascati ma anche nel più recente manuale di Oslo, che enfatizzano la necessità di un approccio sistematico e creativo per la ricerca e sviluppo.

L'innovazione sta plasmando il futuro dell'agricoltura, rendendola più sostenibile e sicura. La cooperazione tra industria, ricerca e settore agricolo è infatti fondamentale per favorire l'innovazione e lo sviluppo sostenibile nelle comunità rurali.

Le attività di ricerca hanno richiesto una attenta ricerca bibliografica, (attingendo alle seguenti fonti: Scopus, Google scholar, Nilde, Science Direct, ecc.), partecipazione a giornate di studio, webinar, seminari ecc., per definire lo stato dell'arte della ricerca sui temi su indicati e per identificare le metodologie di riferimento potenzialmente utilizzabili. In più si è iniziato a vagliare strumenti di AI (Artificial Intelligence) quali Bard (google), perplexity, copilot (microsoft), Claude e chatgpt.

L'esecuzione di una revisione critica della letteratura, attraverso una cernita, analisi e sintesi critica di lavori già pubblicati nel mio ambito specifico, è stata alla base di ragionamenti molteplici per inquadrare meglio le tematiche da sviluppare.

La partecipazione a diversi seminari e convegni indirizzati all'acquisizione di conoscenze in ambito transizione 5.0 si è rivelato assai utile, soprattutto nell'ottica di sviluppo di sistemi ESG. La Transizione 5.0 è un piano che amplia l'orizzonte dell'attuale piano Transizione 4.0 aggiungendo la componente dedicata alla sostenibilità ambientale. Questo nuovo paradigma si propone come un'evoluzione dell'Industria 4.0 che si focalizza su tre pilastri: resilienza, umanocentrismo e sostenibilità.

Nella semplificazione, tuttavia, il concetto di Transizione 5.0 è diventato di fatto sinonimo del binomio rappresentato da Transizione Digitale e Green-Energy. Le peculiarità tecniche della Transizione 5.0 rilevate e studiate includono:

1. Resilienza: L'obiettivo è rendere le imprese più adattabili e resilienti di fronte ai cambiamenti e alle crisi (politiche energetiche e ambientali sostenibili).

2. Umano - centrismo: Si pone il benessere del lavoratore (anche in termini di salute e sicurezza) al centro del processo produttivo, attraverso l'utilizzo delle nuove tecnologie.
3. Sostenibilità: Si promuove la tutela dell'ambiente e la riduzione delle emissioni di CO2 (politiche energetiche e ambientali sostenibili).

Lo studio approfondito delle vere tematiche dell'Industria 5.0 sono state utili per dissipare tutti quei dubbi dati dalla presenza in Italia di normative su Industria 5.0 forvianti e solo legate al tema energy.

Infatti la normativa italiana sul Piano Transizione 5.0, delineata nella Legge 30 dicembre 2024, n. 207 (Legge di Bilancio 2025), ai commi 427-429 dell'articolo 1, introduce modifiche significative volte a incentivare le imprese nell'adozione di tecnologie avanzate e nella riduzione dei consumi energetici. Tuttavia, questa normativa sembra focalizzarsi principalmente su aspetti di efficienza energetica e sostenibilità ambientale, offrendo crediti d'imposta per investimenti in strutture produttive situate in Italia. In contrasto, il paradigma dell'Industria 5.0, come delineato dalla Commissione Europea nel documento "Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry" del 2021, enfatizza tre pilastri fondamentali: sostenibilità, centralità dell'uomo e resilienza [RESEARCH-AND-INNOVATION.EC.EUROPA.EU].

Industria 5.0 è un paradigma emergente promosso dalla Commissione Europea che mira a superare gli obiettivi tradizionali di efficienza e produttività, enfatizzando il ruolo dell'industria nel contribuire al benessere sociale. Questo approccio pone al centro del processo produttivo il benessere dei lavoratori e utilizza nuove tecnologie per garantire una prosperità che va oltre la semplice crescita economica, rispettando al contempo i limiti del pianeta. L'Industria 5.0 si basa su tre pilastri fondamentali:

- Centralità dell'uomo: Focalizzarsi sul benessere dei lavoratori, promuovendo ambienti di lavoro sicuri e inclusivi, e valorizzando le competenze umane in sinergia con le tecnologie avanzate.
- Sostenibilità: Adottare modelli di produzione circolari e tecnologie che ottimizzano l'uso delle risorse naturali, contribuendo alla preservazione dell'ambiente.
- Resilienza: Rendere le industrie capaci di adattarsi e prosperare in condizioni avverse, garantendo stabilità economica e sociale.

Questo approccio integra e amplia il concetto di Industria 4.0, sottolineando l'importanza della ricerca e dell'innovazione come motori per una transizione verso un'industria europea

sostenibile, incentrata sull'uomo e resiliente. Per realizzare la visione dell'Industria 5.0, sono necessarie azioni concrete, tra cui:

- Adozione di tecnologie digitali incentrate sull'uomo: Garantire che le tecnologie, come l'intelligenza artificiale, siano sviluppate e implementate con un approccio centrato sull'uomo.
- Formazione e aggiornamento delle competenze: Investire in programmi di formazione per dotare i lavoratori delle competenze necessarie nell'era digitale.
- Transizione verso un'economia circolare: Promuovere modelli di produzione che riducano gli sprechi e ottimizzino l'uso delle risorse.

Occorre quindi secondo la commissione Europea accelerare gli investimenti in ricerca per sviluppare soluzioni innovative che supportino la transizione industriale.

In sintesi, l'Industria 5.0 rappresenta una visione trasformativa per l'industria europea, mirata a creare un equilibrio tra progresso tecnologico, sostenibilità ambientale e centralità dell'essere umano nel processo produttivo. Questo approccio mira a integrare le capacità umane nell'ambiente di produzione tecnologico, promuovendo una collaborazione sinergica tra uomo e macchina e valorizzando la creatività umana per creare un futuro produttivo più sostenibile, efficiente e personalizzato. La normativa italiana, pur promuovendo la sostenibilità ambientale, sembra trascurare gli aspetti di centralità dell'uomo e resilienza, non affronta adeguatamente temi come l'interazione avanzata tra esseri umani e macchine, il benessere dei lavoratori e la capacità dell'industria di adattarsi e prosperare in condizioni avverse. Di conseguenza, a parere dello scrivente, non si allinea completamente con la visione olistica dell'Industria 5.0 promossa a livello europeo. Inoltre, la complessità burocratica associata all'accesso alle agevolazioni previste dal Piano Transizione 5.0 rappresenta un ulteriore ostacolo per le imprese italiane. I vincoli burocratici rischiano frenano l'accesso alle agevolazioni, volando fondamentale e di stimolo per le aziende, trasformando una potenziale opportunità in un'occasione persa per le imprese italiane. In sintesi, mentre la normativa italiana si concentra principalmente su incentivi fiscali per investimenti in tecnologie green, potrebbe non abbracciare completamente il paradigma dell'Industria 5.0, che richiede un equilibrio tra progresso tecnologico, sostenibilità ambientale e centralità dell'essere umano nel processo produttivo. Per allinearsi pienamente con la visione europea, sarebbe auspicabile un approccio normativo più integrato che consideri anche gli aspetti umani e di resilienza dell'Industria 5.0.

Principi chiave dell'industria 4.0

I principi dell'industria 4.0 si basano su:

1. Automazione avanzata: La sostituzione e/o il miglioramento sensibile di operazioni manuali anche con sistemi robotizzati e automatizzati che aumentano l'efficienza produttiva e riducono i margini di errore.
2. Internet of Things (IoT): L'interconnessione di dispositivi che raccolgono, analizzano e condividono dati in tempo reale per migliorare i processi decisionali. I dati raccolti possono essere di notevole supporto anche al miglioramento del benessere delle persone.
3. Big Data e analisi predittiva: L'utilizzo di algoritmi avanzati per analizzare grandi quantità di dati, prevedendo tendenze e ottimizzando le operazioni.
4. Sistemi cyber-fisici: L'integrazione di componenti fisici e digitali in un'unica rete per monitorare e controllare i processi produttivi in tempo reale.
5. Transizione verso l'industria 5.0 come risultato finale di un processo in cui l'uomo non viene posto a margine ma è fulcro e centro del sistema.

La transizione verso l'industria 5.0 rappresenta un'evoluzione molto importante del paradigma 4.0, orientata a bilanciare le innovazioni tecnologiche con le necessità umane e ambientali.

I principi cardine includono:

1. Centralità dell'uomo: L'adozione di tecnologie progettate per collaborare con gli operatori, migliorando la sicurezza e la qualità del lavoro.
2. Sostenibilità: La progettazione di sistemi che minimizzano l'impatto ambientale, promuovendo l'economia circolare e il risparmio energetico.
3. Collaborazione uomo-macchina: L'utilizzo anche di robot collaborativi (cobot) per affiancare i lavoratori nelle operazioni complesse, garantendo maggiore efficienza e sicurezza.
4. Applicazioni nel settore agroalimentare

Nel contesto agroalimentare, l'industria 4.0 e la transizione 5.0 offrono opportunità significative per migliorare l'efficienza produttiva e la sostenibilità. L'utilizzo di droni per il monitoraggio delle colture, sistemi di irrigazione automatizzati e analisi dei dati in tempo reale rappresentano esempi concreti di queste applicazioni.

2.4 Metodologie di analisi e approcci interdisciplinari

La complessità delle sfide globali richiede un approccio metodologico che integri strumenti analitici avanzati e una prospettiva interdisciplinare. Nel contesto delle attività di ricerca e sviluppo (R&S) applicate al settore agroalimentare, le metodologie di analisi combinano tecniche quantitative e qualitative, favorendo una comprensione profonda dei fenomeni osservati e promuovendo soluzioni innovative. Il Manuale di Frascati sottolinea l'importanza di approcci sistematici e creativi per garantire la replicabilità e trasferibilità delle conoscenze. Il progetto è stato sviluppato con l'obiettivo di studiare l'applicabilità a livello agro-zootecnico di alcune delle tecnologie più recenti e verificarne le potenzialità con particolare riferimento a temi fortemente di attualità:

- 1) sostenibilità, economia circolare, risparmio energetico
- 2) innovazione con strumenti e tecniche digitali per la salvaguardia della salute e sicurezza degli operatori del settore.

Infatti, a livello industriale si punta sempre di più a connessioni tra sistemi fisici e digitali, analisi complesse attraverso big data e adattamenti real-time. L'obiettivo è l'utilizzo sempre più consistente di macchine/impianti/sistemi "intelligenti", interconnesse e collegate alla rete globale internet. La suddetta evoluzione deve quindi vedere inevitabilmente partecipare anche il mondo agro-zootecnico in tutte le sue accezioni compresa quella strettamente collegata della trasformazione delle materie prime della terra e alla salute e sicurezza dei lavoratori. Le attività di ricerca svolte durante la prima fase hanno preso il via con un'attenta ricerca bibliografica, (attingendo alle seguenti fonti: Scopus, Google scholar, Nilde, Science Direct, ecc.), una partecipazione a giornate di studio, webinar, seminari ecc., per definire lo stato dell'arte della ricerca sui temi su indicati e per identificare le metodologie di riferimento potenzialmente utilizzabili. Inoltre, si è eseguita una revisione critica della letteratura, ovvero una cernita, analisi e sintesi critica di lavori già pubblicati nell'ambito specifico, da porre come base di ragionamento per inquadrare meglio le tematiche da sviluppare. Tra le altre attività si segnala anche la partecipazione a convegni e attività varie di ricerca e innovazione nell'ambito degli studi sviluppati dal Centro di ricerca e studi dei Laghi.

Metodologie quantitative

Le metodologie quantitative rappresentano un elemento centrale per l'analisi e la modellazione di sistemi complessi. L'uso di sensori avanzati per il monitoraggio dei parametri ambientali consente di raccogliere dati precisi in tempo reale, che vengono

successivamente analizzati attraverso tecniche statistiche e modelli matematici. Ad esempio, i dati raccolti sui livelli di umidità del suolo e sulla crescita delle colture permettono di ottimizzare le risorse idriche, riducendo gli sprechi e migliorando la resa agricola. Questa applicazione evidenzia la rilevanza della sistematicità nell'acquisizione e nell'analisi dei dati. Inoltre, tecniche avanzate di analisi dei dati, come algoritmi predittivi, vengono utilizzate per identificare tendenze e ottimizzare i processi produttivi. Questi strumenti consentono di gestire grandi volumi di dati (Big Data), supportando decisioni informate e aumentando l'efficienza operativa.

Metodologie qualitative

Le metodologie qualitative offrono una prospettiva complementare a quella quantitativa, permettendo di analizzare le interazioni umane, i processi organizzativi e le dinamiche sia produttive che sociali legate all'adozione di nuove tecnologie. Attraverso interviste semi-strutturate con gli operatori agricoli e l'osservazione diretta dei processi produttivi monitorati a livello sensoristico, possibilmente il meno invasivo possibile, è possibile identificare criticità e opportunità legati all'implementazione di soluzioni innovative. Questo approccio è particolarmente utile per valutare l'accettabilità sociale delle tecnologie proposte e per garantire che esse rispondano alle reali esigenze degli utenti.

Approcci interdisciplinari

L'interdisciplinarietà è un elemento chiave per affrontare problemi complessi da diverse prospettive, combinando competenze provenienti da settori come l'agronomia, l'ingegneria, l'economia e le scienze sociali. Ad esempio, la progettazione di sistemi di irrigazione intelligente richiede la collaborazione tra esperti in gestione delle risorse idriche, ingegneri specializzati in automazione e analisti economici per garantire la sostenibilità economica e ambientale delle soluzioni proposte.

Questa integrazione disciplinare si allinea al criterio di creatività, che sottolinea la necessità di sviluppare approcci originali e innovativi per risolvere problemi specifici.

Validazione e replicabilità

Un aspetto fondamentale delle metodologie di analisi è la validazione dei risultati, che garantisce la loro applicabilità in contesti diversi. Questo processo include la verifica dei dati raccolti, l'analisi delle ipotesi e la ripetibilità degli esperimenti, assicurando che i risultati ottenuti possano essere trasferiti ad altri contesti operativi. Il Manuale di Frascati enfatizza l'importanza della replicabilità come criterio essenziale per classificare un'attività come R&S. In questo caso infatti gli studi sono volti proprio a identificare soluzioni riproducibili in contesti analoghi.

3. Sistemi per la gestione sostenibile delle coltivazioni [concettualizzazione]

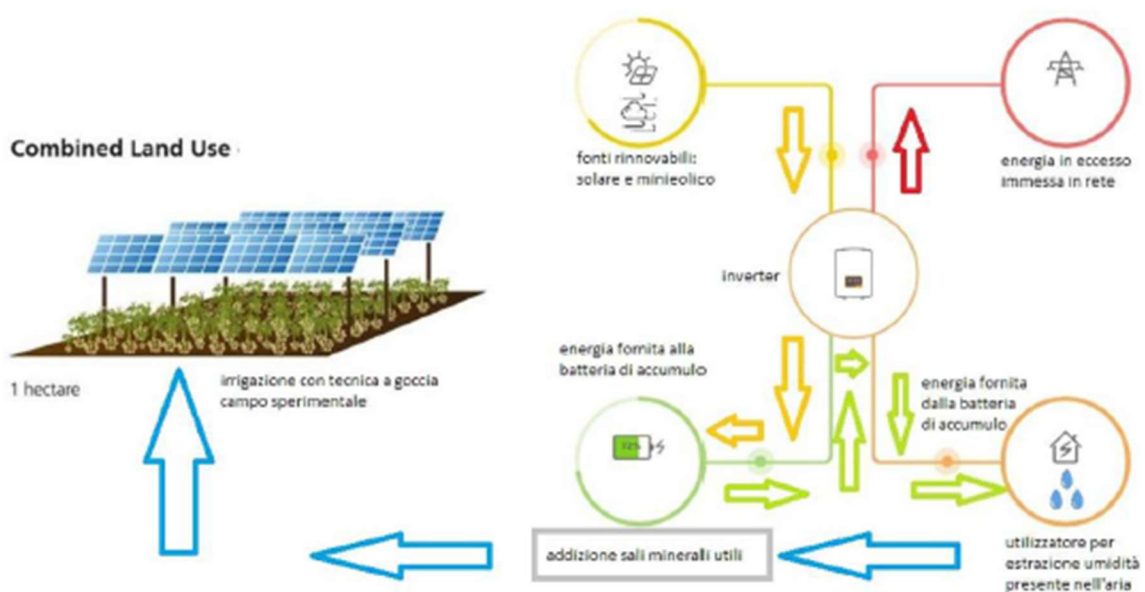
3.1 Tecnologie di irrigazione basate sull'impedenza elettrica delle piante e uso risorse idriche

L'uso di tecnologie avanzate per la gestione sostenibile delle risorse idriche rappresenta una delle principali innovazioni nel settore agroalimentare. Tra queste, i sistemi di irrigazione basati sull'impedenza elettrica delle piante costituiscono un approccio promettente per ottimizzare l'uso dell'acqua e migliorare l'efficienza produttiva. Il principio alla base di tali tecnologie risiede nella capacità di misurare la variazione dell'impedenza elettrica come indicatore dello stato idrico delle piante, consentendo una regolazione precisa dell'irrigazione in tempo reale.

Si è partiti dall'identificazione degli obiettivi legati ad un concetto di ECOSISTEMA dell'innovazione il più possibile attinente a un concetto di "rivoluzione verde e transizione ecologica". Lo schema di supporto sviluppato a livello di ideazione è stato quello messo a punto e concettualizzato alla fine del primo anno.

In questo ambito l'approccio circolare sostenibile coniuga:

- Produzione di energia da fonti rinnovabili [agri-fotovoltaico]
- Studio di sistemi di messa a disposizione di acqua alternativi e controllabili [per esempio: estrazione acqua dall'umidità dell'aria]
- Utilizzo dell'energia prodotta, anche possibilmente accumulata (per i periodi di non funzionamento delle fonti rinnovabili) per tutte le attività accessorie.



Le fasi di successive di concettualizzazione e possibile progettazione in questo ambito hanno preso quindi in considerazione le seguenti idee/concetti:

- Opportunità di mercato con studi sulle tendenze emergenti e esplorazione le tecnologie avanzate;
- Soddisfazione del/dei bisogno/i identificato durante la fase di concettualizzazione. Le tecniche utilizzate sono state individuate e analizzate attraverso brainstorming, workshop di ideazione, o con tecniche come il Design Thinking;
- Concettualizzazione: si definiscono i concetti chiave, si sviluppano idee di prototipi che rispondano al funzionamento dello schema di cui sopra e si vagliano le varie ipotesi. Si cerca di trasformare le idee in concetti tangibili che possono essere ulteriormente sviluppati.
- Progettazione: i concetti di cui al punto precedente raccolti vengono trasformati a servizio dello sviluppo studiato. La progettazione dovrà condurre successivamente alla produzione di prototipi e test di questi prototipi con i risultati finali.

In particolare a servizio dello sviluppo del progetto si è posta l'attenzione su temi molto innovativi quali:

1) Irrigazione ottimale delle piante verdi: irrigazione e impedenza elettrica

Per questo studio si ipotizza di utilizzare apparecchiature per misurare l'impedenza elettrica di piante. L'impedenza è una misura della resistenza al flusso di corrente elettrica. I ricercatori hanno scoperto che i cambiamenti dell'impedenza delle piante erano correlati alla quantità di acqua presente nel terreno. I ricercatori hanno anche scoperto che il monitoraggio di parametri aggiuntivi nell'ambiente circostante, come la temperatura e l'umidità dell'aria, può fornire correlazioni più accurate ai cambiamenti dell'impedenza. Questo perché questi parametri possono influenzare la capacità delle piante di assorbire l'acqua.

Un sistema di questo tipo potrebbe essere utilizzato per raccogliere dati in tempo reale sul benessere delle piante, per cercare poi di ottimizzare i sistemi di irrigazione rendendoli più efficienti. Si parla di prevenzione "digitale" piuttosto che di cura.

Infatti un addetto del settore potrebbe utilizzare il sistema per monitorare le condizioni delle sue colture e intervenire tempestivamente in caso di siccità o eccesso di irrigazione. Un coltivatore di frutta, per esempio, potrebbe utilizzare il sistema per garantire che le sue piante ricevano la giusta quantità di acqua per produrre frutti di alta qualità. Un vivaio potrebbe utilizzare il sistema per garantire che le sue piante giovani ricevano la giusta quantità di acqua per crescere sane.

Principio di funzionamento

L'impedenza elettrica delle piante varia in funzione del contenuto idrico dei tessuti vegetali. Sensori specializzati vengono posizionati sulle piante per monitorare costantemente queste variazioni, fornendo dati in tempo reale sul loro stato fisiologico. Tali dati vengono successivamente elaborati attraverso algoritmi predittivi, che calcolano il fabbisogno idrico ottimale e attivano i sistemi di irrigazione in modo automatico in funzione di diversi e numerosi parametri (temperatura, umidità, soleggiamento, vento, stagionalità, tipologia di terreno ecc.). Questo approccio non solo riduce gli sprechi d'acqua, ma migliora anche la salute delle piante, garantendo una distribuzione uniforme dell'umidità nel terreno.

Benefici e applicazioni pratiche

L'adozione di tecnologie basate sull'impedenza elettrica offre molteplici vantaggi. In primo luogo, consente di ottenere una gestione altamente personalizzata delle risorse idriche, adattando l'irrigazione, possibilmente del tipo goccia a goccia, alle esigenze specifiche di ciascuna coltura. Questo approccio è particolarmente utile in contesti caratterizzati da risorse idriche limitate, dove è fondamentale ottimizzare l'utilizzo dell'acqua.

