

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CAMPUS DI CESENA
DIPARTIMENTO DI INFORMATICA - SCIENZA E
INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria e Scienze Informatiche

PROGETTAZIONE E PROTOTIPAZIONE DI UN
SISTEMA DI IRRIGAZIONE DI PRECISIONE

Elaborato in: Sistemi Embedded ed Internet-of-Things

Relatore:

Prof. MATTEO GOLFARELLI

Co-Relatore:

Dott. MANUELE PASINI

Presentata da:

FEDERICO CAPPONI

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

PAROLE CHIAVE

Precision Agricoltura

Emdbded

ESP-32

Sensori ambientali

IoT

Vorrei ringraziare prima di tutto la mia famiglia, gli amici, i colleghi (anche ex) e tutte le persone che mi sono state vicine e mi hanno sostenuto sempre. Una menzione particolare va a Meshua e Lorenzo che sono stati fondamentali in questo percorso che mi hanno aiutato, quasi in staffetta, a perseguire. Vorrei ringraziare, infine, il mio relatore, Prof. Matteo Golfarelli e il Dott. Manuele Pasini, per avermi accompagnato e seguito in questo affascinante progetto che ha portato alla stesura della tesi finale.

Indice

Introduzione	ix
1 Irrigazione di precisione	1
1.1 Origini e principi dell'agricoltura di precisione	2
1.2 Dal grande al piccolo: applicare l'irrigazione di precisione agli orti domestici	4
1.3 Sfide agronomiche e applicazione dell'irrigazione di precisione in scenari reali	5
1.3.1 Condizioni ambientali durante il periodo estivo	6
1.3.2 Fattori comuni di interoperabilità	7
1.3.3 Caso di studio	7
1.3.4 Scelte strategiche adottate	8
2 Tecnologie utilizzate nell'impianto	11
2.1 Organizzazione dell'orto agricolo	11
2.1.1 Territori circostanti	12
2.1.2 Orto esaminato	14
2.2 Progettazione dell'impianto	17
2.3 Il sistema idrico-elettrico	18
2.3.1 Risorse idriche e sistema di distribuzione	19
2.3.2 Sistema elettrico e controllo dell'irrigazione	23
2.4 Architettura Hardware	26
2.4.1 Il micro-controllore	27
2.4.2 Il modulo di alimentazione	28
3 Il sistema di monitoraggio e prescrizione irrigua	31
3.1 Algoritmi per la raccolta dei dati	33

3.1.1	Struttura elettrica e funzionamento del punto di raccolta dati	33
3.1.2	Descrizione del sensore capacitivo	37
3.1.3	Logica dell’algoritmo di raccolta	38
3.2	Il centro operativo e l’elaborazione dati	40
3.3	Interfaccia utente	42
3.3.1	Visualizzazione dei dati dei sensori	43
3.3.2	Interfaccia di controllo	44
3.3.3	Pseudocodice dello script di controllo	45
3.4	Principi guida agronomici	46
4	Prototipazione e testing	49
4.1	Collaudo e dati rilevati	51
4.1.1	Tendenze osservate nelle letture	52
4.1.2	Gestione energetica e autonomia dei nodi	53
4.2	Esecuzione dell’irrigazione	55
4.2.1	Controllo manuale e primo utilizzo funzionale	55
4.2.2	Programmazione automatica e temporizzazione	56
5	Conclusioni e sviluppo futuri	59
5.1	Bilancio complessivo dell’esperienza	59
5.2	Sviluppi futuri e prospettive	60
	Bibliografia	64

Introduzione

Negli ultimi decenni, la crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale, l'ottimizzazione delle risorse e la necessità di garantire una produzione agricola efficiente ha portato allo sviluppo e alla diffusione dell'agricoltura di precisione. Questa disciplina integra tecnologie informatiche attraverso l'utilizzo di sensori e modelli decisionali per monitorare e gestire con accuratezza le variabili agronomiche fondamentali, riducendo sprechi e impatti negativi sull'ambiente.

Sebbene l'agricoltura di precisione sia spesso associata a contesti industriali e a coltivazioni su larga scala, le stesse metodologie possono essere applicate con successo anche su superfici ridotte, come orti domestici o coltivazioni familiari, come piante da balcone. In tale scenario, le sfide legate alla scarsità di risorse, alla variabilità del microclima e alla gestione quotidiana delle colture rendono ancor più rilevante l'uso di strumenti digitali per un'agricoltura sostenibile e automatizzata.

Il progetto sviluppato in questa tesi si colloca proprio in questo contesto, con l'obiettivo di realizzare un sistema integrato per il monitoraggio e la gestione irrigua di un orto familiare collinare. Il sistema è incentrato sull'utilizzo di sensori a basso consumo, micro-controllori ESP32-C3, una piattaforma server basata su Raspberry Pi e un'interfaccia utente web accessibile da remoto, il tutto distribuito sotto il dominio `orto.capponi.casa`. L'implementazione prende in considerazione anche le problematiche tipiche delle aree rurali, quali la scarsa connettività e l'esposizione agli agenti atmosferici, proponendo soluzioni semplici ma robuste.

L'intero sistema mira non solo a migliorare l'efficienza nell'uso della risorsa idrica, oggi sempre più preziosa e soggetta a stress da siccità, ma anche ad aumentare l'autonomia operativa dell'utente, riducendo l'intervento manuale e favorendo una maggiore consapevolezza nella gestione culturale.

La trattazione si sviluppa nei seguenti capitoli:

- Nel **Capitolo 1** si introduce il concetto di *irrigazione di precisione*, esplorandone le principali tecniche, le motivazioni alla base della sua diffusione e le strategie adottate nel progetto per adattarla a un contesto domestico. Si affrontano anche aspetti agronomici fondamentali come l'irrigazione localizzata, il recupero dell'acqua piovana e la suddivisione dell'orto in zone irrigue.
- Il **Capitolo 2** presenta nel dettaglio le *tecnologie utilizzate*, a partire dalla descrizione fisica dell'orto fino alla progettazione e costruzione del sistema hardware distribuito. Vengono analizzati i componenti principali: attuatori, centralina, impianto elettrico ed idraulico, nonché l'architettura complessiva che consente di collegare in rete i vari nodi sensore.
- Il **Capitolo 3** è dedicato al *sistema di monitoraggio e prescrizione irrigua*. Dopo aver introdotto l'importanza della raccolta dati, vengono descritti gli algoritmi che governano il campionamento e l'elaborazione delle misure di umidità e tensione. Si approfondisce il funzionamento dei sensori contenitori protettivi stampati in 3D, della dashboard web, sia sul piano funzionale che visivo, e infine si presenta la logica che l'utente dovrà seguire per il controllo dell'automazione dell'irrigazione, integrando principi agronomici, fabbisogni specifici delle colture e tecniche naturali di gestione delle piante.
- Nel **Capitolo 4** si affronta la fase di *prototipazione e validazione*, dove si riportano le fasi di test e installazione, il comportamento reale del sistema nelle settimane di prova, le criticità riscontrate e le soluzioni adottate. Vengono anche valutate le performance del sistema in termini di reattività, affidabilità e consumo energetico.
- Infine, il **Capitolo 5** raccoglie le *conclusioni* del lavoro, proponendo spunti per sviluppi futuri, tra cui l'integrazione di nuove colture, il supporto alla previsione meteorologica, l'aggiunta di funzioni avanzate nella dashboard e l'estensione del sistema a più orti o contesti educativi.

L'obiettivo complessivo della tesi non è solo quello di dimostrare la fattibilità tecnica di un sistema di irrigazione intelligente su scala domestica, ma anche quello di evidenziare come l'adozione di tecnologie open-source e

approcci sostenibili possa migliorare significativamente la qualità del lavoro agricolo, anche in contesti non professionali.

Capitolo 1

Irrigazione di precisione

Negli ultimi anni, la crescente pressione esercitata dal cambiamento climatico, dalla scarsità delle risorse idriche e dalla necessità di aumentare la sostenibilità in agricoltura ha portato allo sviluppo di un nuovo paradigma produttivo: l'agricoltura di precisione. Essa consiste in un insieme di tecniche e approcci agronomici che mirano a ottimizzare la gestione delle risorse attraverso il supporto di tecnologie avanzate per il monitoraggio, l'analisi e l'intervento mirato.

L'irrigazione di precisione è una componente fondamentale dell'agricoltura di precisione, un paradigma che si basa sull'uso di tecnologie innovative per ottimizzare l'utilizzo delle risorse, migliorare le rese produttive e ridurre l'impatto ambientale. Attraverso l'impiego coordinato di sensori, attuatori, modelli di supporto alle decisioni e sistemi di automazione, è possibile realizzare un'agricoltura più sostenibile ed efficiente.

Secondo la FAO, l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura, oltre il 70% dell'acqua dolce prelevata nel mondo viene utilizzata in agricoltura. Tuttavia, una parte significativa di quest'acqua viene persa a causa di inefficienze nei sistemi di distribuzione e irrigazione [5]. L'irrigazione di precisione rappresenta una risposta concreta a questo problema, permettendo di somministrare l'acqua solo quando e dove è realmente necessaria, sulla base di dati rilevati in tempo reale dalle condizioni ambientali e del suolo.

Negli ultimi anni, il concetto di agricoltura di precisione si è progressivamente esteso anche agli orti familiari e alle coltivazioni su piccola scala. Grazie alla diffusione di micro-controllori a basso costo e ad una crescente

accessibilità delle tecnologie IoT (Internet of Things), oggi anche coltivatori non professionisti possono beneficiare di strumenti intelligenti per il monitoraggio e la gestione delle pratiche agronomiche.

1.1 Origini e principi dell'agricoltura di precisione

Il concetto di agricoltura di precisione si sviluppa a partire dagli anni '90, con l'introduzione dei primi strumenti di mappatura GPS e sensori a bordo macchina. Negli anni successivi, l'evoluzione dell'informatica, dell'IoT e di sensori sempre più precisi ha permesso una diffusione più ampia delle tecnologie digitali anche in agricoltura. L'agricoltura di precisione si basa sul principio della variabilità spaziale e temporale dei parametri agronomici: invece di adottare strategie uniformi su tutta la superficie coltivata, essa propone interventi localizzati in base alle effettive necessità di ciascuna porzione del campo.



Figura 1.1: Casistiche di applicazione dell'agricoltura di precisione.

Questo approccio consente di migliorare l'efficienza d'uso di acqua, fertilizzanti, antiparassitari e manodopera, aumentando la resa e riducendo l'impatto ambientale. Tali vantaggi sono evidenti in coltivazioni su larga

scala, come frutteti, vigneti o seminativi, dove le differenze pedologiche, topografiche e microclimatiche possono essere marcate anche all'interno della stessa azienda agricola.

Irrigazione di precisione: definizione e motivazioni L'irrigazione di precisione rappresenta uno dei pilastri fondamentali dell'agricoltura di precisione. Essa consiste nell'applicazione controllata e differenziata dell'acqua in base al fabbisogno reale delle piante, stimato mediante modelli agronomici o dati raccolti da sensori posizionati nel campo. L'acqua è, infatti, una risorsa sempre più scarsa e costosa, e la sua distribuzione inefficiente rappresenta una delle maggiori criticità dell'agricoltura tradizionale [10].