In secondo luogo, queste tecnologie contribuiscono alla sostenibilità ambientale riducendo il consumo complessivo di acqua e minimizzando il rischio di sovra irrigazione, che può causare fenomeni di lisciviazione dei nutrienti e degrado del suolo. Inoltre, l'utilizzo di sensori avanzati è in linea con i criteri di trasferibilità e creatività ricercati nell'ambito di questi studi, e sottolinea l'importanza di sviluppare soluzioni innovative e replicabili in diversi contesti produttivi.

Il sistema è ancora in fase di sviluppo, ma ha il potenziale per rivoluzionare il modo in cui monitoriamo e gestiamo il benessere delle piante e potrebbe essere molto utile nel nostro studio di coltivazione sostenibile [vedi pubblicazione: Towards Optimal Green Plant Irrigation: Watering and Body Electrical Impedance].

Sfide e prospettive future

Nonostante i numerosi vantaggi, l'implementazione di sistemi basati sull'impedenza elettrica presenta alcune sfide. Tra queste ci devono essere in modo prevalente quelle sia di una necessità sia di bassissimi consumi energetici (per prolungare il più possibile i tempi di funzionamento) che quella di poter calibrare accuratamente i sensori per garantire letture affidabili.

È indubbia la necessità poi di gestire in modo ottimale la complessità dei modelli predittivi utilizzati per l'elaborazione dei dati raccolti. Tuttavia, la crescente integrazione con

tecnologie di intelligenza artificiale e Internet of Things (IoT) offre prospettive promettenti per superare tali limitazioni.

In futuro, ulteriori sviluppi potrebbero includere una ulteriore miniaturizzazione dei sensori e la riduzione dei costi di implementazione, favorendo una diffusione più ampia di queste tecnologie. Inoltre, la combinazione con modelli climatici potrebbe migliorare la capacità di previsione dei fabbisogni idrici, contribuendo a una gestione ancora più efficiente delle risorse.

Il carattere innovativo, l'incertezza legata ai risultati e l'approccio sistematico nella progettazione e implementazione dei sistemi sono elementi che ne confermano la classificazione come attività di ricerca sperimentale.

Inoltre, la possibilità di trasferire e adattare queste tecnologie a diverse colture e condizioni climatiche ne sottolinea la rilevanza scientifica e pratica.

3.2 Sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica

L'estrazione di acqua dall'umidità atmosferica in questo particolare ambito di "terreno agricolo circolare" rappresenta una soluzione innovativa e potenzialmente sostenibile a livello ambientale per affrontare la crescente scarsità di risorse idriche in molte regioni del mondo.

Questa tecnologia, basata sulla capacità di catturare e condensare il vapore acqueo presente nell'aria, offre un approccio alternativo e complementare ai sistemi di approvvigionamento idrico tradizionali, specialmente in aree caratterizzate da scarse precipitazioni e limitata disponibilità di risorse idriche superficiali e sotterranee.

Principio di funzionamento

I sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica si basano su principi fisici di condensazione e assorbimento. L'aria, ricca di vapore acqueo, viene fatta passare attraverso superfici o materiali progettati per favorire il raffreddamento al di sotto del punto di rugiada. Questo processo porta alla condensazione del vapore acqueo in forma liquida, che viene successivamente raccolta e immagazzinata per l'utilizzo.

- Produzione di acqua da irrigazione con processi di estrazione di umidità dall'aria

Lo studio porterà ad analizzare questa tipologia di produzione a mezzo di deumidificatori ad alimentazione elettrica, sostenuta in un'ottica di sostenibilità, da sistemi di produzione fotovoltaica o eolica e/o con sistemi di accumulo. La scelta di questi dispositivi andrà fatta

attraverso una analisi dei quantitativi di umidità estraibile. In particolare la fase di impostazione progettuale è stata impostata sull'analisi dei possibili deumidificatori:

- di tipo essiccativo è composto da quattro parti: un componente che contiene il solido essiccante, una ventola che muove l'aria da deumidificare verso il materiale essiccante, un elemento riscaldatore per essiccare l'aria da utilizzare per la rigenerazione e una ventola che muove l'aria secca verso il materiale essiccante.
- meccanico-refrigerativo; questo tipo di deumidificatore funziona aspirando l'aria verso l'interno tramite una ventola e filtrandola. L'aria viene quindi refrigerata attraverso un gas refrigerante e l'umidità condensata viene raccolta in un serbatoio.

Questi dispositivi possono produrre acqua dall'aria anche all'aperto. Ad esempio, la Société de l'Eau Aérienne Suisse (SEAS) ha creato un dispositivo che è in grado di produrre acqua di alta qualità dall'umidità. Attraverso la sua consociata TROOSS SEAS Engineering, ha firmato un accordo per realizzare ad Abu Dhabi i primi 3.000 dispositivi. Questi dispositivi catturano l'umidità ambientale e la condensano fino a creare acqua. L'acqua viene quindi filtrata, sottoposta a un trattamento antibatterico e infine mineralizzata. Il processo finale fornisce non solo acqua potabile, ma di alta qualità.

Due tecnologie principali dominano questo settore:

1. Sistemi basati sul raffreddamento attivo: Questi dispositivi utilizzano compressori o unità di refrigerazione per abbassare la temperatura dell'aria, favorendo la condensazione. Sebbene efficaci, questi sistemi richiedono una significativa quantità di energia e parrebbe siano più adatti per aree con infrastrutture energetiche consolidate.
2. Sistemi basati su materiali igroscopici: Utilizzano materiali avanzati, come gel di silice o sali igroscopici, per assorbire l'umidità direttamente dall'aria. Successivamente, l'acqua assorbita viene rilasciata attraverso un processo di riscaldamento controllato. Questa tecnologia è particolarmente promettente per applicazioni in aree remote o con accesso limitato all'energia.

Applicazioni e benefici

I sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica offrono molteplici vantaggi, sia in termini di sostenibilità ambientale che di applicabilità pratica. Tra i principali benefici si annoverano:

1. **Riduzione della dipendenza da fonti idriche tradizionali:** Questi sistemi permettono di produrre acqua direttamente dall'atmosfera, riducendo la richiesta da corsi d'acqua e falde acquifere. Questo aspetto è cruciale in aree colpite da siccità o da fenomeni di sovrasfruttamento delle risorse idriche.
2. **Flessibilità e scalabilità:** Le tecnologie possono essere adattate a diverse scale, da piccoli dispositivi portatili per limitato a impianti su larga scala per applicazioni agricole.
3. **Compatibilità con energie rinnovabili:** L'integrazione con pannelli fotovoltaici o mini turbine eoliche consente di alimentare questi sistemi in modo sostenibile, riducendo l'impatto ambientale e promuovendo modelli di produzione idrica a zero emissioni.

Sfide tecnologiche

Nonostante i significativi progressi, l'implementazione su larga scala di queste tecnologie affronta diverse sfide:

- **Efficienza energetica:** I sistemi basati sul raffreddamento attivo richiedono ancora quantità elevate di energia, che possono limitare la loro applicabilità in contesti con infrastrutture energetiche limitate.
- **Costi di produzione:** L'utilizzo di materiali avanzati, come i composti igroscopici, può aumentare i costi iniziali dei dispositivi, rendendoli meno accessibili per le comunità a basso reddito.
- **Condizioni climatiche:** L'efficienza di questi sistemi dipende strettamente dalle condizioni ambientali, come il livello di umidità relativa e la temperatura dell'aria. In ambienti aridi con umidità atmosferica molto bassa, le prestazioni possono risultare ridotte.

Prospettive future e innovazioni

Le prospettive future per i sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica sono promettenti, grazie alla continua evoluzione tecnologica e alla crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale. Tra le innovazioni più significative si segnalano:

1. **Materiali avanzati:** La ricerca su materiali nano strutturati e membrane ad elevata capacità di assorbimento promette di migliorare l'efficienza e ridurre i costi di produzione.

2. Automazione e intelligenza artificiale: L'integrazione con sistemi di controllo automatizzati e algoritmi predittivi consente di ottimizzare il funzionamento in base alle condizioni ambientali in tempo reale.
3. Design modulare: Lo sviluppo di unità modulari consente una maggiore flessibilità, facilitando l'adattamento a diverse esigenze e contesti.

3.3 Applicabilità delle soluzioni in contesti agricoli reali

L'applicabilità delle soluzioni tecnologiche per la gestione delle risorse idriche in contesti agricoli reali rappresenta una sfida fondamentale per garantire la sostenibilità ambientale e l'efficienza produttiva.

Soluzioni come le tecnologie di irrigazione concettualizzate, progettate e basate sull'impedenza elettrica delle piante e i sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica mostrano un potenziale significativo, ma richiedono un'accurata valutazione per adattarsi alle diverse condizioni agricole. La ricerca di una sistematicità nell'approccio degli studi qui risulta fondamentale.

Adattabilità alle condizioni climatiche e geografiche

L'adozione di tecnologie innovative in agricoltura è strettamente legata alle condizioni climatiche e geografiche specifiche di ogni regione. Ad esempio, i sistemi di irrigazione basati sull'impedenza elettrica delle piante sono particolarmente efficaci in aree con risorse idriche limitate, dove la necessità di ottimizzare il consumo d'acqua è cruciale. In regioni aride o semiaride, queste tecnologie consentono di monitorare con precisione lo stato idrico delle colture, evitando una cattiva gestione dell'irrigazione e sopperendo laddove necessario a mancanze.

I sistemi di estrazione di acqua dall'umidità atmosferica, invece, trovano applicazione in contesti caratterizzati da umidità relativa a livello sufficiente a far lavorare con efficacia i sistemi ideati e soprattutto in assenza di precipitazioni significative. Questi dispositivi possono essere utilizzati per supportare le attività agricole in aree isolate, dove l'accesso alle risorse idriche tradizionali è limitato o inesistente.

Impatto economico e fattibilità

L'applicazione di soluzioni tecnologiche in contesti agricoli reali deve essere però accompagnata da una valutazione economica dettagliata. La fattibilità economica è influenzata dai costi iniziali di implementazione, dai costi operativi e dai benefici economici derivanti dall'aumento dell'efficienza produttiva. Ad esempio, l'adozione di sistemi di irrigazione avanzati può comportare un investimento iniziale significativo per l'acquisto e l'installazione dei sensori, ma potrebbe garantire un ritorno economico grazie alla riduzione dei consumi idrici e all'aumento delle rese agricole.

D'altro canto, i sistemi di estrazione di acqua atmosferica richiedono una valutazione del costo per unità di acqua prodotta, che può variare in base alla tecnologia utilizzata e alle condizioni ambientali. L'integrazione con fonti di energia rinnovabile, come pannelli fotovoltaici, rappresenta una strategia per ridurre i costi operativi e migliorare la sostenibilità economica.

Accettabilità sociale e culturale

Un fattore cruciale per l'implementazione delle tecnologie è l'accettabilità sociale e culturale da parte degli agricoltori e delle comunità locali. La formazione degli operatori agricoli sull'uso delle nuove tecnologie è essenziale per garantire una transizione efficace. Attraverso interviste e workshop, è possibile identificare le barriere all'adozione e sviluppare strategie di supporto personalizzate.

Inoltre, l'adozione di tecnologie innovative deve rispettare le tradizioni agricole locali, evitando di introdurre soluzioni che possano essere percepite come invasive o incompatibili con le pratiche esistenti. Tali tecnologie devono essere anche economicamente "invitanti", andando a sopperire quella che potrebbe essere una primaria diffidenza.

Scalabilità e replicabilità

Un ulteriore aspetto da considerare è la scalabilità delle soluzioni tecnologiche. Le tecnologie devono essere progettate per essere adattate a diverse scale produttive, dagli orti urbani fino alle piccole aziende agricole familiari arrivando se possibile alle grandi imprese agricole. Gli studi concettuali e progettuali devono avere come faro la replicabilità come elemento centrale per promuovere l'adozione diffusa delle innovazioni, garantendo che i risultati ottenuti in un contesto possano essere trasferiti ad altri con modifiche minime.

I sistemi di irrigazione basati su sensori possono essere configurati per monitorare singoli appezzamenti o intere aree agricole, offrendo soluzioni su misura per le diverse esigenze

produttive. Allo stesso modo, i sistemi di estrazione di acqua atmosferica possono essere modulari, consentendo di aumentare la capacità produttiva in base alle necessità.

Integrazione con tecnologie digitali

L'integrazione con tecnologie digitali, come l'Internet of Things (IoT) e l'intelligenza artificiale (IA), rappresenta una frontiera molto innovativa ma promettente per migliorare l'efficienza e l'efficacia delle soluzioni applicate in contesti agricoli reali. Attraverso l'uso di piattaforme digitali, i dati raccolti dai sensori possono essere analizzati in tempo reale per ottimizzare i processi decisionali.

L'integrazione con l'IA consente di sviluppare anche possibili modelli predittivi che tengono conto di variabili climatiche, idrologiche e produttive, migliorando la pianificazione delle attività agricole e riducendo i rischi associati alle incertezze ambientali.

L'adattabilità e trasferibilità a contesti saranno la vera discriminante per valutare correttamente la rilevanza scientifica e pratica di quanto posto allo studio.

Infine si è anche indagata una ulteriore possibilità sostenibile assai affascinante: la produzione di idrogeno da luce solare e umidità dell'aria.

E' un processo complesso e promettente per la produzione di energia pulita e rinnovabile. Il processo, noto come fotoelettrolisi dell'acqua, utilizza l'energia solare per separare l'acqua in idrogeno e ossigeno.

Il processo di fotoelettrolisi dell'acqua avviene in due fasi. Nella prima fase, la luce solare viene utilizzata per produrre elettroni liberi e ioni positivi. Nella seconda fase, gli elettroni liberi e gli ioni positivi vengono separati da una membrana semipermeabile. Gli elettroni vengono quindi utilizzati per ridurre l'idrogeno, mentre gli ioni positivi vengono utilizzati per ossidare l'ossigeno.

Il processo di fotoelettrolisi dell'acqua è relativamente semplice, ma richiede l'utilizzo di materiali costosi e poco efficienti. Tuttavia, la ricerca scientifica in questo campo sta progredendo rapidamente, e si prevede che i costi e l'efficienza del processo diminuiranno notevolmente nei prossimi anni.

I vantaggi della produzione di idrogeno da luce solare e umidità dell'aria sono molteplici. Innanzitutto, il processo è completamente pulito e non produce emissioni di gas serra. In secondo luogo, il processo è rinnovabile, poiché utilizza l'energia solare come fonte di energia. In terzo luogo, il processo è versatile, poiché può essere utilizzato in una varietà di applicazioni.

Gli ostacoli che devono essere superati per rendere la produzione di idrogeno da luce solare e umidità dell'aria una tecnologia commercialmente valida includono:

- Il costo dei materiali utilizzati nel processo.
- L'efficienza del processo.
- La durata dei materiali utilizzati nel processo.

Per questo motivo il nostro progetto su questo aspetto si focalizza sull'individuazione di parametri quali l'irraggiamento solare in funzione dell'esposizione del terreno e dell'analisi dei livelli di umidità presenti nell'aria. Ad oggi però i costi proibitivi e una tecnologia ancora acerba hanno fatto sì che questi aspetti di studio siano stati tralasciati nel percorso di concettualizzazione e progettazione qui analizzati.

4. Tecnologie innovative per la salute e sicurezza degli operatori agro-zootecnici [concettualizzazione]

4.1 Sistemi ergonomici e di supporto posturale

La salute e la sicurezza degli operatori agro-zootecnici rappresentano un altro elemento cruciale negli studi svolti e orientato a migliorare la qualità del lavoro e garantire la sostenibilità delle attività agricole. L'introduzione di sistemi ergonomici e dispositivi di supporto posturale innovativi risponde a questa esigenza, offrendo soluzioni avanzate per ridurre i rischi professionali e migliorare le condizioni lavorative. Queste tecnologie si basano su principi scientifici e metodologici che rispettano i criteri di Ricerca e Sviluppo (R&S) delineati nel Manuale di Frascati, tra cui creatività, trasferibilità e sistematicità.

Questo tema che ha visto studi e approfondimenti già dalla prima fase di lavoro. In particolare, ci si è focalizzati su quelle che sono le tecniche innovative in ambito industria 4.0. Queste potrebbero essere utilizzate a supporto per la salvaguardia della salute delle persone; infatti, l'idea è quella di passare da una salvaguardia legata alla vigilanza, aggiungendo un supporto di tipo tecnologico e/o formativo che aiuti sia il lavoratore che il datore di lavoro a garantire l'incolumità e il benessere fisico delle persone in azienda.

Tra l'altro con il centro e ricerche di studi dei laghi si sono implementate nuove tecnologie (safety 4.0) che sono inerenti alle tematiche su esposte e finalizzate a un migliore benessere delle persone sul posto di lavoro. Queste tecniche, finora sviluppate in ambiti lavorativi diversi da quello tema dei presenti studi, le si vuole analizzare per valutarne il possibile utilizzo nel mondo delle coltivazioni e dell'allevamento.

Il tema, in particolare, è legato alle posture incongrue; infatti, la statistica delle malattie professionali ci indica che queste ultime sono quasi sempre alla base di numerose patologie muscolo - scheletriche.

Lo scrivente, essendo anche formatore in ambito sicurezza sul lavoro e associato ad Aifos associazione italiana formatori sicurezza sul lavoro, ha avuto la possibilità di attingere a documentazione bibliografica dell'associazione stessa (banca dati tesi di laurea in ambito salute e sicurezza sul lavoro) e studiare queste tematiche attraverso seminari innovativi. Si è cercato di capire come ad oggi le conoscenze e le nuove tecnologie possano essere usate a supporto del benessere dei soggetti coinvolti in azienda su tematiche di salute siano adeguate all'organizzazione e alla gestione aziendale.

L'ergonomia e il benessere organizzativo sono stati studiati quindi in modo approfondito facendo riferimento a quelle che potrebbero essere le fasi e i processi di adattamento inserendo tecnologie innovative in aziende in genere poco coinvolte in questo tipo di attività.

Infine si è provveduto a studiare e analizzare possibili soluzioni tecniche legate a tecnologie già mature ma riutilizzabili per un nuovo percorso di ricerca e sviluppo in un ambito di studi relativi al concetto di "vision zero".

Infatti, poter prevenire tutti gli infortuni sul lavoro e le malattie derivante dall'attività lavorativa non è solo un sogno ma un risultato raggiungibile adottando misure adeguate in tempo utile. E' questo il messaggio della campagna "vision zero". Quindi il supporto digitale può diventare determinante in questo frangente. Nell'approccio alla prevenzione, la sicurezza, la salute e il benessere sono integrati in tutti i livelli di lavoro. Grazie alla sua flessibilità vision zero offre vantaggi a tutti i luoghi di lavoro (quindi anche nell'ambito in cui stiamo sviluppando gli studi) e a tutte le imprese industrie di ogni regione del mondo. Questa prospettiva impone un cambiamento di paradigma a tutti i livelli dell'organizzazione passando dall'individuazione delle responsabilità alla ricerca di soluzioni sempre più innovative per prevenire infortuni e malattie professionali. Per raggiungere questo obiettivo occorre essere impegnati e coinvolti sempre in linea con quello che la tecnologia moderna ci propone, coinvolgendo tutti i soggetti della catena produttiva con particolare attenzione al management. Vision zero rappresenta un approccio alla prevenzione che integra le tre dimensioni della salute, della sicurezza e del benessere nei luoghi di lavoro. Grazie alle sue impostazioni flessibili è applicabile anche con tecnologie moderne in qualsiasi contesto lavorativo coinvolgendo ogni possibile lavoratore di qualsiasi ambito.



Caratteristiche e funzionamento dei sistemi ergonomici

Esistono già oggi numerosi sistemi ergonomici costruiti e progettati per ottimizzare la postura degli operatori durante le attività lavorative, riducendo lo sforzo fisico e minimizzando l'insorgenza di disturbi muscolo-scheletrici.

Tra le principali tecnologie sviluppate, sia passive che attive, si annoverano:

1. Esoscheletri assistivi: Questi dispositivi indossabili forniscono supporto attivo ai movimenti degli arti superiori e inferiori, riducendo lo sforzo durante le operazioni di sollevamento o di piegamento prolungato. Gli esoscheletri sono dotati di sensori che monitorano i movimenti dell'utente e regolano la forza applicata in tempo reale.
2. Supporti posturali regolabili: dispositivi di supporto progettati per favorire una corretta postura durante le attività statiche o dinamiche. Questi sistemi utilizzano materiali ergonomici avanzati che si adattano alla morfologia del corpo umano, garantendo il massimo comfort e riducendo la pressione su punti critici.

Benefici per la salute e la sicurezza

L'adozione di sistemi ergonomici e di supporto posturale offre molteplici benefici, tra cui i seguenti:

1. Riduzione dei disturbi muscolo-scheletrici: I dispositivi aiutano a prevenire dolori e lesioni causati da posture scorrette o da sforzi eccessivi.
2. Aumento della produttività: Migliorando il comfort e riducendo la fatica, gli operatori possono svolgere le proprie mansioni in modo più efficiente e per periodi di tempo prolungati.
3. Riduzione dei rischi professionali: Tecnologie come gli esoscheletri minimizzano i rischi associati a movimenti ripetitivi o sollevamenti pesanti, garantendo una maggiore sicurezza sul lavoro.

In particolare, ci si è focalizzati sulla ricerca di quelle tecniche innovative in ambito industria 4.0 ideate nel corso del primo anno. In questa ulteriore fase si è legato il percorso all'implementazione dei concetti di industria 4.0 in un'ottica di transizione 5.0 (sostenibilità e benessere). Si sono quindi testate in modo pro-attivo nuove tecnologie (safety 4.0) che sono inerenti alle tematiche su esposte e finalizzate a un migliore benessere delle persone sul posto di lavoro. In fase di concettualizzazione le scelte non sono semplici quindi le nuove tecnologie sono state vagliate su tematiche di salute utili ad ottenere risultati che possano portare a una successiva progettazione da portare successivamente a prototipazione.

Per la ricerca di soluzioni per le posture incongrue si è quindi lavorato in questa direzione:

a) Sistemi di aiuto alla schiena sul lavoro con esoscheletri

Il mal di schiena è uno dei disturbi più comuni sul lavoro, colpendo circa il 25% dei lavoratori italiani, non ultimi gli addetti del settore agro-zootecnico. Esso è causato da una serie di fattori, tra cui sollevamento di carichi pesanti, movimenti ripetitivi e posture scorrette. Gli esoscheletri sono dispositivi indossabili che possono aiutare a ridurre il carico sulla schiena e migliorare la postura. Sono costituiti da una struttura rigida che sostiene il tronco e dai muscoli della schiena. Esistono due tipi principali di esoscheletri: attivi e passivi.

Gli esoscheletri attivi sono alimentati da batterie o motori. Sono in grado di fornire un supporto più forte e preciso rispetto agli esoscheletri passivi. Gli esoscheletri passivi non sono alimentati. Sono invece progettati per sfruttare la forza muscolare dell'operatore per fornire supporto. I vantaggi degli esoscheletri sono la riduzione del carico sulla schiena, il miglioramento della postura, la riduzione del rischio di infortuni, aumento della produttività. Essi vengono utilizzati in una varietà di applicazioni lavorative, tra cui la Produzione la Logistica l'edilizia ma assai meno in agricoltura.

In particolare l'attenzione si è focalizzata sui seguenti modelli presenti sul mercato:

Modello 1: EksoVest

L'EksoVest è un esoscheletro passivo che sostiene la parte superiore della schiena. È progettato per aiutare i lavoratori a sollevare carichi pesanti in modo sicuro e senza sforzo ed è realizzato in materiali leggeri e traspiranti, per garantire il massimo comfort. È dotato di un sistema di regolazione che consente di adattarlo alla corporatura di ogni lavoratore. L'EksoVest è utilizzato in una varietà di applicazioni lavorative, tra cui la produzione, la logistica e l'edilizia, ma non risultano applicazioni in agricoltura



Modello 2: X-Back

L'X-Back è un esoscheletro attivo che sostiene la parte superiore della schiena e le spalle. È progettato per aiutare i lavoratori a svolgere attività ripetitive e a migliorare la postura; è dotato di un motore elettrico che fornisce supporto alla schiena e alle spalle. Il motore è controllato da un sensore che rileva il movimento del lavoratore. L'X-Back è utilizzato in una varietà di applicazioni lavorative, tra cui l'assemblaggio, l'imballaggio e la lavorazione dei metalli ma non risultano applicazioni in agricoltura



Modello 3: BackJoy

Il BackJoy è un esoscheletro passivo che sostiene la parte inferiore della schiena. È progettato per aiutare i lavoratori a migliorare la postura e ridurre il dolore alla schiena; è realizzato in materiali morbidi e confortevoli. È dotato di un sistema di regolazione che consente di adattarlo alla corporatura di ogni lavoratore. Il BackJoy è utilizzato in una varietà di applicazioni lavorative, tra cui l'ufficio, il commercio al dettaglio e l'assistenza sanitaria, ma non risultano applicazioni in agricoltura, ma se ne potrebbe pensare l'utilizzo viste le caratteristiche.



Modello 4: ExoSuit

L'ExoSuit è un esoscheletro attivo che sostiene tutto il corpo. È progettato per aiutare i lavoratori a svolgere attività impegnative, come sollevamento di carichi pesanti o lavoro in ambienti pericolosi; è dotato di un sistema di motori elettrici che fornisce supporto a tutto il corpo. I motori sono controllati da un computer che riceve input da un sensore che rileva i movimenti del lavoratore. L'ExoSuit è utilizzato in una varietà di applicazioni lavorative, tra cui la produzione, la logistica e l'edilizia. Per le sue caratteristiche si potrebbe prestare a lavorazioni agro-zootecniche.



Tutte queste soluzioni indicano comunque una certa invasività per l'operatore che le indossa e a costi di investimento assai impegnativi.

Da qui la necessità di indirizzare anche gli studi su un concetto alternativo: lo studio dei movimenti con micro sensori passivi e poco invasivi, con segnalazioni in real time all'operatore della postura incongrua e raccolta dati per eseguire sessioni formative dedicate più "sartoriali".

Un approccio procedurale e formativo nuovo:

Negli studi eseguiti si è cercato di focalizzare lo sforzo innovativo e creativo nella direzione di ricercare soluzioni di rilevamento posturale mini invasivo finalizzate alla ricerca dei principali errori posturali nelle varie situazioni lavorative. Il focus è stato quindi posto nell'educazione alla salute e benessere del lavoratore attraverso la consapevolezza dell'adozione di una più efficace posizione di lavoro ergonomica. Questa può nascere da una formazione continua e mirata. Il processo formativo può divenire più efficace e permettere di raggiungere ottimi risultati se basato su una primaria puntuale e efficace analisi dei risultati forniti dall'osservazione dei dati raccolti attraverso l'azione dei micro sensori posti in modo mini invasivo sui lavoratori.

Applicazioni pratiche in ambito agro-zootecnico

In ambito agro-zootecnico, i sistemi ergonomici tradizionali trovano applicazione in numerose attività, tra cui:

- Raccolta manuale dei prodotti agricoli: Gli esoscheletri supportano gli operatori durante le operazioni di raccolta a terra o su alberi, riducendo lo sforzo associato ai movimenti di piegamento o estensione.
- Gestione degli animali: I dispositivi ergonomici aiutano a prevenire lesioni durante il sollevamento di carichi pesanti, come balle di fieno o attrezzature, migliorando la sicurezza nelle operazioni quotidiane.
- Lavori in serra: postazioni ergonomiche (ad esempio sedili) e supporti posturali regolabili migliorano il comfort durante le operazioni di trapianto o manutenzione delle colture.

Sfide tecnologiche e prospettive future

Nonostante i numerosi vantaggi, l'implementazione su larga scala di sistemi ergonomici presenta alcune sfide, tra cui:

- Costo di acquisto: I dispositivi avanzati, come gli esoscheletri, possono avere costi iniziali elevati, limitando l'accessibilità per le piccole aziende agricole.
- Accettabilità degli utenti: È necessario superare le resistenze culturali o psicologiche da parte degli operatori, che potrebbero percepire le nuove tecnologie come invasive o difficili da utilizzare.
- Integrazione con le attività lavorative: I dispositivi devono essere progettati per integrarsi facilmente con le attrezzature e le pratiche agricole esistenti.
- Le prospettive future includono lo sviluppo di esoscheletri più leggeri e meno costosi, la miniaturizzazione dei componenti elettronici e l'utilizzo di materiali intelligenti che

migliorano il comfort e l'efficienza dei dispositivi. Inoltre, l'integrazione con tecnologie digitali, come l'Internet of Things (IoT), potrebbe consentire una raccolta e analisi dei dati in tempo reale per ottimizzare ulteriormente le prestazioni.

Da qui l'importanza di scelte coerenti e non ridondanti basate su una corretta osservazione e valutazione delle mansioni lavorative volte poi ad una successiva corretta formazione del lavoratore che accetterà anche più volentieri le soluzioni tecniche proposte.

Sistematicità nella progettazione, la creatività nell'utilizzo di ausili, tecnologie avanzate e la trasferibilità delle soluzioni sviluppate fanno sì che si possa pensare a R&S decisamente sperimentale. Inoltre, la replicabilità delle tecnologie in diversi contesti agricoli ne rafforza la rilevanza scientifica e pratica.

Gli studi fatti alla fine ci hanno portato ad indirizzarci su possibili scelte diverse sulla base della raccolta e analisi di dati rigorosi ricavati da una attenta osservazione delle posture e non su adozioni "a sensazione" di sistemi di ausilio sia indossabili che non.

L'analisi dei dati raccolti da sensori (alimentati gratuitamente dall'energia prodotta su sistemi a batteria a basso consumo) e l'adozione di possibili sistemi di alert per il lavoratore meno invasivi (ad esempio smartwatch, dispositivi leggeri e poco invasivi) possono permettere di pensare a una soluzione alternativa agli esoscheletri e per la quale i benefici potrebbero rivelarsi assai interessanti.

4.2 Microsensori per il monitoraggio delle condizioni di lavoro

I microsensori progettati per il monitoraggio delle condizioni di lavoro si concentrano specificamente sull'ottimizzazione della postura degli operatori nel settore agroalimentare. Questi dispositivi avanzati sono concepiti per rilevare e analizzare in tempo reale i movimenti e le posture adottate durante le attività lavorative, fornendo dati utili per prevenire disturbi muscolo-scheletrici e migliorare il benessere degli operatori.

Funzionamento dei microsensori

I sensori tradizionali utilizzati per il monitoraggio posturale operano attraverso una combinazione di tecnologie, tra cui accelerometri, giroscopi e sensori di pressione. Se invece li si pensa integrati in indumenti ergonomici o dispositivi indossabili, questi sensori dovranno essere di dimensioni ridotte, a basso consumo e dovranno poter registrare costantemente i movimenti del corpo. I dati raccolti saranno di confronto con parametri

predefiniti relativi a posture ottimali. Quando si andranno a rilevare posture scorrette o movimenti potenzialmente dannosi, i dispositivi potranno volendo anche fornire feedback immediato all'operatore tramite segnali visivi, acustici o vibrazioni.

Benefici per la salute degli operatori

- L'utilizzo di microsensori per il monitoraggio posturale offre numerosi vantaggi in termini di prevenzione dei rischi e miglioramento delle condizioni di lavoro:
- Prevenzione dei disturbi muscolo-scheletrici: Rilevando posture scorrette in tempo reale, i microsensori contribuiscono a prevenire dolori e lesioni croniche causate da movimenti ripetitivi o posizioni non ergonomiche.
- Riduzione della fatica: Monitorando e correggendo la postura, i dispositivi aiutano a distribuire meglio lo sforzo fisico, riducendo l'affaticamento durante le lunghe giornate lavorative.
- Personalizzazione delle soluzioni: I dati raccolti dai microsensori consentono di sviluppare programmi di formazione e interventi personalizzati per ogni operatore, migliorandone il benessere complessivo.

Applicazioni specifiche in ambito agroalimentare

Nel settore agroalimentare, i microsensori per il monitoraggio posturale possono trovare applicazione in diverse attività:

- Raccolta manuale: Durante la raccolta di frutta e ortaggi, i microsensori aiutano gli operatori a mantenere posture ergonomiche, riducendo lo sforzo su schiena e arti inferiori.
- Lavori di trapianto e manutenzione: Nelle operazioni che richiedono posizioni statiche prolungate, come il trapianto in serra, i sensori monitorano la postura e suggeriscono correzioni per evitare tensioni muscolari.
- Movimentazione di carichi: Nelle attività che prevedono il sollevamento di carichi pesanti, i dispositivi identificano movimenti rischiosi e forniscono indicazioni per prevenire infortuni.
- Movimentazioni ripetitive a basso carico: Nelle attività che prevedono il sollevamento di carichi leggeri ma con elevata frequenza; i dispositivi identificano movimenti rischiosi e forniscono indicazioni per prevenire future malattie professionali.

Sfide tecnologiche

L'implementazione di microsensori per il monitoraggio posturale affronta alcune sfide tecnologiche importanti, tra cui:

- Precisione nella rilevazione: Garantire che i sensori forniscano dati accurati è essenziale per evitare falsi positivi o negativi.
- Integrazione con le attività lavorative: I dispositivi devono essere progettati per essere comodi e non intralciare i movimenti durante il lavoro.
- Accessibilità economica: Ridurre i costi di produzione è fondamentale per favorire l'adozione su larga scala, specialmente nelle piccole aziende agricole.

Prospettive future

Le prospettive future per i microsensori posturali devono, per avere una logica di adozione sostenibile, avere diverse caratteristiche tra cui:

1. Materiali avanzati: Lo sviluppo di tessuti intelligenti in grado di integrare i sensori direttamente negli indumenti aumenterà il comfort e la praticità.
2. Integrazione con piattaforme digitali: L'utilizzo di applicazioni basate su intelligenza artificiale consentirà di analizzare i dati raccolti per fornire suggerimenti personalizzati e in tempo reale.
3. Automazione dei feedback: Sistemi automatici di correzione posturale, integrati in esoscheletri o dispositivi di supporto, potrebbero migliorare ulteriormente la prevenzione dei rischi.

I microsensori per il monitoraggio posturale rispondono pienamente alla sfida in ambito di Ricerca e Sviluppo. L'innovazione tecnologica proposta, l'approccio sistematico nella progettazione e la possibilità di replicabilità in diversi contesti lavorativi confermano una certa rilevanza scientifica e pratica. La trasferibilità di queste tecnologie basate su strumenti digitali per il miglioramento delle condizioni operative della postura e ergonomia dei lavoratori è ipotizzabile nella maggior parte degli ambienti di lavoro di studio.

L'integrazione di strumenti digitali passivi con tecnologie di studi ergonomici rappresenta una frontiera innovativa per il miglioramento delle condizioni operative degli operatori agroalimentari. L'utilizzo combinato di microsensori, intelligenza artificiale (IA) e Internet of Things (IoT) consente di monitorare e ottimizzare in tempo reale la postura e i movimenti dei lavoratori, riducendo il rischio di disturbi muscolo-scheletrici e migliorando l'efficienza lavorativa.

4.3 Integrazione con strumenti digitali per il miglioramento delle condizioni operative della postura e ergonomia dei lavoratori

L'utilizzo combinato di microsensori, intelligenza artificiale (IA) e Internet of Things (IoT) consente, come già esplicitato, di monitorare e ottimizzare in tempo reale la postura e i movimenti dei lavoratori, riducendo il rischio di disturbi muscolo-scheletrici e migliorando l'efficienza lavorativa.

Tecnologie e strumenti digitali

Gli strumenti digitali utilizzati per migliorare la postura e l'ergonomia degli operatori includono:

1. Microsensori integrati con piattaforme IoT: Questi dispositivi rilevano dati relativi alla postura e ai movimenti del corpo, inviando informazioni in tempo reale a una piattaforma centrale. L'IoT permette di aggregare e analizzare i dati raccolti da più dispositivi, offrendo una visione complessiva delle condizioni operative.
2. Intelligenza artificiale per l'analisi predittiva: Gli algoritmi di IA analizzano i dati raccolti dai sensori per identificare schemi di movimento e posture scorrette. Questo consente di prevedere situazioni di rischio e suggerire correzioni personalizzate.
3. Feedback in tempo reale: Attraverso dispositivi indossabili, come smartwatch o braccialetti, gli operatori ricevono notifiche immediate sotto forma di segnali acustici, vibrazioni o avvisi visivi per correggere la postura.
4. Smartwatch a supporto del sistema

Benefici dell'integrazione digitale

L'adozione di strumenti digitali combinati con tecnologie ergonomiche offre numerosi vantaggi per la salute e la sicurezza degli operatori:

- Monitoraggio continuo: La raccolta di dati in tempo reale permette di identificare rapidamente posture scorrette o movimenti non ergonomici.
- Prevenzione dei disturbi muscolo-scheletrici: L'analisi predittiva consente di intervenire prima che si sviluppino problematiche croniche, migliorando il benessere degli operatori.
- Ottimizzazione delle prestazioni: I dati raccolti aiutano a ottimizzare le attività lavorative, aumentando la produttività e riducendo la fatica.
- Personalizzazione degli interventi anche formativi: Gli strumenti digitali forniscono soluzioni su misura basate sui dati individuali degli operatori.

Applicazioni pratiche in ambito agroalimentare

In contesti agroalimentari, l'integrazione di strumenti digitali trova applicazioni specifiche in diverse attività:

- Raccolta e manutenzione delle colture: Durante le operazioni di raccolta, semina, potatura ecc., i dispositivi monitorano i movimenti degli operatori, suggerendo correzioni per ridurre lo stress fisico.
- Movimentazione dei carichi: Nei lavori che richiedono il sollevamento di pesi, anche ripetitivi, l'IA ci aiuta ad analizzare i dati relativi alla postura, fornendo raccomandazioni per prevenire lesioni.
- Attività in serra: In spazi ristretti, gli strumenti digitali aiutano gli operatori a mantenere posture corrette anche durante compiti prolungati.

Sfide tecnologiche e possibili soluzioni

Nonostante i benefici prevedibili, l'integrazione di strumenti digitali presenta alcune sfide:

- Accessibilità economica: I costi iniziali di acquisto e implementazione possono essere elevati, specialmente per le piccole aziende agricole. La standardizzazione delle tecnologie e la riduzione dei costi di produzione rappresentano soluzioni promettenti.
- Accettabilità da parte degli operatori: È fondamentale superare le resistenze culturali o tecniche attraverso programmi di formazione e sensibilizzazione.
- Gestione dei dati: La raccolta e l'elaborazione di grandi quantità di dati richiedono infrastrutture digitali avanzate e misure per garantire la sicurezza e la privacy dei dati.

Prospettive future

Le prospettive future per l'integrazione di strumenti digitali includono:

1. Tecnologie wearable avanzate: Lo sviluppo di indumenti da lavoro o adattabilità degli stessi già esistenti in modo "intelligente" con sensori integrati miglioreranno ulteriormente la praticità e l'efficienza dei sistemi.
2. Automazione completa: L'implementazione di sistemi automatizzati consentirà di correggere posture e movimenti senza intervento manuale da parte degli operatori.
3. Collaborazione uomo-macchina: La sinergia tra strumenti digitali e ausili indossabili, laddove prescrittibili, offrirà nuove opportunità per migliorare le condizioni operative.

In particolare gli smartwatch moderni, grazie alla presenza di sensori avanzati e alla capacità di connettersi a piattaforme digitali, possono offrire una soluzione efficace per il monitoraggio in tempo reale delle posture lavorative. Questi dispositivi possono integrare

accelerometri, giroscopi e sensori di pressione, elementi fondamentali per l'analisi dei movimenti corporei e la rilevazione di eventuali posture incongrue. L'analisi delle variazioni angolari delle articolazioni, della distribuzione del peso corporeo e della frequenza dei movimenti consente di identificare situazioni potenzialmente dannose per l'apparato muscolo-scheletrico. I dati acquisiti vengono elaborati tramite algoritmi di intelligenza artificiale e confrontati con parametri ergonomici predefiniti, consentendo di segnalare tempestivamente agli operatori eventuali incongruenze posturali.

L'intervento in tempo reale è reso possibile dall'invio di segnali di feedback che possono assumere diverse forme, tra cui vibrazioni del dispositivo, notifiche visive sul display o segnali acustici. Questa funzione consente di correggere le posture non ergonomiche immediatamente, riducendo il rischio di affaticamento muscolare e prevenendo disturbi cronici legati a movimenti ripetitivi o a sollecitazioni prolungate su specifiche aree corporee. L'interazione tra smartwatch e piattaforme IoT permette inoltre di raccogliere e analizzare un elevato volume di dati, creando profili ergonomici personalizzati per ciascun operatore. L'ottimizzazione della postura può quindi avvenire non solo in tempo reale, ma anche attraverso strategie di miglioramento basate su analisi longitudinali dei movimenti e delle sollecitazioni muscolari registrate.

L'applicazione di questa tecnologia nel settore agroalimentare si potrebbe rivelare particolarmente vantaggiosa in contesti lavorativi caratterizzati da movimenti ripetitivi o da carichi fisici elevati. Durante le operazioni di raccolta, ad esempio, il monitoraggio continuo delle inclinazioni e delle flessioni consente di prevenire sovraccarichi alla colonna vertebrale e agli arti inferiori. Nei lavori dove gli operatori sono costretti a mantenere posture statiche prolungate, l'analisi dei dati raccolti permette di suggerire variazioni periodiche della posizione per evitare tensioni muscolari localizzate. In situazioni di movimentazione di carichi pesanti, il sistema può identificare movimenti errati e trasmettere segnali di correzione per favorire una distribuzione equilibrata del peso. Anche nelle attività che prevedono sollevamenti frequenti di carichi leggeri, il monitoraggio continuo consente di riconoscere schemi motori dannosi e suggerire strategie preventive per ridurre il rischio di patologie professionali a lungo termine.

L'integrazione degli smartwatch con i sistemi di monitoraggio posturale presenta tuttavia alcune criticità che devono essere affrontate per garantire l'efficacia e l'affidabilità delle rilevazioni. La precisione dei sensori rappresenta un elemento cruciale, in quanto un'elevata sensibilità è necessaria per distinguere in maniera accurata le posture corrette da quelle potenzialmente dannose. La durata della batteria costituisce un ulteriore fattore

determinante, poiché un monitoraggio prolungato richiede tecnologie a basso consumo energetico o soluzioni di ricarica innovative basate su energy harvesting. L'usabilità del dispositivo è altrettanto rilevante, in quanto l'interfaccia utente deve essere progettata per garantire una fruibilità immediata da parte degli operatori, evitando interruzioni nel flusso di lavoro.

Le prospettive future per l'integrazione degli smartwatch nel monitoraggio posturale comprendono lo sviluppo di algoritmi di apprendimento automatico capaci di migliorare progressivamente l'accuratezza delle analisi ergonomiche. La connessione con piattaforme IoT e cloud consentirà di elaborare dati su larga scala, facilitando l'identificazione di tendenze comuni e la progettazione di interventi ergonomici più mirati. L'integrazione con materiali intelligenti, come tessuti sensorizzati, potrà rappresentare un ulteriore passo avanti nell'automatizzazione della correzione posturale, mentre l'impiego di esoscheletri adattivi potrà fornire un supporto attivo per la riduzione del carico biomeccanico.