L'irrigazione convenzionale si basa spesso su schemi temporali fissi, indipendenti dallo stato effettivo del suolo o delle colture. Ciò comporta sprechi significativi, stress idrico o condizioni di eccesso idrico, che possono compromettere la resa. Al contrario, un sistema di irrigazione di precisione consente di adattare in tempo reale la quantità d'acqua somministrata, migliorando la salute delle piante e l'efficienza idrica complessiva.

Tecnologie e strumenti I principali strumenti utilizzati in un sistema di irrigazione di precisione includono:

- sensori di umidità del suolo, temperatura e conducibilità elettrica;
- attuatori (valvole, pompe) controllabili da remoto o automaticamente;
- sistemi di trasmissione dati (Wi-Fi, LoRa, ZigBee, LTE);
- modelli di supporto decisionale (DSS);
- dashboard per la visualizzazione e il controllo dei parametri in tempo reale.

A seconda della scala e delle risorse disponibili, questi sistemi possono variare da architetture complesse centralizzate (con server cloud, AI e analytics) a soluzioni leggere e decentralizzate basate su micro-controllori.

Sfide nell'adozione e problematiche comuni Nonostante i vantaggi, l'adozione diffusa dell'irrigazione di precisione incontra ancora alcune criticità, tra cui:

- costi iniziali elevati per attrezzature e installazione;
- mancanza di competenze tecniche nei piccoli agricoltori;
- difficoltà di accesso a connettività stabile nelle zone rurali;
- problemi di integrazione tra componenti hardware e software eterogenei;
- necessità di calibrazione e manutenzione regolare dei sensori.

Inoltre, è importante considerare che l'efficacia dell'irrigazione di precisione dipende dalla qualità dei dati raccolti: sensori mal posizionati, non calibrati o danneggiati possono restituire valori fuorvianti, generando errori nelle decisioni irrigue.

1.2 Dal grande al piccolo: applicare l'irrigazione di precisione agli orti domestici

Mentre i sistemi descritti finora si riferiscono prevalentemente a coltivazioni su vasta scala, è possibile adattare gli stessi principi a realtà molto più ridotte, come gli orti familiari. In questi contesti, l'implementazione di sistemi complessi non è giustificata dal punto di vista economico; tuttavia, le tecnologie oggi disponibili permettono di creare sistemi di controllo semplificati, affidabili ed economici.

L'uso di micro-controllori a basso consumo, sensori analogici economici e dashboard web sviluppate in HTML/JS consente di realizzare piattaforme complete a costi contenuti. Inoltre, il controllo diretto di pompe e valvole tramite script logici rende possibile la gestione automatica anche in assenza dell'operatore.

Vantaggi in contesto ridotto In un orto familiare, la gestione irrigua tradizionale si basa su osservazione visiva e consuetudine. L'introduzione della sensoristica e dell'automazione porta con sé numerosi vantaggi:

- riduzione degli sprechi idrici, evitando irrigazioni non necessarie;
- maggiore regolarità e tempestività degli interventi;
- miglioramento della salute delle colture;
- riduzione dello sforzo manuale;
- possibilità di gestione da remoto in caso di assenza prolungata.

Problemi aperti e direzioni di sviluppo La miniaturizzazione di un sistema di irrigazione di precisione porta con sé problematiche specifiche:

- la posizione dei sensori deve essere rappresentativa ma minimamente invasiva;
- l'alimentazione dei dispositivi deve essere sostenibile, spesso tramite batterie e pannelli solari;
- la raccolta dati deve essere energeticamente efficiente, privilegiando soluzioni come l'MQTT ed il risparmio energetico;
- l'interfaccia utente deve essere accessibile e comprensibile anche a chi non ha esperienza in informatica o elettronica.

Queste sfide rappresentano il filo conduttore dello sviluppo successivo della tesi, che intende fornire una possibile soluzione concreta e replicabile per orti intelligenti a basso costo.

1.3 Sfide agronomiche e applicazione dell'irrigazione di precisione in scenari reali

L'implementazione dell'irrigazione di precisione, anche in un contesto di piccola scala come un orto familiare collinare, consente di affrontare sfide agronomiche che tipicamente accomunano coltivazioni di ogni dimensione. Nonostante l'area coltivata sia contenuta, i fenomeni ambientali, le dinamiche stagionali e gli attacchi biotici rappresentano criticità che richiedono una gestione attenta e mirata.

1.3.1 Condizioni ambientali durante il periodo estivo

Il terreno preso in esame è situato in una zona collinare, con esposizione diretta alla luce solare durante buona parte della giornata. Nei mesi estivi, le temperature possono raggiungere e superare i 35°C, come visto nella figura 1.2, con periodi prolungati di siccità. Le piogge, quando presenti, sono spesso torrenziali e concentrate in brevi finestre temporali, risultando più dannose che benefiche per il suolo e per le piante, a causa dell'erosione e del compattamento del terreno.