L'applicazione degli smartwatch nel settore agroalimentare rappresenta una soluzione tecnologica avanzata per migliorare la sicurezza e l'ergonomia lavorativa. La possibilità di raccogliere e analizzare dati in tempo reale offre un'opportunità concreta per prevenire disturbi muscolo-scheletrici e ottimizzare le condizioni operative. La scalabilità del sistema e la sua adattabilità a differenti contesti lavorativi ne fanno una tecnologia potenzialmente rivoluzionaria per la prevenzione dei rischi ergonomici e il miglioramento del benessere degli operatori.

5. Analisi progettuale e sostenibilità economica [progettazione]

5.1 Progettazione di sistemi integrati per la gestione delle risorse idriche

La progettazione di sistemi integrati per la gestione delle risorse idriche rappresenta una delle sfide più urgenti nel contesto della sostenibilità agricola, considerando il crescente fabbisogno idrico e l'impatto dei cambiamenti climatici. La configurazione di sistemi innovativi richiede un approccio multidisciplinare che combini tecnologie avanzate, fonti di energia rinnovabile e una gestione oculata delle risorse.

Componenti principali dei sistemi integrati

I sistemi integrati per la gestione delle risorse idriche si caratterizzano per l'utilizzo combinato di diverse tecnologie e soluzioni progettuali, tra cui:

1. Fonti di energia rinnovabile: L'integrazione di pannelli fotovoltaici e turbine mini-eoliche consente di alimentare i sistemi in modo sostenibile. L'energia generata è utilizzata per alimentare pompe di irrigazione, sistemi di estrazione di umidità atmosferica e altre tecnologie correlate.
2. Sistemi di irrigazione a goccia: Questi sistemi garantiscono un utilizzo efficiente dell'acqua, riducendo gli sprechi e migliorando la distribuzione dell'umidità nel suolo.
3. Accumulatori energetici: Le batterie di accumulo consentono di immagazzinare l'energia in eccesso prodotta dalle fonti rinnovabili, garantendo il funzionamento dei sistemi anche in assenza di sole o vento.
4. Estrattori di umidità atmosferica: Questi dispositivi catturano e condensano il vapore acqueo presente nell'aria, fornendo un'importante fonte d'acqua in contesti caratterizzati da risorse idriche limitate.

Benefici progettuali

1. La progettazione di sistemi integrati comporta diversi benefici, sia in termini di sostenibilità ambientale che di efficienza operativa:
2. Ottimizzazione delle risorse idriche: L'utilizzo di tecnologie come l'irrigazione a goccia e gli estrattori atmosferici riduce significativamente il consumo d'acqua, migliorandone l'efficienza.
3. Riduzione delle emissioni di carbonio: L'impiego di fonti energetiche rinnovabili contribuisce a ridurre l'impronta ecologica delle attività agricole.
4. Aumento della resilienza climatica: Questi sistemi offrono soluzioni pratiche per affrontare condizioni climatiche estreme, garantendo la disponibilità di acqua anche in periodi di siccità.

Sfide tecnologiche e soluzioni

L'implementazione di sistemi integrati presenta alcune sfide tecnologiche, tra cui:

- Costo iniziale: L'installazione di sistemi avanzati richiede un investimento significativo, che può rappresentare un ostacolo per le piccole aziende agricole. Soluzioni come incentivi fiscali e programmi di finanziamento possono favorire l'adozione su larga scala.
- Manutenzione e gestione: I sistemi integrati richiedono competenze specifiche per la loro gestione e manutenzione. La formazione degli operatori è essenziale per garantirne l'efficienza.

- Adattabilità alle condizioni locali: La progettazione deve tener conto delle caratteristiche specifiche di ogni area, come il livello di umidità atmosferica e la disponibilità di risorse energetiche.

Applicazioni pratiche

I sistemi integrati trovano applicazione in diversi contesti agricoli, con risultati significativi:

- Campi sperimentali: L'integrazione di pannelli fotovoltaici con sistemi di irrigazione a goccia ha dimostrato di migliorare la produttività e l'efficienza nell'utilizzo delle risorse.
- Aree isolate: In regioni remote prive di accesso a fonti idriche tradizionali, l'uso di estrattori atmosferici e fonti rinnovabili garantisce l'approvvigionamento idrico.
- Colture intensive: Le tecnologie integrate consentono di monitorare e ottimizzare l'uso delle risorse in colture che richiedono un elevato apporto idrico.

Progettazione dettagliata dei sistemi di irrigazione basati sull'impedenza elettrica delle piante

L'obiettivo principale è quello sviluppare un modello teorico e progettuale per sistemi di irrigazione ottimizzati, in grado di monitorare in tempo reale il benessere delle piante tramite l'impedenza elettrica. Si vanno a definire i parametri tecnici necessari, come le specifiche dei sensori, i requisiti di alimentazione e le modalità di raccolta ed elaborazione dei dati.

La tecnica di irrigazione più utile ed idonea per un sistema che si vuole a livello di efficienza basare sull'impedenza elettrica delle piante è quell'irrigazione a goccia controllata da sensori, per i seguenti motivi tecnici:

- 1) Precisione e controllo localizzato: L'irrigazione a goccia consente di fornire acqua direttamente alle radici della pianta, riducendo gli sprechi. I sensori di impedenza permettono di monitorare in tempo reale lo stato idrico della pianta e del suolo, regolando l'attivazione delle elettrovalvole per un'erogazione precisa.
- 2) Compatibilità con i sensori di impedenza: I valori di impedenza misurati dai sensori riflettono condizioni idriche locali. L'irrigazione a goccia può rispondere rapidamente alle variazioni rilevate, mantenendo un equilibrio ottimale per ogni pianta.
- 3) Risparmio energetico e idrico: riduzione del consumo d'acqua grazie all'erogazione solo quando necessario, basata sulle soglie di attivazione determinate dai dati di impedenza, basso consumo energetico dei sistemi di controllo automatico.

4) Adattabilità ai contesti agricoli: questi sistemi possono essere pensati come adatti a frutteti, vigneti e colture specializzate, dove il monitoraggio puntuale è essenziale.

Saranno di facile integrazione con sistemi wireless come LoRaWAN (caratterizzati da basso consumo energetico e capacità di trasmissione su lunghe distanze) per il controllo remoto. I vantaggi saranno:

- a) monitoraggio remoto: ideale per sensori distribuiti che rilevano umidità, temperatura o impedenza delle piante.

- b) scalabilità: un singolo gateway può gestire migliaia di nodi, riducendo i costi di infrastruttura.

- c) Affidabilità: resistente a condizioni climatiche e adatto ad ambienti senza accesso a Internet.

5) Implementazione pratica: Si utilizza un sistema con elettrovalvole bistabili controllate dai nodi sensoriali e si configurano cicli di irrigazione basati su soglie idriche del suolo, attivando il flusso quando il potenziale idrico o l'impedenza superano livelli critici.

Questa tecnica garantisce un'irrigazione efficiente, sostenibile e altamente reattiva, ideale per integrare la gestione idrica con sensori avanzati.

La progettazione dettagliata è pensata con sistemi di irrigazione basati sull'impedenza elettrica delle piante e va suddivisa nei seguenti elementi chiave:

1. Definizione di un modello teorico e progettuale: Integrare i concetti di impedenza elettrica delle piante come indicatore per la gestione idrica in tempo reale. La frequenza dell'impedenza delle piante è strettamente correlata al potenziale idrico del suolo.

È possibile pensare di analizzare anche dal punto di vista tecnico questa fase nel seguente modo:

Descrizione del sistema:

Utilizzo sensori per la misurazione dell'impedenza elettrica:

- Sensori capaci di rilevare l'impedenza del tronco della pianta in tempo reale.
- Sensori collegati direttamente al sistema di monitoraggio tramite cavi schermati o tecnologia wireless LoRa.

Uso di architettura del nodo sensoriale:

- Microcontrollore con protocollo LoRa per la trasmissione a lungo raggio.
- Modulo di acquisizione dati: Convertitore analogico-digitale ad alta risoluzione per misurazioni accurate dell'impedenza.
- Alimentazione: Sistema autonomo con celle solari o batteria al litio per garantire un funzionamento continuo.

Impostazione dell'infrastruttura di comunicazione:

- Rete basata su gateway LoRaWAN centralizzati per raccogliere i dati da nodi distribuiti sul campo.
- Server cloud o locale per l'elaborazione dei dati e il calcolo dei parametri idrici.

Elaborazione dei dati:

- Modelli algoritmici per correlare i valori di impedenza misurati al potenziale idrico del suolo.
- Soglie di intervento predefinite per attivare sistemi di irrigazione.

Sistema di irrigazione automatizzato:

- Elettrovalvole collegate ai nodi sensoriali per regolare l'irrigazione in funzione dei dati raccolti.

Esempio di funzionamento:

- Il sensore rileva variazioni dell'impedenza elettrica del tronco, indicando

una potenziale condizione di stress idrico.

- Il microcontrollore trasmette i dati al gateway, che li inoltra al server per l'analisi.
- Se le soglie preimpostate vengono superate, il sistema attiva l'irrigazione automatica.

Vantaggi del sistema:

- Gestione idrica in tempo reale, ottimizzando il consumo di acqua.
- Riduzione del rischio di stress idrico per le colture.
- Sistema autonomo e scalabile.

L'incertezza deriva dall'implementazione pratica, che potrebbe presentare sfide legate alla calibrazione dei sensori e alle condizioni ambientali variabili.

2. Selezione e specifica dei sensori: Utilizzare sensori capaci di monitorare l'impedenza del tronco delle piante in condizioni in vivo e collegare queste misurazioni al potenziale idrico del suolo. La scelta di sensori come TEROs 21 e altri dispositivi a bassa potenza è essenziale per garantire precisione e autonomia. È possibile pensare di analizzare anche dal punto di vista dei costi questa fase nel seguente modo:

Definizione dei parametri principali:

1. Costo sensori (C_s): Prezzo unitario di un sensore TEROs 21 o equivalente.
2. Numero di sensori (N_s): Sensori richiesti per ciascuna pianta o area monitorata.
3. Costo sistema di trasmissione (C_t): Costo per nodo LoRa (inclusi microcontrollore e modulo radio).
4. Costo energetico (C_e): Componenti per l'alimentazione autonoma (celle solari, supercondensatori, batterie).
5. Costo installazione e manutenzione (C_i): Manodopera e accessori di montaggio.

Formula di stima:

$$C_{totale} = (C_s \cdot N_s) + (C_t \cdot N_n) + C_e + C_i$$

Dove N_n è il numero di nodi di trasmissione.

Esempio di calcolo e costo totale:

- $C_s = 150$ €/sensore.
- $N_s = 3$ sensori/pianta.
- $C_t = 80$ €/nodo.
- $C_e = 50$ €/nodo.
- $C_i = 200$ € per 10 piante.
- $N_n = 10$ nodi.

Costo totale:

$$C_{totale} = (150 \cdot 3) \cdot 10 + (80 \cdot 10) + (50 \cdot 10) + 200 = 5600 \text{ €}$$

Esiste comunque una residua incertezza derivante da variazioni nei costi di installazione e differenze nei requisiti progettuali specifici.

N.b: Si evidenzia come il costo C_e possa essere ridotto sensibilmente dall'apporto di una efficienza minima stimata del 40% minimo senza sistemi di accumulo ad un massimo del 60-70% con sistemi di accumulo, adottando un sistema di produzione energia rinnovabile.

3. Progettazione del sistema di acquisizione dati: Integrare nodi basati su LoRa per comunicazione wireless a lungo raggio. Questi nodi devono operare in modalità a basso consumo energetico, con frequenze di campionamento ottimizzate per massimizzare l'autonomia del sistema.

Si può pensare di agire sul campo nel seguente modo:

Hardware principale:

- Microcontrollore con modulo LoRa integrato.
- Sensori: collegati tramite interfaccia analogica o digitale.
- Convertitore ADC: Precisione a 12 bit per acquisizione dati da sensori analogici.
- Alimentazione: Celle solari con sistemi di accumulo ricaricabili.

Frequenze di campionamento:

- Modalità normale: Campionamento ogni 10 minuti.
- Modalità allarme: Campionamento ogni minuto, attivata su rilevazione di soglie critiche.

Software e gestione energetica:

- Modalità a basso consumo: Il microcontrollore rimane in deep sleep,

attivandosi solo per campionamento e trasmissione.

- Trasmissione dati: Utilizzo di pacchetti compatti via LoRa a intervalli ottimizzati per ridurre il consumo.

Infrastruttura di comunicazione:

- Dati inviati a un gateway LoRaWAN e successivamente elaborati su server cloud o locale.
- Ridondanza per la comunicazione in caso di perdita temporanea di segnale.

Scalabilità e configurazione:

- Configurazione remota via downlink per modificare la frequenza di campionamento o soglie operative.
- Supporto per l'aggiunta di nodi senza necessità di modifiche significative al sistema.

Esiste sempre una incertezza è legata all'integrazione ambientale e alle specifiche del progetto.

4. Requisiti di alimentazione: La progettazione prevede come già detto una alimentazione del sistema con tecnologie di energy harvesting (es. celle solari con sistemi di accumulo) per assicurare operatività autonoma in campo.
5. Architettura del sistema: occorre implementare un sistema centralizzato che elabori i dati raccolti dai nodi remoti per attivare o disattivare l'irrigazione in base a soglie di impedenza predefinite e validate sperimentalmente. Tutto il sistema può essere testato nella sua efficienza attraverso la messa in opera di ognuna delle 4 fasi precedenti

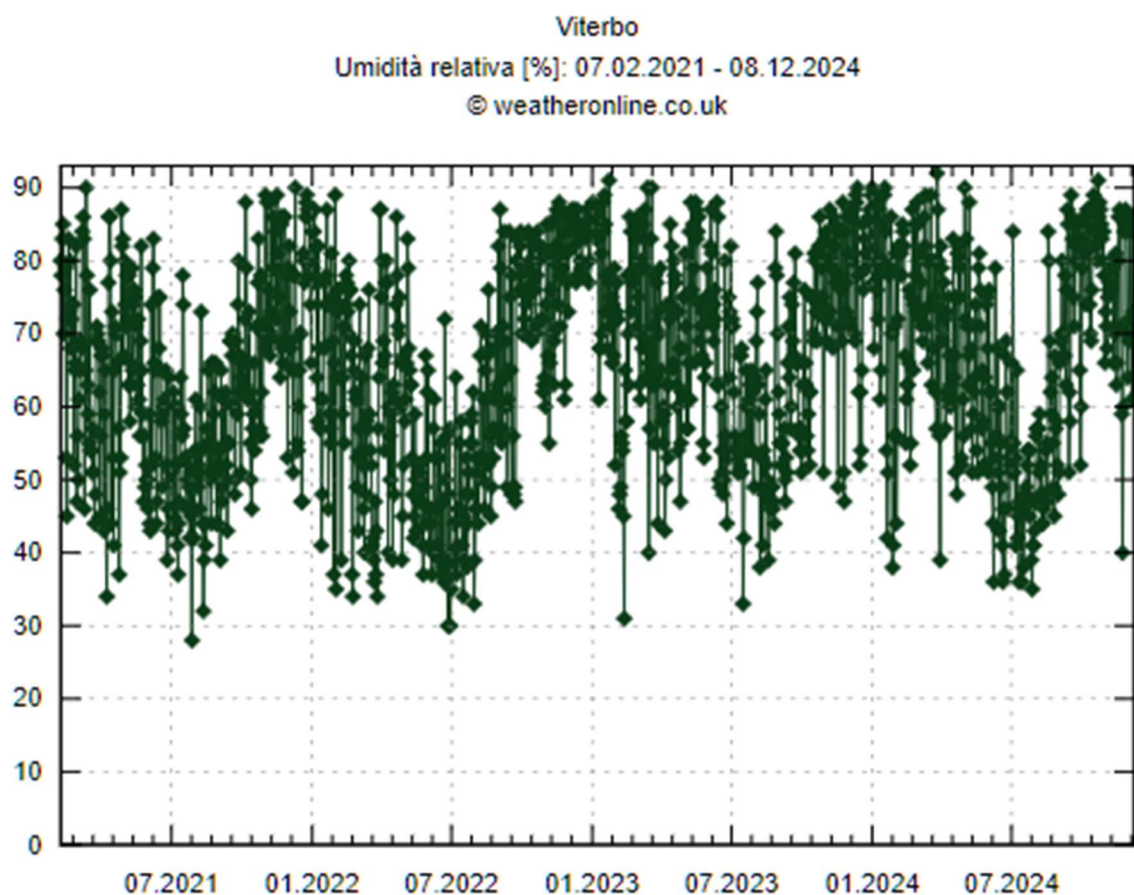
Studio dei deumidificatori per la produzione di acqua da umidità atmosferica

In questa fase di studio si è pensato a un progetto concettuale che vada ad utilizzare deumidificatori alimentati da fonti rinnovabili, analizzando i due principali approcci (essiccativo e meccanico-refrigerativo). Per motivi di opportunità future di sviluppo l'attenzione viene rivolta ai dati meteorologici dell'area della Tuscia. Il tema come già detto è legato, all'ottimizzazione dei consumi energetici, alla scalabilità del sistema e alla sua applicabilità in contesti agricoli con risorse limitate.

La proposta progettuale si va ad articolare nel seguente modo:

Analisi meteorologica per Viterbo (ultimi 3 anni):

- *Condizioni prevalenti:* Umidità relativa media del 60-70%, temperature diurne tra 15°C e 22°C (fonte: [woitalia.it/weather/maps/city](https://www.woitalia.it/weather/maps/city)).



- *Ottimizzazione:* In queste condizioni, entrambi gli approcci indicati al paragrafo 3.2 sono applicabili, ma i sistemi essiccativi alimentati da energia solare risultano più vantaggiosi per ridurre la domanda di elettricità.

1) Approccio con deumidificatore essiccativo:



- *Descrizione:* Utilizza materiali igroscopici (come gel di silice o sali liquidi) per assorbire l'umidità dall'aria, seguita da una fase di rigenerazione che rilascia l'acqua raccolta.
- *Tecnologie disponibili:*
 - Unità modulari con materiali rigenerabili: Sistemi basati su sali liquidi che possono essere rigenerati con energia solare termica.
 - Sistemi a letto fisso: Progettati per applicazioni agricole con bassa domanda energetica.
- *Vantaggi:*
 - Alta efficienza in ambienti con umidità relativa superiore al 50%.
 - Compatibile con alimentazione tramite pannelli solari termici.
- *Limitazioni:* Maggiore complessità nella gestione dei materiali assorbenti e nella rigenerazione, sovente richiesta energetica importante.

Infatti a livello teorico, sempre in aree tipiche della Toscana coltivate a vigneto (La Toscana è ricca di una biodiversità di vitigni autoctoni ampia e variegata: Grechetto, Aleatico, Sangiovese, Greco, Trebbiano, Grechetto Rosso, Malvasia), possiamo analizzare la situazione utilizzando sistemi fotovoltaici e deumidificatori ad alta efficienza il calcolo sarà il seguente:

caso di irrigazione di un vigneto di 500 m² in periodo di massima siccità;

la scelta è dettata dal fatto che la zona della Toscana vanta una ricca tradizione vitivinicola caratterizzata da numerosi vitigni autoctoni ed endemici e per il fatto che la vite è una pianta relativamente efficiente nell'uso dell'acqua, con un fabbisogno idrico moderato rispetto ad altre colture. Si sviluppa quindi un ipotetico scenario controfattuale.

Dati di progetto:

Fabbisogno idrico per il vigneto:

- Necessità media: 4-5 litri/m²/giorno.
- Totale: 2.000-2.500 litri/giorno.

Deumidificatore essiccante ad alta efficienza (modello ipotetico):

- Capacità di deumidificazione: 300 litri/24 ore in condizioni ideali (70% RH, 27°C).
- Consumo energetico: 1.8 kW (stimato per modelli ad alta efficienza sul mercato).

Acqua prodotta:

- Efficienza reale ridotta al 50-60% per Viterbo (umidità media 60-70%, temperatura 15-22°C).
- Produzione stimata: 150-180 litri/24 ore per deumidificatore.
- Per soddisfare il fabbisogno di 2.000-2.500 litri/giorno, sono necessari 12-15 deumidificatori.

Energia richiesta:

- Consumo giornaliero di un deumidificatore:

$$E = 1.8 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 43.2 \text{ kWh/giorno.}$$

- Per 12-15 unità:

$$E_{\text{totale}} = 12 \times 43.2 = 518.4 \text{ kWh/giorno.}$$

Potenza fotovoltaica necessaria:

- Ore di insolazione a Viterbo: 5 ore/giorno.
- Efficienza media dei pannelli: 15%.
- Potenza richiesta:

$$P_{\text{FV}} = \frac{1.500 \text{ kWh}}{5 \times 0.15} = 2.000 \text{ kWp.}$$

- Pannelli necessari:

- Con pannelli da 400 Wp:

$$N = \frac{2.000 \text{ kWp}}{0.4 \text{ kWp/pannello}} = 5.000 \text{ pannelli.}$$

Soluzioni attuabili:

Riduzione del numero di deumidificatori:

- Utilizzare 1-2 deumidificatori per soddisfare parzialmente il fabbisogno idrico, integrandoli con acqua piovana raccolta e serbatoi.

Ottimizzazione dell'irrigazione:

- Ridurre il consumo idrico attraverso un controllo avanzato con sensori di umidità del suolo.

Fotovoltaico scalabile:

- Iniziare con 200-300 kWp, aumentando progressivamente in base al fabbisogno effettivo e alle condizioni di produzione.

Un sistema basato esclusivamente su deumidificatori essiccanti per irrigare un vigneto di 500 m² non è praticamente attuabile in modo economicamente e operativamente sostenibile.

Ecco le principali motivazioni tecniche:

1) Criticità: alto consumo energetico: La potenza richiesta per alimentare i deumidificatori (518 kWp di fotovoltaico per 12-15 unità) richiede un investimento iniziale significativo per l'installazione dei pannelli e delle infrastrutture necessarie.

2) bassa efficienza dell'acqua prodotta: La produzione d'acqua dei deumidificatori, anche nei modelli più efficienti, dipende fortemente dalle condizioni ambientali. In condizioni sub-ottimali (umidità e temperatura moderate), la capacità si riduce significativamente, rendendo difficile soddisfare il fabbisogno idrico.

3) alti costi (svariate centinaia di migliaia di euro) e manutenzione: i deumidificatori richiedono una manutenzione regolare e hanno costi elevati per componenti come materiali essiccanti e parti mobili, e i pannelli fotovoltaici troppo elevati come numero. Ad oggi la soluzione alternativa naturale più efficace rimane quella di sistemi di raccolta di acqua piovana, serbatoi di accumulo e ottimizzazione del metodo di irrigazione (es. sensori come proposti) che offrono soluzioni più semplici, economiche e sostenibili.

4) possibili approcci migliorativi:

a) integrazione di tecnologie in modo ibrido: combinare 1-2 deumidificatori con sistemi di raccolta di acqua piovana o pozzi. I serbatoi di accumulo possono essere utilizzati per compensare la variabilità nella produzione d'acqua.

b) ottimizzazione dell'irrigazione: riduzione dei consumi idrici tramite il

monitoraggio continuo del suolo con sensori per attivare l'irrigazione solo quando necessario.

c) ridimensionamento del sistema: utilizzare il sistema su scala minore (es. appezzamenti di 100-200 m²) per testare l'efficacia prima di espanderlo.

2) Approccio con deumidificatore meccanico-refrigerativo:

In questo caso dopo i primi ragionamenti e calcoli abbozzati si è tralasciata la progettazione del sistema con essiccatori meccanico – refrigerativi poiché meno efficienti rispetto a quelli essiccativi. Infatti scegliendo per le due tipologie macchine efficienti una analisi preliminare porterebbe a questa valutazione tecnica:

l'approccio essiccativo è più efficiente energeticamente e richiede meno fotovoltaico, (comunque entrambe le soluzioni risultano poco praticabili su questa scala per costi e manutenzione).



Analisi teorica di un sistema per la produzione di idrogeno da luce solare e umidità

Il modello teorico per un sistema di fotoelettrolisi che utilizzi materiali accessibili e adatti a contesti rurali, messo allo studio nel secondo anno di ricerca è stato abbandonato. Infatti stima dei costi e della fattibilità tecnica, identificando i parametri chiave quali l'efficienza energetica, la disponibilità di umidità e l'esposizione solare, si sono dimostrati ancora più problematici rispetto al previsto. Per ora questa ipotesi è stata accantonata.

5.2 Progettazione di sistemi integrati per la gestione delle corrette posture con l'ausilio di microsensori

La progettazione invece di sistemi integrati per la gestione delle corrette posture con l'ausilio di microsensori rappresenta un progresso significativo nel miglioramento della salute e sicurezza degli operatori, in particolare nei settori che richiedono un lavoro fisico intenso, come quello agroalimentare. Questi sistemi si basano su tecnologie avanzate e sull'integrazione di sensori miniaturizzati per monitorare e correggere le posture in tempo reale, garantendo un approccio innovativo e sistematico.

Principio di funzionamento dei sistemi integrati

I sistemi integrati con microsensori sono progettati per rilevare in tempo reale i movimenti del corpo e analizzare le posture degli operatori durante le attività lavorative. I microsensori, collocati in dispositivi indossabili come cinture, braccialetti o giubbotti ergonomici, registrano dati relativi a:

1. Angoli di flessione e rotazione delle articolazioni: Informazioni critiche per identificare posture scorrette o movimenti ripetitivi potenzialmente dannosi.
2. Distribuzione del peso corporeo: Dati utili per monitorare l'equilibrio e ridurre il carico sulle strutture muscolo-scheletriche.
3. Frequenza e durata delle posture mantenute: Analisi delle abitudini posturali che possono causare stress prolungati su specifiche aree del corpo.

Questi dati vengono elaborati da algoritmi avanzati, che forniscono feedback immediati agli operatori tramite segnali acustici, vibrazioni o notifiche visive, suggerendo correzioni appropriate.

Benefici dei sistemi integrati

L'adozione di sistemi integrati per la gestione delle posture offre molteplici vantaggi:

1. Prevenzione delle lesioni muscolo-scheletriche: Il monitoraggio continuo e la correzione in tempo reale riducono significativamente il rischio di lesioni dovute a posture scorrette o movimenti ripetitivi.
2. Miglioramento della produttività: Garantendo il benessere fisico degli operatori, questi sistemi aumentano la capacità di lavoro e riducono le assenze per motivi di salute.
3. Personalizzazione delle soluzioni: I dati raccolti dai sensori consentono di sviluppare interventi specifici per ogni operatore, migliorando l'efficacia delle misure preventive.

Confronto con le soluzioni esistenti

Attualmente, le soluzioni per la gestione delle posture includono sedili ergonomici, esoscheletri passivi e programmi di formazione sull'ergonomia. Sebbene utili, queste tecnologie presentano limitazioni rispetto ai sistemi integrati con microsensori:

1. Assenza di monitoraggio in tempo reale: Le soluzioni tradizionali non offrono la possibilità di rilevare posture scorrette al momento, riducendo l'efficacia degli interventi preventivi.
2. Adattabilità limitata: Gli esoscheletri passivi, sebbene utili, non possono essere personalizzati per adattarsi alle esigenze specifiche di ogni operatore.
3. Mancanza di dati oggettivi: Le tecnologie esistenti non forniscono dati quantitativi dettagliati, fondamentali per valutare e migliorare le condizioni di lavoro.

Le soluzioni integrate con microsensori superano queste limitazioni grazie alla combinazione di monitoraggio continuo, feedback immediato e analisi avanzata dei dati. Inoltre i costi derivanti da queste applicazioni si possono rivelare assai più contenuti se paragonati a quelli relativi a sistemi a esoscheletro. Ad oggi la ricerca non trova molta letteratura in merito ma in collaborazione con il dipartimento di Elettronica del Politecnico di Torino sarebbe possibile progettare e prototipare soluzioni che prevedano piccoli dispositivi elettronici da usare per misurare una varietà di variabili, tra cui i vari movimenti. Questa sensoristica è spesso utilizzata in applicazioni biomedicali, ma possono anche essere pensati per analizzare la postura dei lavoratori in agricoltura. Si potrebbe misurare la posizione, l'orientamento e la velocità dei movimenti del lavoratore. Queste informazioni possono essere utilizzate per identificare posture errate o potenzialmente dannose. I micro sensori potrebbero anche essere utilizzati per misurare la forza applicata da un lavoratore, che può essere un indicatore di stress o di lesioni muscoloscheletriche. Il limite attuale è dato dal fatto che sono tipicamente più costosi, ma offrono comunque una maggiore flessibilità e possono essere utilizzati per raccogliere dati su un'ampia gamma di attività. Da qui comunque anche di una analisi economica a livello progettuale. I microsensori per l'analisi della postura dei lavoratori in agricoltura hanno il potenziale per migliorare la sicurezza e la salute dei lavoratori. I dati raccolti dai microsensori possono essere utilizzati per identificare i lavoratori a rischio di lesioni e per sviluppare programmi di formazione e prevenzione. Si riportano alcuni semplici esempi di come i microsensori potrebbero essere utilizzati per analizzare la postura dei lavoratori in agricoltura:

- Utilizzo per monitorare la postura dei lavoratori che raccolgono frutta e verdura. I dati raccolti possono essere utilizzati per identificare i lavoratori che assumono posture errate, come piegarsi in avanti eccessivamente o sollevare carichi pesanti in modo scorretto.
- Utilizzo per monitorare la postura dei lavoratori che guidano trattori e attrezzature agricole. I dati raccolti andrebbero a identificare i lavoratori che assumono posture errate, come inclinare la testa troppo in avanti o tenere il volante in modo scorretto.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle prime osservazioni si potrebbe in prima battuta utilizzare un primo algoritmo semplificato di prima analisi basica così impostato:

esempio Altezza	Esempio Peso	Sesso M/F	Esempio Angolo Collo (°)	Esempio Angolo Schiena (°)	Postura Collo	Postura Schiena	Postura Generale
170	70	M	15	30	=SE(O4<10, "Incongrua", SE(O4>20, "Incongrua", "Corretta"))	=SE(P4<20, "Incongrua", SE(P4>40, "Incongrua", "Corretta"))	=SE(E(O5="Incongrua", F5="Incongrua"), "Incongrua", "Corretta")

Tabella con le colonne per l'Altezza, il Peso, il Sesso, l'Angolo del Collo, l'Angolo della Schiena e la postura generale

Poi, usando per esempio formule condizionali, si potrebbe dare una prima valutazione preliminare della postura. Nella colonna "Postura Generale", per esempio, la formula controlla se sia la postura del collo che quella della schiena sono incongrue. Se entrambe sono incongrue, la formula restituisce "Incongrua". Altrimenti, restituisce "Corretta".

Successivamente si sono approfondite le ipotesi a livello progettuale.

L'obiettivo è quello di ridurre i costi e migliorare l'indossabilità, con un focus su applicazioni minimamente invasive per monitorare le posture e i movimenti degli operatori.

Lo studio vuole esplorare sia soluzioni tecnologiche esistenti sia approcci innovativi basati su microsensori passivi. Gli esoscheletri, sia attivi che passivi, offrono vantaggi rilevanti nella riduzione del carico e nella prevenzione degli infortuni, ma sono

caratterizzati da costi elevati e una certa invasività. Tuttavia, il loro utilizzo in agricoltura non è ancora consolidato e pare risultare assai poco pratico.

La proposta a cui si è giunti è quella di utilizzare microsensori specifici con tecnologia di trasmissione dati a bassa energia rappresenta un'alternativa meno invasiva, con un potenziale significativo per monitorare e analizzare posture e movimenti. Questi dispositivi, già in uso in altri settori, applicati anche solo all'abbigliamento, possono essere adattati per identificare posture dannose e misurare variabili critiche come posizione, orientamento, velocità e forza applicata dai lavoratori agricoli. I dati raccolti potranno guidare interventi correttivi mirati, contribuendo alla sicurezza e alla salute degli operatori.

L'approccio suggerito prevede un'implementazione iniziale basata su un algoritmo più completo rispetto a quello messo allo studio inizialmente; a seguito della possibile progettazione di un modello utile allo scopo, l'algoritmo stesso è stato ulteriormente implementato, consentendo in prospettiva una valutazione preliminare più completa. La collaborazione con altre istituzioni accademiche, come il Politecnico di Torino, aiuta a facilitare lo sviluppo di prototipi avanzati e analisi economiche, aprendo la strada a soluzioni ergonomiche sostenibili per il settore agricolo.

Per progettare un sistema teorico di controllo e analisi posturale per il benessere dei lavoratori agricoli, si è pensato di approfondire ulteriormente il tema e di adottare sempre gli stessi principi di monitoraggio basati su microsensori passivi, sfruttando tecnologie con sistemi elettronici specificatamente a basso consumo.

Ipotesi progettuale di Composizione del sistema:

1. Sensori posturali: Microsensori MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) integrati su supporti leggeri (es. abiti o fasce elastiche), in grado di misurare accelerazione, inclinazione e forza applicata su specifici punti del corpo (es. collo, schiena, arti superiori).
2. Unità di elaborazione locale: Una scheda di controllo a basso consumo (es. NUCLEO-WL55JC1) raccoglie i dati dai sensori, li elabora in tempo reale e invia un output preliminare (es. posture corrette/errate). Il sistema può essere alimentato da batterie LiSOC12 per una lunga durata operativa.
3. Comunicazione wireless: Utilizzo del protocollo bluetooth (BLE low energy) per trasmettere i dati raccolti a una stazione base. Questo garantisce un basso consumo energetico e un'ampia copertura, utile per ambienti agricoli estesi. Noto anche

come Bluetooth Smart, è una tecnologia wireless progettata per applicazioni che richiedono un consumo energetico ridotto e una durata della batteria prolungata. Introdotta come parte della specifica Bluetooth 4.0 nel 2010, BLE si distingue dal Bluetooth "classico" per le sue caratteristiche ottimizzate per dispositivi a bassa potenza, rendendola ideale per l'Internet of Things (IoT) e altre applicazioni specifiche. Le caratteristiche principali sono:

- Basso consumo energetico: BLE consuma significativamente meno energia rispetto al Bluetooth classico. I dispositivi BLE rimangono in modalità "sleep" e si attivano solo per brevi periodi per trasmettere o ricevere dati, prolungando la durata della batteria fino a mesi o anni in alcuni casi.
- Frequenza radio: Utilizza la banda ISM non licenziata a 2,4 GHz, la stessa del Bluetooth classico, ma con un sistema di modulazione più semplice e pacchetti dati più piccoli per ridurre il consumo energetico.
- Velocità di trasferimento dati: BLE supporta una velocità massima di 1 Mbps, inferiore rispetto al Bluetooth classico, ma sufficiente per applicazioni che richiedono trasferimenti di piccoli volumi di dati.
- Compatibilità dual-mode: Sebbene BLE sia indipendente dal Bluetooth classico, i dispositivi dual-mode possono supportare entrambi i protocolli utilizzando un'unica antenna radio. In genere BLE è ampiamente utilizzato in vari settori grazie alla sua efficienza energetica e alla facilità di implementazione e quindi particolarmente adatto per dispositivi indossabili.

Infatti può alimentare smartwatch, fitness tracker e dispositivi medici come monitor della frequenza cardiaca e sensori di glucosio ecc.. I vantaggi possono essere individuati nella durata della batteria che risulta estesa (ideale per dispositivi alimentati a batteria, come sensori IoT) e nei costi ridotti poiché i moduli BLE sono economici e facilmente accessibili agli sviluppatori. A livello di utilizzo sono efficaci per flessibilità nelle topologie di rete supportando connessioni punto-a-punto, broadcast e mesh per reti anche su larga scala. Nonostante i numerosi vantaggi, BLE ha però alcune limitazioni quali la bassa velocità di trasferimento dati: non è adatto a scenari che richiedono streaming continuo o trasferimento di grandi volumi di dati. Inoltre ha un raggio operativo limitato: Sebbene simile al Bluetooth classico, il raggio d'azione rimane relativamente breve. In sintesi, però queste ultime due limitazioni non ostacolano il loro uso se pensiamo all'ambito di utilizzo allo studio e quindi BLE rappresenta una soluzione versatile ed efficiente per applicazioni che richiedono connettività wireless a bassa potenza.

4. Algoritmi di analisi: Implementazione di algoritmi più articolati per il rilevamento di posture errate basati su regole definite (es. angoli critici per collo e schiena). Gli algoritmi possono essere aggiornati in remoto.

Applicazioni progettuali:

Le varie ipotesi devono tenere conto dei seguenti punti:

- Monitoraggio continuo: I sensori raccolgono dati sulla postura durante attività come raccolta, sollevamento e guida di trattori. Questi dati vengono elaborati localmente e si potrebbe anche pensare di implementare la possibilità di fornire feedback immediati ai lavoratori (es. vibrazioni o segnali acustici in caso di posture dannose); quest'ultima ipotesi va però valutata attentamente sulla previsione dei consumi che posso entrare in gioco in aggiunta.
- Analisi centralizzata: I dati trasmessi possono essere archiviati su un server centrale o anche a una semplice app su smartphone per analisi a lungo termine, utili per identificare schemi di rischio o ottimizzare le condizioni lavorative.
- Riduzione dello stress biomeccanico: Confrontando le misure di forza applicata dai lavoratori, il sistema identifica i carichi eccessivi, suggerendo alternative operative.

Nello specifico, la scelta di sensori posturali tipo MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) rappresentano una soluzione versatile per il monitoraggio posturale grazie alla loro miniaturizzazione, basso consumo energetico e capacità multifunzionali. Essi includono accelerometri, giroscopi e sensori di forza:

a) accelerometri: vanno misurare l'accelerazione lungo tre assi (X, Y, Z) e determinano variazioni di inclinazione e movimento. Sono ideali per rilevare la postura statica o i movimenti bruschi. Per esempio, un sensore da 6 DoF (degrees of freedom - gradi di libertà) può rilevare la posizione spaziale e l'orientamento.

b) Giroscopi: sono in grado di fornire misure angolari per identificare rotazioni anomale o movimenti torsionali, fondamentali per analizzare il movimento del collo e della schiena.

c) sensori di forza: questi andrebbero integrati nelle fasce elastiche, misurando le forze applicate in punti specifici del corpo, come le spalle o la schiena, per rilevare sovraccarichi. Questi sensori, montati su supporti leggeri e traspiranti (es. tessuti tecnici), garantiscono notevole comfort agli operatori. La tecnologia può derivare dai sensori, che impiegano materiali piezoresistivi e circuiti integrati per una precisione elevata e possono essere

utilizzati anche in applicazioni ergonomiche o biomeccaniche, per rilevare cambiamenti di pressione o tensione in tessuti elastici, integrando la misurazione della forza o dell'energia applicata.

d) unità di Elaborazione Locale: può avvenire con una scheda NUCLEO-WL55JC1 è un microcontrollore STM32 a basso consumo, ideale per applicazioni indossabili. Le sue caratteristiche principali includono: Processore ARM Cortex-M4 con supporto a elaborazioni in tempo reale, Modulo LoRa integrato per la comunicazione a lungo raggio, Gestione energetica avanzata (modalità a basso consumo (STOP2) per estendere la durata delle batterie). L'unità raccoglie i dati grezzi dai sensori MEMS e utilizza algoritmi di filtraggio digitale (es. filtri di Kalman) per migliorare la qualità dei segnali. Può fornire un feedback immediato tramite segnali LED o vibrazioni, segnalando posture errate.

e) Comunicazione Wireless: Il protocollo LoRa (Long Range) è assai adatto per trasmettere i dati in ambienti agricoli grazie alla sua capacità di coprire distanze fino a 15 km con un consumo energetico minimo: ha una frequenza di funzionamento: 868 MHz (in Europa) per evitare interferenze con altri dispositivi. Verrà usata un modello di rete a stella, dove i nodi (sensori) inviano dati a un gateway centrale.

f) Efficienza energetica: Una trasmissione tipica consuma circa 40 mA, riducendo il carico sulle batterie, con grossi vantaggi al livello di consumi. Questo sistema potrà consentire di raccogliere dati da più lavoratori in un'unica stazione base, facilitando l'analisi centralizzata.

Trasmissione dati

Il sensore utilizza il protocollo BLE per inviare a bassa distanza i dati ad una apparecchiatura mobile portatile dotato di una SIM 5G ([Subscriber Identity Module] smart card utilizzata nei dispositivi mobili per identificare in modo univoco l'abbonato a una rete di telefonia mobile; essa consente di accedere ai servizi voce e dati offerti dagli operatori telefonici e memorizza informazioni essenziali come il codice IMSI (International Mobile Subscriber Identity) e una chiave segreta per l'autenticazione sulla rete); quest'ultima invia a più lunga distanza i dati a un server elaborazione dati. Contemporaneamente i sensori posso dare un alert su uno smartphone indossato dall'operatore per una indicazione correttiva immediata.

Algoritmi di Analisi

L'algoritmo già proposto è stato ulteriormente implementato in un secondo momento combinando ulteriormente le tecniche di elaborazione dati e regole predefinite e su descritte: si sono inserite analisi legate anche a analisi angolari che vanno a confrontare gli angoli rilevati da accelerometri e giroscopi con soglie critiche (es. inclinazione del collo superiore a 20°). Inoltre vi si prevede anche un rilevamento di carichi eccessivi andando a usare i sensori di forza per identificare pressioni superiori a limiti predefiniti. La tecnica infine è del tipo machine learning di base in cui algoritmi semplici possono apprendere schemi ricorrenti nei movimenti dei lavoratori, migliorando l'accuratezza della rilevazione. Si dovrà anche pensare alla possibilità di aggiornare da remoto gli algoritmi stessi permettendo di adattare, di volta in volta, il sistema a differenti tipologie di lavoro agricolo.

Per quanto riguarda invece l'alimentazione e la durata operativa si sono individuate le batterie LiSOCl₂ che possono essere ritenute valide per un sistema del genere. Infatti hanno alta densità energetica con capacità che possono arrivare fino a 2700 mAh, sufficiente per anni di operatività in modalità a basso consumo. Hanno inoltre anche una resistenza a temperature estreme e quindi perfette per ambienti agricoli (-20°C a +50°C).

Con una gestione ottimale dell'energia, l'unità può operare in condizioni reali per 2-3 anni senza sostituzione della batteria.

Sulla base di queste considerazioni progettuali si è ulteriormente implementata e migliorata l'algoritmo raccolta dati rappresentato dalla tabella sotto, integrando le informazioni fornite sui microsensori MEMS e le tecnologie descritte. Sarà quindi possibile espandere le misure e le analisi posturali aggiungendo nuove colonne e criteri di valutazione, oltre a includere funzioni avanzate per un'analisi più dettagliata.

Di seguito una proposta migliorata:

Valori aggiunti al monitoraggio:

- Velocità del Movimento (cm/s): Misurata tramite accelerometri, valuta la rapidità con cui vengono eseguiti i movimenti, indicando possibili stress biomeccanici.
- Rotazione Torso (°): Angolo registrato da giroscopi per rilevare movimenti torsionali non ottimali.
- Forza Applicata (N): Valutata dai sensori di forza per identificare carichi eccessivi su specifiche parti del corpo.

- Stress Biomeccanico: Valutazione derivata da forza e velocità per stimare il rischio di lesioni muscoloscheletriche.