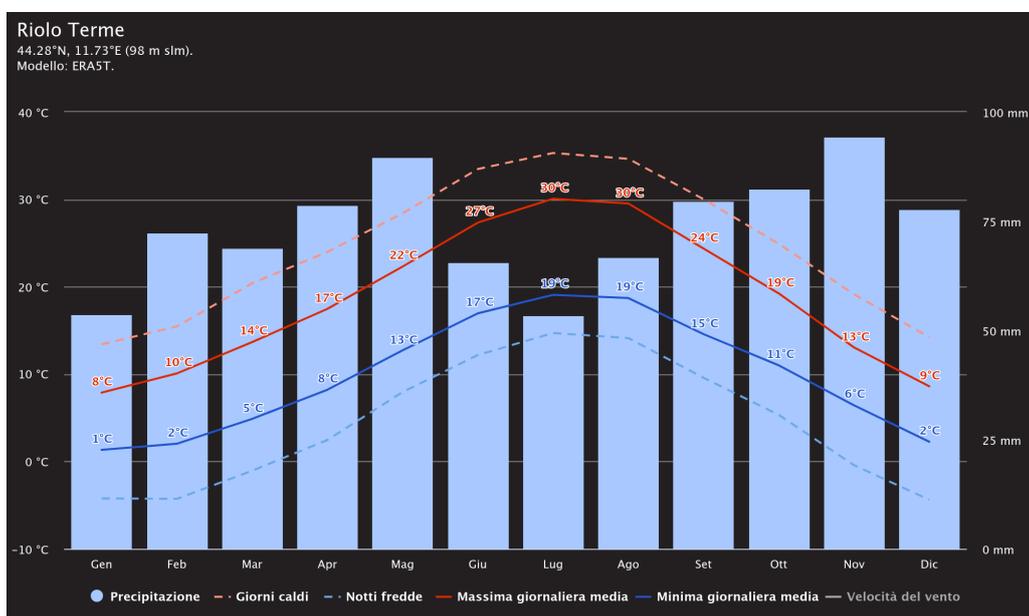


Figura 1.2: Dati meteo di Riolo Terme, in media, dal 1940 ad oggi.

Un altro fattore climatico da considerare è la presenza costante di vento, che da un lato favorisce l'asciugatura del fogliame e limita alcune malattie fungine, ma dall'altro accelera la disidratazione del suolo e rende ancor più necessaria una gestione irrigua intelligente e modulata. In assenza di precipitazioni regolari, la capacità di monitorare il livello di umidità del terreno e di fornire acqua in modo tempestivo e localizzato diventa strategica per garantire una crescita sana delle colture.

Problematiche comuni e approcci naturali L'agricoltura di precisione, in questo contesto, offre l'opportunità di applicare trattamenti e interventi agronomici in modo estremamente localizzato. La possibilità di monitorare in tempo reale lo stato di ogni zona coltivata, abbinata all'automazione dei comandi irrigui, consente di reagire prontamente a sintomi di stress idrico o attacchi parassitari, migliorando la resilienza complessiva dell'ecosistema orticolo.

1.3.2 Fattori comuni di interoperabilità

Le problematiche descritte e le soluzioni implementate evidenziano come i principi dell'irrigazione di precisione possano trovare efficacia anche in scenari non industriali. Le tecnologie impiegate (ESP32, MQTT, dashboard web, sensori capacitivo-analogici, valvole controllate elettronicamente) sono tutte a basso costo, open-source e replicabili, rendendo il modello adatto sia a piccoli agricoltori che a comunità scolastiche, orti condivisi o micro-imprese agricole.

La gestione a zone, la programmabilità degli interventi e la centralizzazione del monitoraggio sono concetti universalmente validi. La differenza tra colture di piccola e grande scala si manifesta più nella quantità di risorse e superficie coinvolta che nelle logiche operative. L'orto in oggetto rappresenta dunque una valida piattaforma di sperimentazione, che può fungere da prototipo anche per contesti più ampi.

L'irrigazione di precisione rappresenta un approccio innovativo e ormai consolidato in agricoltura professionale, ma la sua applicazione in contesti domestici, seppur meno esplorata, offre margini di miglioramento e democratizzazione notevoli. La tesi sviluppa un'implementazione reale in ambiente controllato, affrontando le problematiche specifiche e proponendo un modello scalabile, flessibile e accessibile, che verrà analizzato nei capitoli successivi.

1.3.3 Caso di studio

Nel contesto di questo progetto, l'irrigazione di precisione è applicata a un orto domestico collinare di circa 100 m², situato nell'area di Riolo Terme (RA). L'area è stata suddivisa in file coltivate, ciascuna dotata di un proprio tubo gocciolante, alimentato da una rete idraulica distribuita. Il sistema è

stato progettato per distinguere quattro macro-zone irrigue, corrispondenti a gruppi di file con esigenze idriche simili. Ogni zona è controllabile tramite elettrovalvole e può essere gestita in modo centralizzato o manualmente tramite valvole meccaniche poste all'inizio di ciascuna linea.

Il sistema consente un'ottimizzazione locale dell'irrigazione, tenendo conto delle caratteristiche pedologiche del terreno, delle colture impiantate e dei dati raccolti da sensori di umidità del suolo. L'architettura hardware e software, sviluppata in modo modulare, permette inoltre il controllo remoto e l'analisi visuale dei dati tramite una dashboard accessibile da browser.

Il sistema tecnologico Il cuore del sistema è rappresentato da una centralina di controllo basata su Raspberry Pi, che riceve i dati pubblicati via MQTT dai nodi sensore, realizzati con ESP32-C3, alimentati da pannelli solari e batterie 18650. Ogni nodo rileva il livello di umidità del suolo in una zona specifica e invia i dati a intervalli regolari alla centralina, che li elabora e li mette a disposizione dell'utente per attivare o disattivare le elettrovalvole. Queste sono posizionate in una scatola di distribuzione della linea idrica, ai piedi dell'orto, da cui partono le linee dei tubi di irrigazione. A sua volta le elettrovalvole sono collegate ad un trasformatore che alimenta anche il modulo relé, il tutto posizionato in una postazione strategica a riparo da sole e pioggia, dentro una scatola di derivazione. Le due diramazioni sono collegate tramite tubo corrugato, che contiene i cavi elettrici.