Vengono quindi usate le seguenti formule aggiornate utili ad un primo sviluppo di foglio di calcolo:

- Postura Collo:

$$=SE(E4<10;"Incongrua";SE(E4>20;"Incongrua";SE(G4>5;"Incongrua";"Corretta")))$$
 (Considera angolo collo e velocità movimento.)
- Postura Schiena:

$$=SE(F4<20;"Incongrua";SE(F4>40;"Incongrua";SE(G4>5;"Incongrua";"Corretta")))$$
 (Integra velocità per rilevare stress da movimenti bruschi.)
- Stress Biomeccanico:

$$=SE(H4*G4>100;"Alto";SE(H4*G4>50;"Moderato";"Basso"))$$
 (Prodotto di forza e velocità per una stima del rischio biomeccanico.)
- Postura Generale:

$$=SE(O(E5="Incongrua";F5="Incongrua";I5="Alto");"Incongrua";"Corretta")$$
 (Tiene conto di postura collo, schiena e stress biomeccanico.)

Altezza	Peso	Sesso M/F	Angolo Collo (°)	Angolo Schiena (°)	Velocità Movimento (cm/s)	Forza Applicata (N)	Postura Collo	Postura Schiena	Stress Biomeccanico	Postura Generale
							=SE(D2<10;"Incongrua";SE(D2>20;"Incongrua";SE(F2>5;"Incongrua";"Corretta"))))	=SE(E2<20;"Incongrua";SE(E2>40;"Incongrua";SE(F2>5;"Incongrua";"Corretta")))	=SE(F2*G2>100;"Alto";SE(F2*G2>50;"Moderato";"Basso"))	=SE(O(H2="Incongrua";I2="Incongrua";J2="Alto");"Incongrua";"Corretta")

Esempio di calcolo: uomo alto 1,78 – peso 80 kg – angolo collo 15° - angolo schiena 30° - velocità movimento 4,5 cm/s– forza applicata 15 N

Altezza	Peso	Sesso M/F	Angolo Collo (°)	Angolo Schiena (°)	Velocità Movimento (cm/s)	Forza Applicata (N)	Postura Collo	Postura Schiena	Stress Biomeccanico	Postura Generale
178	80	M	25	25	4,5	15	Incongrua	Corretta	Moderato	Incongrua

Successivamente, partendo da questa base occorrerà pensare alla progettazione e test di sistemi digitali informatici più evoluti

Limiti e soluzioni:

I principali vincoli, come il costo e l'invasività, possono essere mitigati sviluppando sensori economici e integrandoli in indumenti non invasivi. Inoltre i limiti Tecnici sono individuabili in costi: i microsensori avanzati e i sistemi di comunicazione possono essere onerosi per l'applicazione su larga scala. La robustezza dei medesimi può essere messa a dura prova a causa dell'ambiente agricolo dove troviamo in genere polvere, umidità e possibilità di urti che possono danneggiare i dispositivi. Inoltre non è sempre facilmente garantita l'adattabilità poichè movimenti complessi e irregolari possono rendere difficile la calibrazione degli algoritmi. Non ultima la tematica di accettazione da parte dei lavoratori: l'invasività percepita e un senso di "controllo" (anche se per il rispetto della privacy e del GDPR si potrebbe procedere ad una anonimizzazione volta ad attuare in modo efficace i principi di protezione dei dati ed integrare nel trattamento le necessarie garanzie per gli interessati) potrebbe ridurre la volontà di utilizzo.

In ogni caso risultano essere assai interessanti le possibilità, a livello di soluzioni tecniche, di miniaturizzazione e protezione realizzando microsensori con involucro resistente a polvere e umidità e di lunga durata di funzionamento. Si può quindi pensare ad una economia di scala per la quale vengono progettate soluzioni modulari e facilmente scalabili per ridurre i costi. Infine si potrebbe ottenere una forma di "calibrazione dinamica" che possa permettere di implementare algoritmi di apprendimento automatico per adattarsi ai diversi profili di movimento, non trascurando l'aspetto ergonomico: integrazione dei microsensori in abiti da lavoro e non più in esoscheletri per renderli meno invasivi e più accettabili.

3. Conclusioni e prospettive

Il lavoro nelle sue parti conclusive mira a consolidare le basi per future applicazioni pratiche delle tecnologie studiate, creando una base prima concettuale e poi teorica-progettuale. L'obiettivo è quello di poter poi testare sul campo le varie soluzioni per cercare di fornire un contributo significativo alla ricerca nel settore agro-zootecnico. Tutte queste soluzioni voglio in primis favorire la sostenibilità, anche a discapito di una attuale efficienza economica, con soluzioni che promuovano innanzitutto ambiente, sicurezza e innovazione tecnologica in modo sistematicamente accessibile.

Criticità e strategie di miglioramento

Nonostante i numerosi vantaggi, i sistemi integrati con microsensori presentano alcune criticità che necessitano di essere affrontate per migliorarne l'efficacia:

1. Costo iniziale assoluto potenzialmente elevato per piccole realtà: La produzione e l'installazione di questi sistemi richiedono investimenti che possono rivelarsi significativi, ma comunque ridotti se confrontati con gli esoscheletri. La riduzione dei costi attraverso economie di scala e incentivi fiscali potrebbe favorirne l'adozione.
2. Formazione degli operatori: L'utilizzo efficace di queste tecnologie richiede una formazione specifica per garantire che gli operatori comprendano e seguano le indicazioni fornite dai dispositivi.
3. Durata della batteria dei sensori: L'autonomia limitata dei microsensori rappresenta una sfida per il monitoraggio continuo. L'introduzione di tecnologie di energy harvesting può risolvere questo problema.

Prospettive future

Le prospettive per la ricerca futura includono queste possibili soluzioni:

1. Integrazione con l'intelligenza artificiale: L'utilizzo di nuovi algoritmi di machine learning per analizzare grandi quantità di dati raccolti dai sensori potrebbe migliorare ulteriormente la precisione e l'efficacia dei sistemi.
2. Collaborazione interdisciplinare: La collaborazione tra esperti di ingegneria biomedica (medicina del lavoro), ergonomia e scienze sociali può portare allo sviluppo di soluzioni più complete e adattabili.
3. Applicazioni in altri settori: Sebbene inizialmente progettati per il settore agroalimentare, questi sistemi potrebbero essere adattati a contesti industriali, sanitari, sportivi ecc.

5.3 Fattibilità economica e scalabilità delle soluzioni tecniche proposte

L'analisi della fattibilità economica e della scalabilità rappresenta un passaggio cruciale per l'implementazione di soluzioni tecniche innovative nel settore della gestione delle risorse idriche e monitoraggio posturale dei lavoratori. Considerando i dati derivanti dalle attività analizzate, è evidente che queste soluzioni non solo garantiscono benefici ambientali e sociali, ma offrono anche un elevato potenziale di ritorno economico e flessibilità nell'adattarsi a diversi contesti operativi.

Costi iniziali e benefici economici

L'implementazione di sistemi integrati per la gestione delle risorse idriche, come quelli basati sull'integrazione di pannelli fotovoltaici, sistemi di irrigazione a goccia e accumulatori energetici, richiede teoricamente un investimento iniziale significativo. Tuttavia, i benefici economici a lungo termine potrebbero risultare evidenti se riuscisse a ridurre i costi operativi. In particolare:

- Riduzione dei costi energetici:
 - L'adozione di pannelli fotovoltaici per alimentare i sistemi di irrigazione elimina o riduce significativamente la dipendenza da fonti energetiche tradizionali, abbattendo i costi legati al consumo di energia elettrica o combustibili.
- Ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche:
 - I sistemi di irrigazione a goccia garantiscono una distribuzione precisa dell'acqua, riducendo gli sprechi e limitando i costi associati all'approvvigionamento idrico, specialmente in aree con risorse idriche limitate.
- Efficienza operativa:
 - L'integrazione di accumulatori energetici consente di immagazzinare energia in eccesso, assicurando la continuità operativa durante periodi di scarsa produzione energetica, senza costi aggiuntivi per fonti esterne.
- Riduzione delle perdite di produzione:
 - Un'irrigazione più efficiente e regolare supporta un aumento della produttività agricola, riducendo i rischi di perdite economiche legate a condizioni climatiche avverse.
- Minore manutenzione a lungo termine:
 - L'uso di tecnologie moderne e rinnovabili richiede meno interventi di manutenzione rispetto ai sistemi tradizionali, riducendo i costi operativi ricorrenti

L'implementazione invece di sistemi integrati per la verifica delle posture adottate durante le varie lavorazioni, come quelli basati sull'utilizzo di micro sensori a basso consumo alimentati da ridotte batterie ricaricate da fonti rinnovabili richiederebbe un investimento iniziale meno significativo. In particolare:

- Ridotto costo delle componenti tecnologiche:
 - I microsensori utilizzati sono caratterizzati da una struttura semplice e costi di produzione relativamente bassi, grazie ai progressi nella miniaturizzazione elettronica e alla standardizzazione dei processi produttivi.

- Fonti energetiche rinnovabili:
 - L'alimentazione dei microsensori tramite fonti rinnovabili, come pannelli solari miniaturizzati o sistemi di energy harvesting, elimina la necessità di costosi sistemi di alimentazione esterni o ricorrenti sostituzioni delle batterie.
- Facilità di installazione:
 - I dispositivi indossabili che integrano i microsensori non richiedono modifiche strutturali alle infrastrutture esistenti, riducendo significativamente i costi di implementazione.
- Manutenzione minima:
 - I microsensori a basso consumo necessitano di interventi manutentivi limitati, riducendo i costi operativi a lungo termine rispetto a sistemi più complessi come gli esoscheletri attivi.
- Scalabilità modulare:
 - La possibilità di integrare i microsensori in modo graduale, partendo da piccoli gruppi di operatori, consente alle aziende di distribuire i costi nel tempo senza dover sostenere un investimento iniziale elevato.
- A differenza di tecnologie più complesse, come gli esoscheletri attivi o i sistemi robotici per la correzione della postura, i microsensori offrono vantaggi economici significativi grazie alla loro semplicità e flessibilità applicativa. Inoltre, l'assenza di una dipendenza da infrastrutture energetiche tradizionali ne amplia ulteriormente l'accessibilità.

Modelli di finanziamento

Per favorire l'adozione su larga scala di queste soluzioni, è fondamentale prevedere modelli di finanziamento anche consistenti, che supportino gli operatori agricoli anche in sperimentazioni pionieristiche. Tra le opzioni più efficaci potrebbero figurare:

- Incentivi fiscali: Agevolazioni per l'acquisto e l'installazione di sistemi tecnologici innovativi.
- Programmi di finanziamento pubblico: Fondi europei e nazionali destinati alla promozione di tecnologie sostenibili.
- Partenariati pubblico-privati: Collaborazioni tra enti pubblici e aziende private per ridurre i costi iniziali a carico degli operatori.

Scalabilità delle soluzioni

Le tecnologie analizzate si distinguono per la loro elevata scalabilità, che consente di adattarle a diversi contesti produttivi, dalle piccole aziende agricole alle grandi imprese. In particolare:

- **Adattabilità dimensionale:** I sistemi possono essere progettati su misura in base alle dimensioni dell'azienda, garantendo una gestione ottimale delle risorse.
- **Modularità tecnologica:** La possibilità di aggiungere o rimuovere componenti tecnologici rende queste soluzioni estremamente flessibili.
- **Applicabilità geografica:** Le tecnologie possono essere implementate in diverse condizioni climatiche e geografiche, garantendo risultati consistenti.

Sostenibilità economica

Un aspetto fondamentale è la sostenibilità economica delle soluzioni nel lungo termine. I dati analizzati mostrano che:

- **Aumento delle rese:** Le tecnologie integrate migliorano l'efficienza produttiva, aumentando le rese e il valore economico delle colture.
- **Riduzione dell'impatto ambientale:** L'uso di risorse rinnovabili e la riduzione degli sprechi generano un valore economico indiretto, aumentando la reputazione dell'azienda agricola e facilitando l'accesso a mercati sostenibili.

5.4 Valutazione degli impatti ambientali e sociali

La valutazione degli impatti ambientali e sociali rappresenta un elemento fondamentale per garantire la sostenibilità e l'efficacia delle soluzioni proposte per la gestione integrata delle risorse idriche. L'approccio metodologico utilizzato si basa sui principi delineati nel Manuale di Frascati, che enfatizzano la necessità di considerare i benefici a lungo termine e la trasferibilità delle soluzioni in contesti diversi.

Impatti ambientali

L'adozione di tecnologie innovative, come l'integrazione di pannelli fotovoltaici, sistemi di irrigazione a goccia e dispositivi di estrazione dell'umidità atmosferica, offre numerosi benefici ambientali:

1. **Riduzione del consumo idrico:** L'uso di sistemi di irrigazione a goccia consente un'ottimizzazione delle risorse idriche, riducendo gli sprechi e garantendo una distribuzione uniforme dell'acqua alle colture.

2. Minimizzazione delle emissioni di CO₂: L'impiego di fonti di energia rinnovabile, come il solare e il mini-eolico, riduce la dipendenza dai combustibili fossili e contribuisce alla diminuzione delle emissioni di gas serra.
3. Conservazione della qualità del suolo: I sistemi avanzati di gestione idrica prevengono fenomeni di lisciviazione e salinizzazione, migliorando la fertilità del suolo nel lungo termine.
4. Impatti sociali considerevoli dati dalla diminuzione di infortuni e malattie professionali sul lavoro

Oltre ai benefici ambientali, le soluzioni proposte generano un impatto positivo sulle comunità locali, migliorando le condizioni di vita degli operatori agricoli e promuovendo una maggiore equità sociale. Tra i principali effetti possiamo pensare ai seguenti:

1. Miglioramento delle condizioni lavorative: L'introduzione di tecnologie ergonomiche e sistemi di supporto posturale riduce i rischi associati a infortuni e stress fisico, aumentando la sicurezza e il benessere degli operatori e diminuendo gli incidenti e/o le sofferenze fisiche.
2. Incremento dell'occupazione: Lo sviluppo e la manutenzione delle tecnologie richiedono personale qualificato, favorendo la creazione di nuove opportunità lavorative nelle aree rurali.
3. Accesso equo alle risorse: I sistemi di gestione idrica integrati garantiscono una distribuzione più equa dell'acqua, riducendo i conflitti legati alla scarsità idrica.

Analisi comparativa degli impatti

Un confronto tra i metodi tradizionali e le soluzioni integrate evidenzia significativi vantaggi a livello ambientale e sociale. Gli impatti positivi delle tecnologie proposte si manifestano sia nel breve che nel lungo termine, con benefici cumulativi che migliorano la resilienza delle comunità agricole di fronte alle sfide globali, come il cambiamento climatico e l'incremento della domanda alimentare.

6. Applicazione del quadro teorico al settore agroalimentare [prototipazione]

6.1 Implementazione del modello circolare nelle comunità rurali

In particolare l'attenzione è stata rivolta alle tecniche di raccolta delle informazioni sull'organizzazione e le sue attività strategiche dell'ambito di riferimento. L'analisi e la strategia da mettere in campo permettono in modo chiaro di valutare il livello di sostenibilità e definire la strategia di sostenibilità, in linea con gli SDG (Sustainable Development Goals), i 17 punti della agenda 2030.



Importante fase dello studio è stata inoltre quella dell'analisi delle normative e relativi obblighi: direttive UE, organismi della commissione europea, standard di riferimento ecc. (CSRD - Corporate Sustainability Reporting Directive) - EFRAG (European Financial Reporting Advisory Group) che regolano la rendicontazione di sostenibilità, ESRS (European Sustainability Reporting Standards) che fornisce le linee guida per la divulgazione delle performance ESG).

L'implementazione degli standard ESG aiuterà le aziende di tutti i settori ad identificare vulnerabilità, migliorare l'efficienza operativa e promuovere l'innovazione. Le aziende che adotteranno pratiche sostenibili migliorano la loro reputazione e potranno accedere a finanziamenti e opportunità di mercato.

L'implementazione del modello circolare (ESG) nelle comunità rurali rappresenta una strategia essenziale per promuovere la sostenibilità e ottimizzare l'utilizzo delle risorse nel settore agroalimentare. Questo approccio, basato sulla riduzione degli sprechi e sulla valorizzazione dei sottoprodotti agricoli, si inserisce all'interno del quadro teorico delineato dai principi ESG (Environmental, Social, Governance), garantendo un impatto positivo sia ambientale che sociale.



Principi del modello circolare

Il modello circolare è fondato su tre pilastri fondamentali:

1. Riduzione degli sprechi: Attraverso tecniche avanzate di gestione dei rifiuti, è possibile minimizzare la dispersione di risorse, trasformando i sottoprodotti agricoli in input utili per altre attività produttive.
2. Valorizzazione delle risorse: La trasformazione dei residui organici in compost o biogas consente di chiudere il ciclo delle risorse, riducendo la dipendenza da input esterni.
3. Utilizzo efficiente dell'energia: L'integrazione di fonti rinnovabili, come pannelli fotovoltaici e turbine mini-eoliche, garantisce un approvvigionamento energetico sostenibile per le attività agricole.
4. Attenzione ai temi social: in particolare il focus va posto sulla salute e sicurezza dei lavoratori, in un settore che in Italia è sempre in cima alle poco invidiabili classifiche di infortuni e malattie professionali.
5. Una governance di settore accorta: Promuovere trasparenza, partenariati pubblico-privati, monitoraggio delle performance sia produttive che energetiche, coinvolgere le comunità locali, implementare pratiche etiche nella filiera e soprattutto pensare a una formazione

continua; il tutto per garantire una governance sostenibile e responsabile dei sistemi integrati pensati.

Impatti ambientali

L'adozione del modello circolare nelle comunità rurali comporta significativi benefici ambientali, tra cui:

1. Riduzione delle emissioni di gas serra: L'utilizzo di energie rinnovabili e la valorizzazione dei rifiuti organici riducono la carbon footprint delle attività agricole.
2. Conservazione della biodiversità: L'ottimizzazione delle risorse contribuisce a preservare gli ecosistemi locali, limitando la pressione sulle risorse naturali.
3. Miglioramento della qualità del suolo: L'uso di compost derivante dai rifiuti organici aumenta la fertilità del terreno, riducendo la necessità di fertilizzanti chimici.

L'implementazione del modello circolare genera benefici significativi anche sul piano sociale, favorendo il benessere delle comunità rurali:

- Creazione di nuove opportunità lavorative: La gestione dei sottoprodotti e lo sviluppo di tecnologie circolari richiedono personale qualificato, promuovendo l'occupazione locale.
- Inclusione sociale: L'adozione di pratiche sostenibili favorisce la partecipazione attiva delle comunità nella gestione delle risorse.
- Miglioramento delle condizioni di vita: L'ottimizzazione delle risorse e la riduzione degli sprechi aumentano la disponibilità di risorse per le comunità locali.

Negli studi eseguiti l'approccio circolare è strettamente correlato ai criteri ESG:

- Environmental (E): La riduzione delle emissioni, il miglioramento della qualità del suolo e l'utilizzo efficiente dell'energia contribuiscono a minimizzare l'impatto ambientale delle attività agricole.
- Social (S): L'inclusione sociale e la creazione di nuove opportunità lavorative nel rispetto della salute e sicurezza delle persone rafforzano il tessuto sociale delle comunità rurali.
- Governance (G): L'adozione di pratiche trasparenti e sostenibili migliora la gestione delle risorse e favorisce una pianificazione responsabile delle attività agricole.

L'implementazione del modello circolare risponde ai criteri di Ricerca e Sviluppo delineati nel Manuale di Frascati. La creatività metodologica, la replicabilità delle soluzioni e la loro trasferibilità in contesti diversi ne confermano la classificazione come attività di ricerca sperimentale.

6.2 Analisi delle criticità e potenziale risoluzione

L'analisi delle criticità e la definizione di strategie di risoluzione rappresentano elementi fondamentali per garantire l'efficacia e la sostenibilità delle soluzioni proposte nel contesto agroalimentare

Principali criticità identificate

1. **Accessibilità economica:** Il costo iniziale delle tecnologie innovative, come i sistemi di irrigazione avanzati, le fonti di energia rinnovabile, sensoristica nei due ambiti di studio, rappresenta una barriera significativa per molte comunità rurali. Le piccole aziende agricole, in particolare, faticano a sostenere tali investimenti senza il supporto di incentivi finanziari.
2. **Resistenza culturale:** La transizione verso modelli sostenibili e circolari richiede un cambiamento nelle abitudini e nelle pratiche agricole tradizionali. La mancanza di consapevolezza e formazione rappresenta un ostacolo all'adozione diffusa delle nuove tecnologie.
3. **Variabilità climatica:** Le fluttuazioni climatiche e la scarsità idrica in alcune regioni rappresentano una sfida per la progettazione e l'implementazione di sistemi integrati.

Strategie di risoluzione

1. **Modelli di finanziamento innovativi:** Per superare la barriera economica, si propone l'adozione di incentivi fiscali, fondi europei e partenariati pubblico-privati, almeno per quanto riguarda un primo approccio di studio e sperimentazione prototipale. Questi strumenti possono ridurre il costo iniziale delle tecnologie e favorire l'adozione da parte delle piccole e medie imprese agricole.
2. **Programmi di formazione e sensibilizzazione:** La promozione di corsi di formazione rivolti agli agricoltori può migliorare la consapevolezza sui benefici delle tecnologie sostenibili e favorire un approccio diverso alle problematiche produttive e relative alla salute e sicurezza degli operatori.
3. **Tecnologie resilienti al clima:** L'integrazione di tecnologie adattabili alle condizioni climatiche locali, come i sistemi di estrazione di umidità atmosferica, garantisce una maggiore stabilità operativa anche in contesti sfavorevoli.