1.3.4 Scelte strategiche adottate

Ogni zona dovrebbe venire irrigata quando l'umidità non raggiunge delle soglie definite: suolo secco, ovvero se i valori rilevati da un sensore fossero particolarmente alti, indicherebbe la necessità dell'avvio dell'irrigazione per un periodo di tempo che andrebbe dai 10 ai 20 minuti. Con invece suolo bagnato, il terreno potrebbe tendere al ristagno, magari a causa di qualche pioggia torrenziale o temporale estivo e sarebbe sintomo del bisogno di interrompere l'irrigazione anche per alcuni giorni, possibilmente finché il terreno non ritorni ad un'umidità ottimale. La portata è calibrata in base alla coltura (es. 0.5 L/min per fagiolini, 1 L/min per zucca).

Riuso della risorsa idrica L'implementazione prevede il recupero di acqua piovana attraverso una cisterna da 1000 litri, posizionata a monte

dell'orto, che alimenta il sistema di irrigazione tramite gravità e una pompa elettrica da 220V. L'uso di pompe consente di mantenere una pressione costante nei tubi da 16 mm, garantendo una distribuzione uniforme lungo l'intera lunghezza delle file.

Tra le tecniche irrigue adottate, spicca l'uso del tubo gocciolante, particolarmente adatto per orticoltura di precisione: permette di somministrare l'acqua direttamente alla base delle piante, riducendo le perdite per evaporazione e minimizzando lo sviluppo di malerbe. Ogni fila dell'orto è stata progettata con pendenze contenute e larghezza uniforme, favorendo il drenaggio e la distribuzione regolare dell'acqua.

In questo modo, anche un orto di piccole dimensioni può beneficiare dei principi dell'irrigazione di precisione, migliorando l'efficienza idrica, riducendo i costi di gestione e contribuendo alla sostenibilità ambientale del sistema agricolo.

In conclusione, questo capitolo ha illustrato come le tecniche dell'irrigazione di precisione siano state adattate ad un contesto domestico reale, affrontando criticità ambientali, tecniche e gestionali. Il sistema presentato si pone come soluzione concreta e scalabile per migliorare la produttività, ridurre gli sprechi e garantire sostenibilità anche in piccole realtà agricole, dimostrando come innovazione e tradizione possano convivere armoniosamente.

Capitolo 2

Tecnologie utilizzate nell'impianto

In questo capitolo viene descritto in dettaglio l'insieme delle tecnologie impiegate per la progettazione e realizzazione del sistema di irrigazione di precisione. Verranno analizzati i diversi aspetti che compongono l'infrastruttura tecnica dell'impianto, a partire dalla morfologia e organizzazione dell'orto, per proseguire con cenni ai sensori implementati e l'architettura hardware complessiva. Lo scopo di questa sezione è mostrare come le scelte progettuali siano state influenzate sia da considerazioni ambientali che dalla necessità di garantire efficienza, modularità e sostenibilità dell'intero sistema.

Nel prosieguo di questo capitolo verranno analizzate nel dettaglio le tecniche e gli strumenti adottati, con particolare riferimento alla distribuzione idraulica per settori, ai materiali utilizzati e alle soluzioni di controllo implementate nel prototipo.

2.1 Organizzazione dell'orto agricolo

Il progetto di controllo automatico dell'umidità del suolo verrà realizzato in un orto situato in Via Mazzolano, Riolo Terme (RA), Italia, in un'area collinare dell'Appennino romagnolo.

La posizione è ben visibile anche dall'immagine satellitare riportata in figura 2.1, nella quale si può osservare l'andamento del terreno, l'abitazione principale e la disposizione dell'orto rispetto al resto della proprietà.

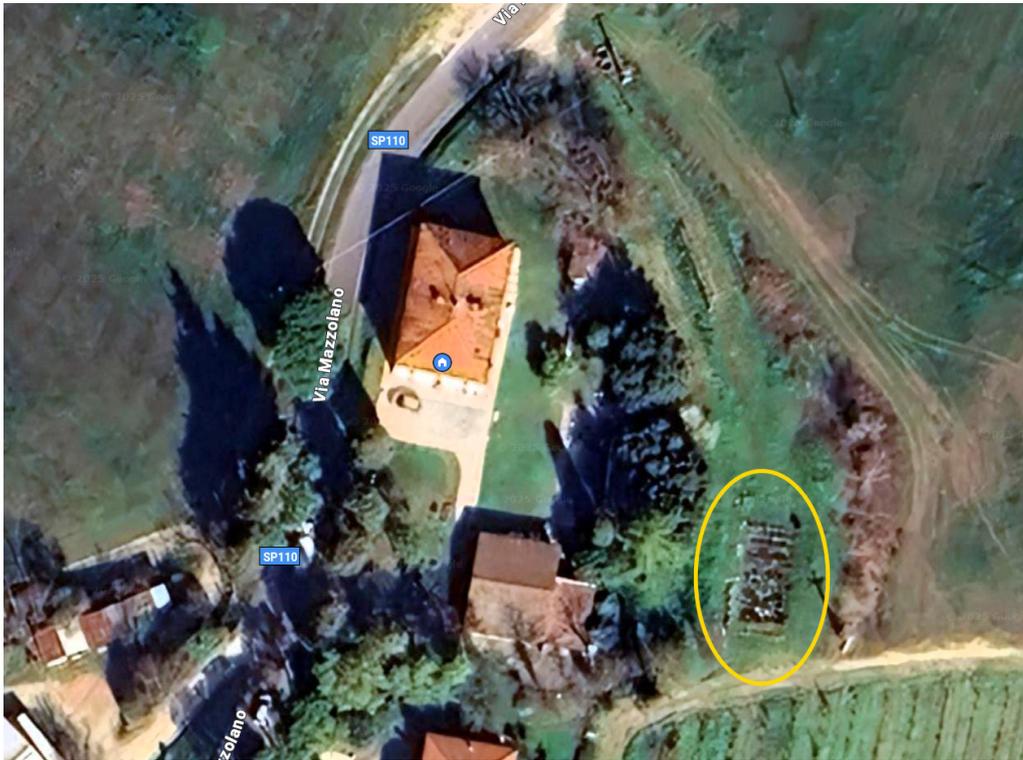


Figura 2.1: Panoramica satellitare

L'orto sperimentale è posto su un piccolo terrazzamento pianeggiante, situato qualche metro al di sotto del livello della casa. È facilmente accessibile da essa tramite più vie naturali, poichè l'area non è delimitata da recinzioni fisse.

2.1.1 Territori circostanti

La vegetazione circostante è una risorsa comune ad altre agricolture di contesti sia privati che industriali, e crea un microclima relativamente stabile e autosufficiente.

Il territorio collinare di Riolo Terme si colloca nella media valle del torrente Senio e presenta una geologia complessa, con affioramenti di diverse formazioni:

- argille di Riolo Terme (Pliocene): litotipi prevalentemente argilloso-marnosi;
- formazione della Olmatello (Pleistocene): litotipi prevalentemente di composizione argilloso-limosa;
- formazione Marnoso-Arenacea romagnola: successione ritmica di arenarie, siltiti, marne e argille;
- formazione Gessoso-Solfifera (Messiniano): successione evaporitica con presenza di gessi e sali.

Questa varietà di litotipi conferisce al suolo caratteristiche diverse in termini di tessitura, permeabilità e fertilità [13].

Il suolo di cui è caratterizzata la zona presa in esame è prevalentemente di tipo argilloso, con una tessitura fine che le conferisce una buona capacità di ritenzione idrica utile soprattutto nei periodi molto caldi e secchi, ma anche una certa tendenza al ristagno d'acqua che, in condizioni climatiche più umide, potrebbe portare a problemi di sovraesposizione idrica. Oltre che alla compattazione del terreno che può causare una riduzione dell'apporto di nutrienti rispetto a quanto necessario per una buona crescita delle piante.

La presenza di marne e gessi in alcune aree può migliorare la drenabilità e la struttura del suolo.

I suoli argillosi di Riolo Terme sono generalmente ricchi di nutrienti, grazie alla loro capacità di trattenere cationi come calcio, magnesio e potassio. Tuttavia, la disponibilità effettiva di questi nutrienti può essere influenzata dal pH del suolo e dalla presenza di sostanza organica. La gestione agronomica, come l'apporto di ammendanti organici e la rotazione delle colture, è fondamentale per mantenere e migliorare la fertilità del suolo.

La zona collinare circostante è particolarmente adatta alla viticoltura, grazie alla combinazione di suoli argillosi e calcarei, esposizione favorevole e microclima adatto. Tra le coltivazioni maggiormente presenti troviamo viti di Sangiovese e Albana, oltre che di alberi da frutto, quali albicocche, pesche e ciliegie che aiutano a sviluppare un ambiente ricco di biodiversità che può facilitare la coltivazione delle più diverse colture.

L'ambiente scelto si presta perfettamente alla sperimentazione di tecnologie di agricoltura di precisione su piccola scala, poiché offre una buona

varietà di condizioni microclimatiche, una disposizione ordinata delle colture e uno scenario realistico per la valutazione dell'efficacia del sistema in condizioni reali.

2.1.2 Orto esaminato

Il campo di coltivazione oggetto di studio ha una superficie di circa 12 metri di larghezza per 8 di profondità ed è organizzato in 10 prode rialzate, ciascuna contenente un numero variabile di piante, separate da piccoli sentieri pedonali. Alcune file sono attrezzate con strutture a palizzata, composte da pali metallici e rete di supporto, utili per la coltivazione di piante rampicanti come pomodori, fagioli o cetrioli. Le colture previste sono angurie, meloni, zucca, melanzane, peperoni, ocra, zucchine, cavolo nero, cetrioli, fagiolini, pomodori, porri e broccoli. Si tratta, quindi, di piante che richiedono un controllo costante del livello di umidità del suolo al fine di garantirne una crescita sana e una produzione regolare.

L'orto è suddiviso in quattro aree principali, ognuna delle quali ospita piante con esigenze idriche simili: fabbisogno medio, medio-alto, alto e altissimo. Questa divisione è funzionale all'applicazione di una strategia irrigua mirata, che consente di ottimizzare l'uso della risorsa idrica, evitando sia sprechi che stress idrici per le piante.

Nel posare le piante è stata posta particolare cura al loro benessere: comprate a livello di innestatura, dai consorzi della zona, dall'acquisizione delle piante alla loro posatura non è passato più di qualche giorno, e sono nel frattempo rimaste idratate.

La terra è stata mossa prima dell'innesto in terra, utilizzando anche terriccio e qualche nutrimento. Le prode e i passaggi erano rimasti puliti dai precedenti interventi ed è stata, infine, anche provvista di abbondante acqua per il sostenimento delle piantine.

Come si vede dalla figura 2.2, le zone per le piante con più necessità di acqua si trovano sulla sinistra della mappa, mentre sulla destra sono state piantate le colture meno esigenti dal punto di vista idrico. La zona a destra è anche quella più coperta dall'ombra durante il giorno: per alcuni periodi di tempo, verso metà giornata, l'intero orto è esposto al sole. Come normale, verso sera, al calar del sole, prima la zona dei broccoli e poi la zona dei meloni, ed infine anche la zona centrale vengono raggiunte dall'ombra.