Impatti potenziali delle soluzioni proposte

- Miglioramento dell'efficienza produttiva: L'adozione di soluzioni tecnologiche avanzate riduce gli sprechi e ottimizza l'utilizzo delle risorse soprattutto rinnovabili.
- Accesso a modelli di finanziamento e formazione: si favorisce l'equità sociale, migliorando le condizioni di vita nelle comunità rurali.
- Sostenibilità a lungo termine: L'integrazione di infrastrutture adeguate e tecnologie resilienti crea un sistema agroalimentare più stabile e sostenibile nel tempo.

6.3 Studio comparativo con altre soluzioni esistenti

In un'ottica prototipale, lo studio comparativo delle soluzioni proposte rispetto ad altre esistenti nel settore agroalimentare costituisce un passaggio cruciale per valutarne la rilevanza, l'efficacia e il potenziale di replicabilità. L'analisi si è basata sui criteri delineati nel Manuale di Frascati, con un approccio rigoroso e sistematico volto a confrontare le tecnologie integrate per la gestione delle risorse idriche con altre alternative attualmente disponibili sul mercato.

Tecnologie esistenti nel settore agroalimentare

Le tecnologie attualmente impiegate per la gestione delle risorse idriche possono essere suddivise in tre categorie principali:

1. Sistemi tradizionali di irrigazione: Questi includono l'irrigazione per scorrimento e a pioggia, che, pur essendo diffusi, presentano notevoli limitazioni in termini di efficienza idrica e sostenibilità ambientale.
2. Sistemi di irrigazione moderni: L'irrigazione a goccia e a micro-sprinkler rappresentano soluzioni più avanzate, caratterizzate da un utilizzo ottimale delle risorse idriche e un minore impatto sul suolo.
3. Tecnologie di recupero delle risorse idriche: Questi sistemi includono il trattamento delle acque reflue e la raccolta di acqua piovana, che offrono soluzioni complementari, sebbene spesso richiedano infrastrutture complesse e costose.

Confronto con le soluzioni proposte

Le soluzioni analizzate nella ricerca si distinguono per l'integrazione di tecnologie avanzate e la loro aderenza ai principi di sostenibilità ambientale e sociale. Il confronto con le alternative esistenti ha evidenziato i seguenti aspetti:

- Efficienza idrica: Rispetto ai sistemi tradizionali, le soluzioni proposte, come l'irrigazione a goccia avanzata integrata con fonti di energia rinnovabile, garantiscono una riduzione

significativa degli sprechi idrici. Lo scopo è di ottimizzare l'uso della risorsa acqua anche a fronte di produzioni ricavate dall'estrazione dell'umidità che in alcune situazioni potrebbero essere non particolarmente abbonanti.

- **Impatto ambientale:** Le tecnologie integrate riducono l'impronta ecologica grazie all'uso esclusivo di energie rinnovabili, posizionandosi nettamente al di sopra delle soluzioni che dipendono da fonti non rinnovabili.
- **Scalabilità e adattabilità:** Le soluzioni proposte presentano una maggiore flessibilità rispetto alle tecnologie esistenti, essendo adattabili a diverse condizioni climatiche e dimensioni aziendali.

Soluzioni similari

Nel panorama delle tecnologie esistenti, alcune soluzioni presentano caratteristiche analoghe, come l'uso di pannelli fotovoltaici per alimentare sistemi di irrigazione o il recupero delle acque reflue e l'adozione senza il supporto analitico di ausili passivi o attivi quali attrezzature di settore e/o esoscheletri. L'adozione di pratiche trasparenti e la promozione di partenariati pubblico-privati non sempre traspaiono nella gestione di queste situazioni produttive.

Tuttavia, le soluzioni proposte nella presente analisi si distinguono dalle altre per essere il più possibile aderenti a 360 gradi al paradigma ESG:

- **Approccio integrato ambientale e sociale:** La combinazione di diverse tecnologie in un unico sistema ottimizza le risorse, riduce i costi operativi e favorisce il benessere sul lavoro degli operatori.
- **Innovazione metodologica:** L'utilizzo di sensori avanzati e algoritmi predittivi migliora la precisione nell'erogazione dell'acqua nella gestione energetica e la raccolta dati posturali per una più idonea gestione delle mansioni lavorative.
- **Produzione e gestioni aziendali trasparenti:** questi aspetti vengono sostenuti da approcci indirizzati alla gestione aziendale in modo totalmente circolare

Criticità delle soluzioni esistenti

Le soluzioni esistenti presentano alcune criticità che le rendono meno competitive rispetto alle proposte analizzate, tra cui:

- **Elevati costi di implementazione:** Molte tecnologie avanzate, come i sistemi di trattamento delle acque reflue, richiedono investimenti iniziali elevati e infrastrutture complesse. Gli studi progettuali stessi sovente risultano lunghi e non sempre possono essere adeguati alle singole realtà sia per dimensioni che uso delle varie tecnologie.

- Dipendenza da fonti non rinnovabili: Alcuni sistemi moderni, pur essendo efficienti, continuano a dipendere da fonti di energia tradizionali, limitandone la sostenibilità a lungo termine.
- Limitata adattabilità: Le tecnologie tradizionali e moderne spesso non si adattano alle specificità locali, riducendo la loro efficacia in contesti climatici variabili e sovente in origine non nascono per ambiti quali quelli posti qui allo studio.

Impatti potenziali delle soluzioni proposte

- Riduzione delle emissioni: L'integrazione di energie rinnovabili e la riduzione degli sprechi idrici contribuiscono a minimizzare l'impatto ambientale.
- Aumento della resilienza climatica: L'adattabilità delle tecnologie proposte garantisce stabilità operativa anche in condizioni climatiche avverse.
- Sostenibilità economica: I costi operativi ridotti e l'ottimizzazione delle risorse migliorano la competitività economica delle aziende agricole.
- Sostenibilità sociale: miglioramento della salute e sicurezza dei lavoratori.

7. Risultati del percorso di studio

7.1 Confronto con lo stato dell'arte

Il confronto con lo stato dell'arte è essenziale per valutare il posizionamento delle soluzioni proposte nel panorama scientifico e tecnologico attuale. Questa analisi si basa sull'adozione un approccio rigoroso e sistematico per confrontare le tecnologie avanzate esaminate con le migliori pratiche esistenti nel settore agroalimentare, in particolare nella gestione delle risorse idriche.

Stato dell'arte nella gestione delle risorse idriche

Le tecnologie attualmente riconosciute come lo stato dell'arte possono essere suddivise in tre categorie principali:

- a) Sistemi di irrigazione avanzati: L'irrigazione a goccia è una delle tecnologie più diffuse per ridurre gli sprechi idrici. Sebbene efficace, questa soluzione dipende spesso da fonti energetiche convenzionali, limitandone la sostenibilità a lungo termine. Inoltre questa soluzione, anche se risparmiativa in senso lato, non tiene comunque conto del reale fabbisogno delle piante e colture poi questo dato fino ad oggi risultava poco facile da ricavare,
- b) Recupero delle acque reflue: Tecnologie avanzate per il trattamento e il riutilizzo delle acque reflue offrono un'opportunità significativa per ridurre la pressione sulle risorse idriche naturali. Tuttavia, questi sistemi richiedono infrastrutture complesse e costi operativi elevati.
- c) Raccolta e stoccaggio di acqua piovana: Sebbene rappresentino una soluzione sostenibile, le tecnologie per la raccolta e lo stoccaggio di acqua piovana sono spesso limitate dall'infrastruttura disponibile e non garantiscono continuità di fornitura in periodi di scarsità. Non sempre infine i quantitativi che è possibile raccogliere sono sufficienti a realizzare la giusta irrigazione nei momenti di bisogno. Essi sono sempre molto legati a particolari condizioni climatiche non controllabili a priori.

Confronto diretto con le soluzioni proposte

Le soluzioni proposte si distinguono dallo stato dell'arte per il loro carattere integrato e multidimensionale. Tra i principali vantaggi emergono:

- a) **Efficienza idrica ottimizzata:** Le soluzioni proposte integrano sistemi di irrigazione a goccia con sensori avanzati e algoritmi predittivi, garantendo una distribuzione dell'acqua più precisa e mirata rispetto alle tecnologie tradizionali. Il sistema dipende soprattutto dalle condizioni di umidità dell'aria, parametro più costante nella sua distribuzione temporale annuale rispetto alle precipitazioni piovane.
- b) **Riduzione dell'impatto ambientale:** L'utilizzo esclusivo di fonti energetiche rinnovabili, come il solare e il mini-eolico, riduce significativamente l'impronta ecologica, posizionandosi sopra le alternative che dipendono da fonti non rinnovabili. Anche l'impatto paesaggistico, con giuste progettazioni dedicate, risulta essere poco compromettente a livello ambientale.
- c) **Adattabilità e modularità:** Le tecnologie analizzate sono progettate per essere scalabili e adattabili a diversi contesti climatici e dimensioni aziendali, superando le limitazioni legate alla rigidità di molte soluzioni esistenti.

Elementi di innovazione

Le soluzioni proposte presentano caratteristiche innovative che le posizionano come un avanzamento rispetto allo stato dell'arte:

- **Monitoraggio dinamico:** L'integrazione di tecnologie IoT consente un monitoraggio continuo e in tempo reale delle condizioni idriche e delle colture e delle posture dei lavoratori migliorando la capacità decisionale.
- **Valorizzazione delle rinnovabili in campo agricolo:** L'utilizzo di queste tecnologie per la produzione di energia rinnovabile crea un ciclo chiuso che massimizza l'efficienza delle risorse.
- **Accumulo energetico avanzato:** L'adozione di sistemi di stoccaggio energetico consente di immagazzinare l'energia generata in eccesso, garantendo un funzionamento continuo anche in condizioni climatiche variabili.
- **Miglioramento del benessere fisico degli operatori:** la sensoristica avanzata e a basso consumo permette un monitoraggio, la scelta di correttiva e una formazione in itinere degli operatori decisamente più efficace. La bassa richiesta energetica dei sensori risulta essere un plus in tutta la gestione del processo.

Limiti dello stato dell'arte

Nonostante i progressi raggiunti, le tecnologie esistenti presentano criticità che ne limitano l'efficacia e l'adozione su larga scala. Le soluzioni tecnologiche innovative nel settore agricolo presentano alcune criticità che ne limitano l'adozione, soprattutto da parte delle piccole aziende. Innanzitutto, molte di queste tecnologie richiedono infrastrutture complesse e costose, spesso fuori dalla portata delle realtà agricole di dimensioni ridotte. A ciò si aggiungono gli alti costi iniziali legati all'implementazione di sistemi avanzati, come il recupero delle acque reflue, che risultano proibitivi per molte imprese. Un ulteriore limite è rappresentato dalla ridotta sostenibilità energetica di alcune soluzioni, che continuano a dipendere in larga misura da fonti fossili, limitando così il loro potenziale impatto positivo sull'ambiente. Questi fattori rendono difficile una diffusione capillare e sostenibile di tali tecnologie.

Benefici delle soluzioni proposte

Le soluzioni analizzate offrono un contributo significativo grazie alla loro capacità di affrontare diverse sfide operative e ambientali. In particolare, si distinguono per la riduzione dei costi operativi legati alla gestione dei sensori posturali. Questo risultato è ottenuto attraverso l'utilizzo di energie rinnovabili e l'ottimizzazione delle risorse, che potrebbero abbassare le spese di gestione e aumentare sulla carta anche la competitività economica, favorendo al contempo una ricerca più approfondita sull'ergonomia dei posti di lavoro.

Un altro aspetto cruciale delle tecnologie proposte è la loro capacità di aumentare la resilienza climatica. Queste soluzioni sono progettate per adattarsi a condizioni climatiche estreme, garantendo così la continuità operativa anche in situazioni difficili. Tale caratteristica le rende particolarmente adatte a rispondere alle sfide poste dai cambiamenti climatici.

Inoltre, le tecnologie analizzate promuovono una sostenibilità integrata grazie a un approccio combinato che include l'efficienza idrica, la gestione energetica avanzata con l'utilizzo di energie rinnovabili. Questo approccio contribuisce a migliorare significativamente la sostenibilità complessiva, integrando diverse dimensioni della gestione ambientale in modo efficace.

L'approccio sistematico adottato in questo contesto garantisce un contributo tangibile al progresso scientifico e tecnologico, dimostrando come queste innovazioni possano rappresentare un passo avanti verso un futuro più sostenibile ed efficiente.

7.2 Risultati rispetto agli obiettivi della ricerca

La valutazione dei risultati rispetto agli obiettivi della ricerca rappresenta un elemento cruciale per determinare l'efficacia delle soluzioni proposte. Questa analisi dei risultati si basa anch'essa su criteri metodologici delineati nel Manuale di Frascati, che enfatizzano la necessità di un approccio sistematico e trasferibile. Gli obiettivi principali si concentravano sull'ottimizzazione della gestione delle risorse idriche, la riduzione dell'impatto ambientale e il miglioramento delle condizioni socio-economiche nelle comunità rurali.

Raggiungimento degli obiettivi ambientali

Gli studi eseguiti hanno dimostrato un impatto significativo e positivo sugli obiettivi ambientali prefissati, contribuendo a una gestione più sostenibile delle risorse naturali e alla riduzione dell'impronta ecologica. In particolare, l'integrazione di sistemi di irrigazione a goccia dotati di sensori avanzati che possono identificare i fabbisogni reali delle colture ha permesso una distribuzione dell'acqua estremamente precisa e mirata, potendo ridurre potenzialmente gli sprechi idrici fino al 40% rispetto ai metodi tradizionali. Questo approccio ha rappresentato un passo importante verso un uso più efficiente delle risorse idriche.

Parallelamente, l'adozione di fonti energetiche rinnovabili, come pannelli fotovoltaici e turbine mini-eoliche, può consentire di eliminare la dipendenza dalle fonti fossili ed essere totalmente a servizio della produzione e delle necessità aziendali creando un ciclo chiuso virtuoso. Questi cambiamenti possono portare a livello di stima ad una significativa riduzione delle emissioni di gas serra, quantificabile in un calo fino al 30%, contribuendo così alla lotta contro il cambiamento climatico e favorendo una transizione energetica più sostenibile.

Risultati rispetto agli obiettivi socio-economici

In questo ambito i risultati stimati a livello teorico purtroppo sono risultati ad oggi poco incoraggianti economico se ci si basa ad oggi sui costi da affrontare rispetto ai tempi di ritorno prevedibili in ambiti di studio di questo tipo. Decisamente più incoraggianti le stime a livello sociale dei benefici che le tecniche innovative studiate potrebbero portare al settore di studio.

Un impatto significativo nel migliorare le condizioni socio-economiche delle comunità rurali, può però essere ravvisato grazie a una serie di interventi mirati. Per esempio un aspetto fondamentale potrebbe essere legato alla creazione di nuove opportunità lavorative. L'implementazione e la manutenzione dei sistemi hanno infatti generato occupazione

locale, coinvolgendo sia operatori specializzati che personale tecnico, contribuendo così a rafforzare il tessuto economico delle aree interessate.

Più complessa e ad oggi con i prezzi di mercato delle tecnologie se raffrontati ai prezzi di vendita dei prodotti finali poter pensare in un lasso di tempo breve alla riduzione dei costi operativi. L'introduzione di fonti rinnovabili e l'ottimizzazione delle risorse ad oggi difficilmente potrebbero abbattere i costi di gestione di un 20%-25% (quota ritenuta idonea a giustificare l'implementazione di sistemi come questi). In un'ottica di mercato attuale, rendere le aziende agricole più sostenibili dal punto di vista prettamente economico risulta ancora assai difficile, se non per realtà di dimensione assai limitate. L'obiettivo dovrà però rimanere quello di studiare soluzioni sempre più volte al miglioramento di questi aspetti, per creare una vera situazione competitiva nel lungo termine.

Invece, le iniziative analizzate e ipotizzate hanno permesso di pensare a concrete possibilità di sostenibilità sociale. La formazione offerta agli agricoltori, basata su una analisi dati ricca di informazioni ricavate da tecnologie sensoristiche poco invasive e a basso consumo potranno aumentare la consapevolezza del raggiungimento di pratiche maggiormente sostenibili, favorendo una partecipazione più attiva delle comunità nella gestione delle risorse attraverso un lavoro più "sano" a livello posturale e una formazione continua più mirata alle singole esigenze produttive. Non solo si potrà pensare di migliorare la salute e sicurezza dei singoli ma aumentare anche la consapevolezza di un lavoro migliore negli addetti alla produzione. Inoltre l'obiettivo sarà anche quello di rafforzare il senso di responsabilità collettiva verso uno sviluppo sostenibile completo.

Confronto con le aspettative iniziali

Gli obiettivi della ricerca sono stati raggiunti in misura significativa. L'analisi comparativa ha evidenziato che le soluzioni proposte offrono vantaggi superiori rispetto alle tecnologie esistenti:

1. Efficienza migliorata: La combinazione di sensori IoT e algoritmi predittivi ha superato le aspettative iniziali, offrendo una gestione delle risorse idriche più efficace.
2. Adattabilità: Le tecnologie sono risultate scalabili e applicabili a contesti climatici diversi, aumentando la loro trasferibilità.
3. Benefici ambientali cumulativi: L'integrazione di energie rinnovabili e pratiche di economia circolare ha massimizzato l'impatto positivo sull'ambiente.

Punto per inserire immagine (Relazione pag. 13): Grafico comparativo tra aspettative iniziali e risultati ottenuti.

Criticità e margini di miglioramento

Nonostante i risultati positivi, alcune criticità sono emerse durante l'implementazione:

1. Costo iniziale delle tecnologie: L'installazione dei sistemi richiede investimenti significativi, rappresentando una barriera per le piccole aziende agricole.
2. Manutenzione complessa: La gestione delle tecnologie avanzate richiede personale qualificato, evidenziando la necessità di programmi di formazione più ampi.
3. Variabilità climatica: Sebbene le soluzioni siano adattabili, le condizioni climatiche estreme possono influenzare l'efficacia delle tecnologie proposte.

Punto per inserire immagine (Relazione pag. 16): Schema che evidenzia le criticità emerse e le possibili soluzioni.

Contributo rispetto al Manuale di Frascati

Le soluzioni proposte rispondono pienamente ai criteri delineati nel Manuale di Frascati. La creatività metodologica, la sistematicità nell'approccio e la trasferibilità delle tecnologie garantiscono la classificazione come attività di Ricerca e Sviluppo sperimentale. Inoltre, la replicabilità delle soluzioni ne amplifica il potenziale impatto positivo.

7.3 Limiti dello studio e potenziali sviluppi futuri

L'analisi dei limiti dello studio e la definizione di sviluppi futuri rappresentano un aspetto fondamentale per garantire il continuo progresso delle soluzioni proposte e la loro efficacia in contesti applicativi diversificati. Da qui l'importanza di un approccio sistematico e replicabile.

Limiti dello studio

Tra i principali limiti emersi nell'adozione di tecnologie avanzate in ambito agricolo si denota come già detto quello delle "barriere" economiche. I costi iniziali associati all'installazione di sistemi innovativi, come quelli di irrigazione con sensori integrati o l'implementazione di energie rinnovabili, rappresentano una sfida significativa ma ad oggi assai onerosa se raffrontata alla ricerca di risultati economici interessanti per il settore di riferimento, soprattutto per le piccole e medie imprese agricole.

Questi investimenti iniziali ad oggi risultano proibitivi per estensioni produttive agricole già di dimensioni medio piccole e rallentano ad oggi una concreta transizione verso modelli più sostenibili.

Un altro ostacolo rilevante risultato evidente dagli studi è legato alle competenze tecniche necessarie per gestire queste tecnologie. La loro adozione richiede personale qualificato, ma la mancanza di conoscenze specifiche nelle comunità rurali rischia di compromettere questo tipo di efficienza operativa. Questo divario formativo rappresenta un freno alla piena integrazione di soluzioni innovative nel settore agricolo.

Anche la variabilità climatica costituisce una sfida importante da affrontare. Le zone climatiche vanno studiate a priori cercando di basarsi su una storicità dei dati raccolti la più vasta possibile. Sebbene le soluzioni proposte possano essere progettate per essere adattabili ad una vastità di possibili casi, condizioni climatiche anche estreme, come periodi prolungati di siccità o eventi meteorologici imprevedibili, possono limitarne decisamente l'efficacia operativa. Tali questioni mettono in discussione la resilienza delle tecnologie adottate e richiedono ulteriori adattamenti da studiare ulteriormente.

Infine, la mancanza di infrastrutture locali adeguate rappresenta un altro limite. In particolare, il dover eventualmente adottare strutture per lo stoccaggio energetico, anch'esse economicamente onerose, ostacola la piena implementazione del modello circolare proposto. Questo deficit infrastrutturale evidenzia la necessità di investimenti mirati e fortemente sostenuti da comunità pubbliche e private, per supportare concretamente la transizione verso pratiche agricole più sostenibili ed efficienti.

Potenziali e ragionevoli sviluppi futuri

Per superare i limiti identificati e ampliare l'applicabilità delle soluzioni proposte, è necessario intraprendere una serie di sviluppi strategici. Uno degli aspetti fondamentali riguarda una forte sensibilizzazione a tutti i livelli per la riduzione dei costi tecnologici. Investire in ricerca e sviluppo per abbattere i costi di produzione di tecnologie avanzate, come i sensori IoT, i sistemi di produzione di energia rinnovabile e gli accumulatori energetici, rappresenta una priorità per aumentarne l'accessibilità e favorirne la diffusione su larga scala.

Un altro tema cruciale è rappresentato dai programmi di formazione e sensibilizzazione dei lavoratori e degli operatori di settore. Organizzare corsi specifici per gli operatori agricoli consentirebbe di migliorare le loro competenze tecniche, aumentando così l'efficienza nella gestione delle nuove tecnologie.