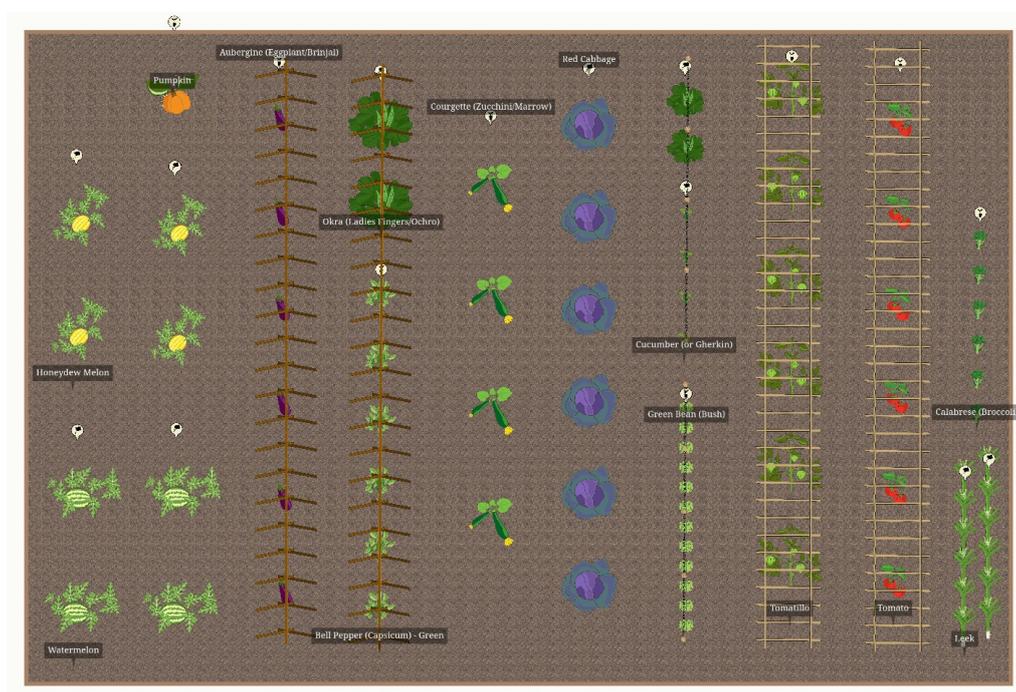


Figura 2.2: Organizzazione delle colture

Dall'immagine, si può notare, inoltre, che le piante in totale sono 81 e sono suddivise in:

- broccoli e porri a fabbisogno medio;
- pomodori, cetrioli, fagiolini a fabbisogno medio-alto;
- cavolo nero, zucchine, peperoni e melanzane a fabbisogno alto;
- angurie, meloni e zucche a fabbisogno altissimo.
- l'ocra è posizionata in due zone differenti per differenziare la crescita in ampiezza e in altezza nelle palizzate e per il fabbisogno variabile.

Per garantire una buona resa e la salute dell'ecosistema agrario, è fondamentale un'accurata manutenzione del suolo e delle colture. Alcune piante, come l'ocra, sono note per gradire anche climi tropicali mentre altre, come i broccoli, sono a loro agio a climi più miti.

Questa varietà nella vegetazione complessiva potrebbe presentarsi come un ostacolo al mantenimento dell'orto, dovuto magari all'aggravarsi, causa secche o alluvioni, delle condizioni climatiche. Oltre a questo, comunque, anche in caso di condizioni ideali, la manutenzione dell'orto dovrà essere costante ed estensiva.

Probabilmente la disposizione per il quantitativo di luce non è ottimale, ma lo spazio riservato all'orto era l'unico plausibile nell'estensione del giardino abitativo. Per questo motivo si è preferito dare priorità al fabbisogno dell'acqua: durante i mesi estivi, con piante stagionali, il fabbisogno di esposizione alla luce dovrebbe comunque essere soddisfatto, mentre la siccità del terreno potrebbe essere una condizione più frequente.

Nel tempo, il terreno è stato arato e lavorato per diverse stagioni agricole, e periodicamente è necessario rimuovere le erbacce manualmente o con attrezzi meccanici leggeri, per evitare che competano con le piante coltivate per l'acqua e i nutrienti. Inoltre, viene applicata la tecnica della pacciamatura, consistente nella distribuzione di materiale organico come paglia, foglie secche o cippato, sulla superficie del terreno. Questa pratica contribuisce a ridurre l'evaporazione dell'acqua, limitare la crescita di piante infestanti e mantenere una temperatura del suolo più stabile.



Figura 2.3: Uno scorcio sull'orto

Per alcune piante sono stati installati supporti per la crescita agevolata e il crimpamento delle cime o dei rami, come, ad esempio, pali di ferro per melanzane, peperoni e ocra, reti di metallo per cetrioli e fagiolini e reti di plastica per le piante di pomodori. Queste strutture aiutano la pianta a crescere e svilupparsi secondo una precisa direzione desiderata, e grazie all'ampio spazio tra colture differenti, risulta facile anche la cura della pianta stessa.

La conformazione delle file coltivate, caratterizzata dalla presenza dei supporti in rete metallica è visibile chiaramente in figura 2.3.

2.2 Progettazione dell'impianto

Uno dei principali obiettivi di questo progetto è stato la realizzazione di un sistema di irrigazione automatizzata in grado di servire efficacemente dieci file di coltivazioni. Tale necessità ha comportato una serie di scelte progettuali mirate, sia per quanto riguarda l'impianto idraulico, sia per l'infrastruttura elettrica di supporto.