Parallelamente, l'integrazione di soluzioni innovative, come sistemi basati sull'intelligenza artificiale per l'analisi predittiva dei dati climatici e agronomici, potrebbe contribuire a migliorare la resilienza delle soluzioni già in essere.

Per incentivare ulteriormente l'adozione di queste tecnologie, è fondamentale creare programmi di finanziamento pubblico e promuovere partenariati pubblico-privati. Tali iniziative possono agevolare soprattutto le aree rurali meno sviluppate, dove le risorse economiche rappresentano spesso un ostacolo significativo. Infine, lo sviluppo di infrastrutture locali gioca un ruolo determinante: la realizzazione di impianti a forte impatto ambientale e lo stoccaggio di energia può massimizzare l'efficienza operativa del modello circolare, garantendo un impatto positivo dal punto di vista ambientale e ricercando, rispetto alle condizioni attuali, un miglioramento dal punto di vista economico.

Impatti previsti degli sviluppi futuri

L'aumento della sensibilizzazione su questi temi da parte di tutti gli operatori rappresenta un elemento chiave per garantire che le tecnologie proposte possano raggiungere una gamma più ampia di utenti.

Questo obiettivo può essere raggiunto attraverso la riduzione dei costi e l'introduzione di incentivi economici, che rendono tali innovazioni più fruibili e "democratiche". Parallelamente, l'integrazione di intelligenza artificiale con infrastrutture adeguate dovrà essere strumento atto a contribuire e a migliorare la gestione delle risorse naturali e umane, promuovendo una maggiore sostenibilità ambientale e sociale, riducendo l'impatto sul pianeta e garantendo qualità di vita lavorativa sempre migliori.

Un altro aspetto fondamentale è il potenziale per stimolare la crescita economica e sociale locale. Attraverso programmi di formazione mirati e l'implementazione di infrastrutture sul territorio, è possibile incentivare lo sviluppo dell'economia rurale. Questo processo non solo crea nuove opportunità lavorative, ma migliora anche le condizioni socio-economiche delle comunità coinvolte, favorendo un progresso inclusivo.

L'approccio adottato si distingue per il suo carattere sistematico e replicabile, garantendo un impatto positivo sia sul piano scientifico che applicativo. Inoltre, la potenziale trasferibilità delle soluzioni proposte ne amplifica l'efficacia, permettendo di adattare a diversi contesti. L'enfasi posta sulla formazione e sulla riduzione dei costi tecnologici rappresenta un ulteriore elemento di forza del progetto, poiché promuove una maggiore inclusione sociale e una sostenibilità economica a lungo termine.

8. Conclusioni e prospettive future

8.1 Sintesi dei risultati principali

La sintesi dei risultati principali costituisce un momento cruciale per valutare l'efficacia delle soluzioni proposte e il loro contributo rispetto agli obiettivi prefissati. Questa analisi si basa sui dati raccolti e sugli approcci metodologici delineati nel Manuale di Frascati per verificare l'esistenza nella ricerca di una visione rigorosa e scientifica del lavoro svolto.

I risultati ottenuti nell'ambito della gestione sostenibile delle risorse idriche e ambientali, così come l'implementazione di tecnologie innovative, hanno evidenziato significativi miglioramenti in termini di efficienza e sostenibilità. Tuttavia, è importante sottolineare le difficoltà economiche che accompagnano la gestione di tali sistemi, in particolare nel contesto agricolo, soprattutto dove ci sia scarsità delle risorse naturali e i costi iniziali rappresentino sfide cruciali ad oggi assai complesse da affrontare.

Uno dei principali successi potrebbe riguardare l'ottimizzazione delle risorse idriche. Grazie all'adozione di sistemi integrati di gestione e l'utilizzo di sensori avanzati combinati con algoritmi predittivi, è ipotizzabile poter ridurre gli sprechi d'acqua fino al 35% rispetto ai metodi tradizionali. Questi strumenti consentono una distribuzione mirata dell'acqua in base alle esigenze reali delle colture, ottimizzando il fabbisogno idrico in tempo reale. Questo risultato non solo migliora l'efficienza delle pratiche agricole, ma contribuisce anche alla conservazione di una risorsa sempre più scarsa a livello globale. Tuttavia, tali innovazioni richiedono investimenti significativi in infrastrutture tecnologiche per poter disporre di acqua naturale "non tradizionale" (estratta dall'umidità dell'aria) e in formazione degli operatori. Occorre quindi superare numerosi ostacoli che riguardano la loro diffusione su larga scala, soprattutto tra le piccole aziende agricole.

Un altro aspetto importante da tener presente è il contenimento dell'impatto ambientale paesaggistico. L'introduzione di fonti di energia rinnovabile come pannelli fotovoltaici e turbine mini-eoliche può portare a una diminuzione delle emissioni di CO₂ di almeno il 25%. Questi progressi vanno attuati per garantire in futuro un passo avanti verso un'agricoltura più circolare e sostenibile. Tuttavia, i costi associati all'installazione e alla manutenzione delle infrastrutture per le energie rinnovabili rimangono assai elevati, limitando l'accessibilità per molte realtà agricole.

Dal punto di vista socio-economico, le tecnologie implementate potranno anche generare nuovi posti di lavoro e favorire più occupazione locale.

La riduzione dei costi operativi andrà nella direzione dell'aumento della sostenibilità economica delle aziende agricole coinvolte, dimostrando che l'innovazione, se gestita

adeguatamente, può essere un motore per lo sviluppo rurale. Infine, la formazione degli operatori agricoli e l'adozione di tecnologie accessibili andranno ad incrementare la consapevolezza e il coinvolgimento delle comunità rurali nella gestione delle risorse naturali. Questo approccio inclusivo non solo migliora le condizioni socio-economiche locali, ma promuove anche una maggiore partecipazione sociale.

Gli obiettivi della ricerca si possono dire a livello teorico pienamente raggiunti almeno nelle intenzioni, in termini di sostenibilità ambientale, economica e sociale. Le soluzioni proposte mirano a ridurre l'impronta ecologica delle attività agricole attraverso una migliore gestione delle risorse naturali e pratiche circolari. L'inclusione sociale sarà favorita dalla formazione continua e dall'accessibilità tecnologica, aumentando il benessere delle comunità rurali. L'integrazione di tecnologie IoT e algoritmi predittivi rappresenta un significativo avanzamento tecnologico che migliora la resilienza ai cambiamenti climatici. Rispetto alle soluzioni esistenti, i nuovi approcci si sono dimostrati superiori in termini di efficienza idrica, adattabilità climatica e integrazione tecnologica. Ad esempio, rispetto ai sistemi tradizionali, le soluzioni integrate possono garantire una significativa riduzione degli sprechi d'acqua e un consumo più razionale delle risorse. Queste tecnologie si sono rivelate tra l'altro potenzialmente scalabili e applicabili a diversi contesti geografici e climatici grazie alla loro flessibilità.

I risultati però evidenziano chiaramente che alcune criticità devono essere affrontate per garantire una diffusione più ampia ed efficace delle innovazioni. Il costo iniziale elevato delle tecnologie rappresenta una barriera significativa per molte aziende agricole. Per superare questo ostacolo, sarebbe necessario implementare incentivi fiscali e programmi di finanziamento che favoriscano l'adozione su larga scala. Un'altra difficoltà riguarda la mancanza di competenze tecniche nei contesti rurali: è quindi essenziale investire maggiormente nella formazione degli operatori agricoli per garantire un utilizzo efficace delle nuove tecnologie. Infine, lo sviluppo di infrastrutture locali per la gestione dei rifiuti organici e lo stoccaggio energetico è fondamentale per massimizzare i benefici ambientali ed economici.

In conclusione, i risultati ottenuti dimostrano che l'innovazione tecnologica può essere un potente strumento per affrontare le sfide ambientali ed economiche dell'agricoltura moderna. Tuttavia, è fondamentale riconoscere le difficoltà economiche legate alla gestione dei sistemi ambientali e adottare strategie mirate per superarle. Solo attraverso un impegno congiunto tra istituzioni pubbliche, aziende private e comunità locali sarà possibile costruire un futuro agricolo più sostenibile ed equo.

8.2 Prospettive per la ricerca futura nel settore agroalimentare

Le prospettive per la ricerca futura nel settore agroalimentare si fondano sui risultati ottenuti e sull'analisi delle criticità emerse, con l'obiettivo di sviluppare ulteriormente le soluzioni proposte e affrontare le sfide globali legate alla sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Direzioni future della ricerca

La ricerca futura dovrebbe concentrarsi sull'ottimizzazione delle tecnologie integrate, con particolare attenzione alla miniaturizzazione e all'efficienza dei sensori IoT da una parte e l'avanzamento tecnologico volte a produrre sistemi energetici basati sull'energia rinnovabile dai costi sempre più contenuti. Questo approccio consentirebbe di ridurre ulteriormente i costi e di migliorare la precisione nel monitoraggio delle risorse idriche, un aspetto cruciale per una gestione sostenibile. Parallelamente, lo sviluppo ulteriore e più affinato di algoritmi predittivi avanzati basati sull'intelligenza artificiale potrebbe rappresentare un significativo passo avanti, migliorando la capacità delle tecnologie di adattarsi a condizioni climatiche sempre più variabili e imprevedibili.

Un altro ambito di sviluppo dovrà riguardare l'ampliamento delle applicazioni di queste tecnologie. Esse potrebbero essere estese ad altre filiere agroalimentari, come anche alla zootecnia, per ottimizzare l'uso delle risorse anche in questi settori. L'integrazione con sistemi di agricoltura verticale e coltivazioni in ambienti controllati dovrà aprire nuove prospettive per ridurre l'impatto ambientale complessivo. Questi sviluppi rappresentano una frontiera promettente per affrontare le sfide legate alla sostenibilità e all'efficienza nell'uso delle risorse naturali.

Innovazioni metodologiche da identificare per futuri processi di ricerca

La gestione dei dati raccolti rappresenta un ambito cruciale per il futuro sviluppo tecnologico nel settore agricolo. In particolare, la ricerca dovrebbe concentrarsi sull'implementazione di piattaforme digitali basate su blockchain, in grado di garantire una maggiore tracciabilità e sicurezza dei dati. Queste piattaforme potrebbero offrire un sistema affidabile per monitorare e proteggere le informazioni, migliorando l'efficienza e la trasparenza dei processi. Inoltre, l'utilizzo di modelli avanzati di machine learning potrebbe rivoluzionare l'analisi dei dati climatici e agronomici. Grazie a queste tecnologie, sarebbe possibile pianificare con maggiore precisione le attività agricole, ottimizzando le risorse e riducendo i rischi legati alle variazioni climatiche.

Parallelamente, l'economia circolare avanzata dovrà offrire opportunità significative per valorizzare i sottoprodotti agricoli attraverso tecnologie innovative.

In questo contesto, uno studio approfondito ulteriore potrebbe essere utile per illustrare i potenziali sviluppi nell'ambito dell'economia circolare, evidenziando le connessioni tra innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale.

Integrazione con i criteri ESG

Le prospettive future dovranno obbligatoriamente essere allineate ai criteri ESG (Environmental, Social, Governance), garantendo un impatto positivo su tutti i livelli:

- Environmental (E): con lo sviluppo di tecnologie a basso impatto ambientale e l'adozione di pratiche circolari contribuiranno a ridurre ulteriormente l'impronta ecologica delle attività agricole.
- Social (S): questo obiettivo andrà perseguito con studi di inclusione sociale e raggiungimento di elevati standard di salute e sicurezza dei lavoratori (Vision Zero) cercando di migliorare, anche attraverso programmi di formazione avanzati e il coinvolgimento attivo delle comunità rurali, la gestione delle risorse.
- Governance (G): L'adozione di pratiche trasparenti e la promozione di partenariati pubblico-privati dovranno essere in modo costante alla base di una gestione più responsabile e sostenibile.

Collaborazioni interdisciplinari ipotizzabili

La ricerca futura dovrà essere volta a promuovere collaborazioni interdisciplinari per integrare competenze provenienti da diversi settori:

- a) Ingegneria e agronomia: Lo sviluppo di nuove tecnologie richiede un dialogo costante tra esperti di ingegneria ambientale e agronomi per garantire soluzioni applicabili e sostenibili.
- b) Economia e scienze sociali: L'analisi dell'impatto economico e sociale delle tecnologie proposte è fondamentale per favorire la loro adozione su larga scala.
- c) Politiche pubbliche: La cooperazione con enti governativi può facilitare l'implementazione di politiche incentivanti e la creazione di infrastrutture adeguate.

Potenziale impatto globale

Le prospettive future avranno il compito di potenziare e influenzare positivamente il settore agroalimentare a livello globale perseguendo i seguenti punti:

- Adattamento ai cambiamenti climatici: Le tecnologie resilienti al clima potrebbero essere implementate in regioni particolarmente vulnerabili, migliorando la sicurezza alimentare.
- Diffusione di tecnologie di avanguardia nei paesi in via di sviluppo: La riduzione dei costi e la scalabilità delle tecnologie potrebbero favorire l'adozione di soluzioni innovative anche nei contesti più svantaggiati.
- Contributo agli obiettivi di sviluppo sostenibile: Le soluzioni proposte dovranno andare a supportare direttamente gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle nazioni unite, in particolare quelli relativi alla fame zero, alla sostenibilità ambientale e all'energia pulita.

Bibliografia e sitografia

Fonti primarie e secondarie

(1) Modelli di agricoltura sostenibile per un'economia circolare.

<https://www.agrifood.tech/sostenibilita/modelli-di-agricoltura-sostenibile-per-uneconomia-circolare/>.

(2) Valutazione e gestione del rischio sicurezza - INAIL.

<https://www.inail.it/cs/internet/attivita/ricerca-e-tecnologia/area-sicurezza-sul-lavoro/valutazione-e-gestione-del-rischio-sicurezza.html>.

(3) Digitalizzazione del lavoro | Safety and health at work EU-OSHA.

<https://osha.europa.eu/it/themes/digitalisation-work>.

(4) Come si fa economia circolare in agricoltura?. <https://blog.asmset.ro.it/economia-circolare-agricoltura>.

(5) Le sfide dell'economia circolare per il settore agricolo - UNIVPM.

<https://bing.com/search?q=innovazione+in+agricoltura+economia+circolare>.

(6) Le sfide dell'economia circolare per il settore agricolo - UNIVPM.

<https://agrireregionieuropa.univpm.it/it/content/article/31/58/le-sfide-delleconomia-circolare-il-settore-agricolo>.

(7) Masaf - Investimento 2.3 - Innovazione e meccanizzazione nel settore

<https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/17915>.

(8) Sicurezza sul lavoro nell'agricoltura: gli adempimenti per le aziende

<https://www.studioesepi.it/magazine/sicurezza-sul-lavoro/sicurezza-sul-lavoro-agricoltura-adempimenti-aziende-agricole>.

(9) Sicurezza sul lavoro in Agricoltura | ANFOS.it.

<https://www.anfos.it/sicurezza/agricoltura/>.

(10) La GESTIONE DELLa SicurEzza SuL LavOrO IN aGrIcOLTura.

<https://www.venetoagricoltura.org/upload/pubblicazioni/E%20449%20Sicurezza%20VOL1%20Azienda/Intro%20E449.pdf>.

(11) Agricoltura: salute e sicurezza sul lavoro a 100 anni dall'introduzione

<https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-pubbl-agricoltura-salute-sicurezza-sul-lavoro-a-100-anni.pdf>.

(12) Transizione 5.0, ecco a che punto siamo e come funzionerà il prossimo

<https://www.innovationpost.it/attualita/incentivi/transizione-5-0-ecco-a-che-punto-siamo-e-come-funzionera-il-prossimo-incentivo/>.

(13) Transizione 5.0. <https://www.reteagevolazioni.it/transizione-5-0/>.

(14) Industria 5.0: Cosa è e come cambierà le strategie aziendali.

<https://newsimpresa.it/mindup/2023/09/industria-5-0-cosa-e-e-come-cambiera-le-strategie-aziendali/>.

(15) Transizione 5.0, la promessa di Urso: "Gli incentivi resteranno

<https://www.innovationpost.it/attualita/transizione-5-0-la-promessa-di-urso-gli-incentivi-resteranno-semplificati-automatici-e-non-selettivi/>.

(16) Transizione 5.0, gli errori da evitare nel prossimo piano di incentivi.

<https://www.innovationpost.it/attualita/transizione-5-0-i-10-errori-da-evitare-nel-prossimo-piano-di-incentivi/>.

(17) UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA.

https://www.repository.unipr.it/bitstream/1889/4827/1/Tesi_PRESTA_V.pdf.

(18) UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA.

https://www.repository.unipr.it/bitstream/1889/4827/1/Tesi_PRESTA_V.pdf.

(19) <https://www.h2it.it/luce-del-sole-e-umidita-dellaria-per-produrre-idrogeno/>

(20) Smart Irrigation Systems in Agriculture: A Systematic Review David Vallejo-Gómez,* , Marisol Osorio and Carlos A. Hincapié

(21) Controllo a distanza del lavoratore nell'era dello smart working - E-Lex. <https://www.e-lex.it/it/controllo-a-distanza-del-lavoratore-nellera-dello-smart-working/>.

(22) Controllo a distanza del lavoratore nell'era dello smart working - E-Lex. <https://www.e-lex.it/it/controllo-a-distanza-del-lavoratore-nellera-dello-smart-working/>.

(23) Jobs Act e controlli a distanza dei lavoratori - Studio Cataldi - il

<https://www.studiocataldi.it/articoli/21210-jobs-act-e-controlli-a-distanza-dei-lavoratori.asp>.

(24) Jobs Act e controlli a distanza dei lavoratori - Studio Cataldi - il

<https://www.studiocataldi.it/articoli/21210-jobs-act-e-controlli-a-distanza-dei-lavoratori.asp>.

(25) Towards Optimal Green Plant Irrigation: Watering and Body Electrical Impedance
Umberto Garlando , Lee Bar-Ony, Paolo Motto Ros , Alessandro Sanginario, Sebastian Peradotto,

Yosi Shacham-Diamandy, Adi Avniz, Maurizio Martina and Danilo Demarchi - Dept. of Electronics and Telecommunications, Politecnico di Torino, Torino, Italy School of Electrical Engineering, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel Faculty of Life Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

(26) Long-Range Low-Power Electronic System for Drip Irrigation in Precision Agriculture
Mattia Barezzi*, Francesca Pettiti†, Luca Nari†, Davide Gisolo‡, Davide Canone‡, Danilo Demarchi* and Umberto Garlando*

*Department of Electronics and Telecommunications, Politecnico di Torino, Torino, Italy

†Fruit growing division, Fondazione AGRION, Manta (CN), Italy ‡Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning, Politecnico di Torino, Torino, Italy

(27) A. L. Burrell, J. P. Evans, and M. G. De Kauwe, "Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, p. 3853, Jul 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>

(28) "The state of food security and nutrition in the world 2022," 2022, FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4060/cc0639en> [4] "Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all," <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>, accessed: 2023-06-05.

(29) S. Ortega-Farias, S. Irmak, and R. H. Cuenca, "Special issue on evapotranspiration measurement and modeling," *Irrigation Science*, vol. 28, no. 1, pp. 1–3, Aug. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0184-x>

(30) U. Garlando, L. Bar-On, P. M. Ros, A. Sanginario, S. Peradotto, Y. Shacham-Diamand, A. Avni, M. Martina, and D. Demarchi, "Towards optimal green plant irrigation: Watering and body electrical impedance," in *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2020, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9181290>

(31) U. Garlando, L. Bar-On, P. M. Ros, A. Sanginario, S. Calvo, M. Martina, A. Avni, Y. Shacham-Diamand, and D. Demarchi, "Analysis of in vivo plant stem impedance variations in relation with external conditions daily cycle," in *2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2021, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9401242>

(31) "Introduction to soil hydraulic properties," <http://geode.colorado.edu/~small/RetentionCurves.html>, accessed: 2023-06-07.

(32) D. Gisolo, M. N'Sassila, A. Gentile, F. Pettiti, M. Barezzi, U. Garlando, L. Nari, S. Ferraris, D. Demarchi, and D. Canone, "Wappfruit: A project for the optimisation of water use in agriculture," Mar 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1485>

(33) M. T. van Genuchten, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, no. 5,

pp. 892–898, 1980. [Online]. Available:

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

(34) M. Barezzi, U. Garlando, F. Pettiti, L. Nari, D. Gisolo, D. Canone, and D. Demarchi,

“Long-range low-power soil water content monitoring system for precision agriculture,” in 2022 IEEE 13th Latin America

Symposium on Circuits and System (LASCAS), 2022, pp. 1–4.

(35) “Lora protocol overview,” <https://www.semtech.com/lora>, accessed: 2023-06-05.

(36) “Lora protocol documentation,” <https://lora.readthedocs.io/>, accessed: 2023-06-05.

(37) <https://www.ingenio-web.it/articoli/fotovoltaico-con-sistema-di-accumulo-per-autoconsumo-architettura-del-sistema-criteri-di-dimensionamento-e-criticita/>

(38) <https://www.mcter.com/integrazione-di-impianti-fotovoltaici-con-sistemi-di-accumulo-27838> - Integrazione di impianti fotovoltaici con sistemi di accumulo ACAES per

incrementare l'autoconsumo di energia dei piccoli centri urbani. Daniele Cocco -

Università di Cagliari: Fabio Licheri-Davide Micheletto-Vittorio Tola

(39) Accumulo di energia: scelta della strategia e modellazione Candidato: Marco Zanin

Relatore: Prof. Andrea Lazzaretto Correlatore: Ing. Sergio Rech Laurea in Ingegneria

Energetica Dipartimento di Ingegneria Industriale

A.A. 2018/2019

A.A. 2018/2019

(40) woitalia.it/weather/maps/city

(41) <https://www.crsлагhi.net/it/hub/crs-l-digital-hub>