Il punto di partenza della progettazione è stata l'identificazione delle risorse idriche disponibili. L'orto si trova in una zona collinare, leggermente più bassa rispetto a una cisterna di raccolta dell'acqua piovana, collocata accanto a una piccola serra. Sebbene in teoria fosse possibile sfruttare la forza di gravità per convogliare l'acqua fino al campo, le verifiche preliminari hanno evidenziato che il dislivello non garantiva una pressione sufficiente per raggiungere in modo efficace le file più distanti. Di conseguenza, si è reso necessario integrare una pompa d'acqua per aumentare la pressione nei tubi.

A partire dalla cisterna, l'acqua viene convogliata verso il campo tramite una tubazione in polietilene, interrata per circa 15 cm per proteggerla da danni meccanici e agenti atmosferici. Il tubo raggiunge un rubinetto posizionato all'ingresso dell'area coltivata.

La progettazione dell'impianto ha richiesto di suddividere le dieci file in quattro macro-zone irrigue, ciascuna controllata da un'elettrovalvola. Tale suddivisione nasce dall'esigenza di regolare in modo indipendente il flusso d'acqua in base alle condizioni di umidità rilevate, ottimizzando l'uso della risorsa idrica in caso di scarsità o condizioni meteorologiche avverse.

Uno dei problemi più significativi affrontati in fase di progettazione è stato il bilanciamento tra la necessità di garantire una pressione sufficiente

a ciascuna valvola e quella di evitare sovraccarichi che potessero danneggiare i componenti o causare perdite. In tal senso, si è deciso di utilizzare valvole da 12V con portata massima compatibile e raccordi proporzionati, limitando la lunghezza e il numero di curve nei tratti critici.

Dal punto di vista elettrico, la progettazione ha richiesto un'attenzione particolare alla coesistenza tra impianto idrico e cablaggio. Essendo lo spazio disponibile condiviso, si è dovuto prevedere un layout che minimizzasse il rischio di infiltrazioni o cortocircuiti.

Ulteriore criticità progettuale ha riguardato la posizione fisica dell'impianto: l'orto si trova su un terreno non coperto dal cablaggio della proprietà domestica, quindi non dotato di infrastrutture preesistenti. L'assenza di una struttura di distribuzione del supporto idrico-elettrico ha, perciò, reso necessario progettare l'intera rete da zero, partendo dalla stesura dei cavi elettrici alla posa delle tubazioni, assicurandosi di rispettare i vincoli topografici e la sicurezza dell'intervento.

L'obiettivo di fondo della progettazione è stato quello di garantire che ciascuna pianta ricevesse, in maniera equa e controllata, l'acqua necessaria, riducendo gli sprechi e permettendo una risposta localizzata in base allo stato del suolo. Per questo motivo, le scelte sono state effettuate sempre tenendo conto della futura integrazione con la sensoristica e con il sistema di controllo dell'irrigazione che saranno descritti nel dettaglio nei capitoli successivi.

In sintesi, la fase di progettazione ha rappresentato un momento cruciale per la definizione dei vincoli, delle opportunità e delle strategie implementative adottate. Le decisioni prese in questa fase hanno influenzato fortemente l'efficienza, l'affidabilità e la modularità del sistema nel suo complesso.

2.3 Il sistema idrico-elettrico

Il sistema di irrigazione descritto in questo progetto prevede un impianto autonomo per la gestione delle risorse idriche, progettato per massimizzare l'efficienza e la sostenibilità, riducendo al minimo gli sprechi d'acqua. L'approvvigionamento idrico si basa principalmente sulla raccolta dell'acqua piovana, ma prevede anche la possibilità di integrazione tramite rete idrica domestica. L'acqua raccolta viene accumulata in una cisterna da 1000 litri posizionata a monte rispetto al piano dell'orto. Dovessero verifi-

carsi, come sempre più probabile, periodi di siccità estrema, la cisterna ha a disposizione un tubo dell'acqua, proveniente dalla rete idrica domestica, per il riempimento della stessa. Per supportare l'aspetto della distribuzione dell'acqua, tramite una pompa, è stata estesa anche la linea di corrente casalinga, portata dalla serra, verso l'orto in oggetto. In questo modo si riesce a sfruttare le capacità di distribuzione idrica delle elettrovalvole installate nel sistema idrico.

2.3.1 Risorse idriche e sistema di distribuzione

Il recupero dell'acqua piovana costituisce una pratica fondamentale nell'ambito dell'irrigazione sostenibile, in linea con i principi dell'agricoltura di precisione. In questo progetto, l'acqua piovana viene convogliata verso la cisterna mediante un sistema di grondaie e tubazioni di raccolta. La cisterna, realizzata in materiale plastico resistente ai raggi UV e agli agenti atmosferici, consente di immagazzinare acqua sufficiente per irrigare l'intero orto per più giorni, anche in assenza di precipitazioni.

Nei periodi di scarsa piovosità, il serbatoio può essere riempito manualmente attraverso un collegamento alla rete idrica domestica, sfruttando un rubinetto posizionato nella parte più interna del cortile. Questo approccio consente di mantenere una continuità operativa dell'impianto anche in condizioni climatiche sfavorevoli.

Distribuzione primaria: tubo da 20 mm interrato Dalla cisterna parte un tubo in polietilene del diametro di 20 mm, progettato per il trasporto di acqua a pressione, resistente agli agenti chimici, alla polvere e alle escursioni termiche tipiche delle stagioni collinari. Il tubo viene interrato a circa 15 cm di profondità e ricoperto con uno strato di ghiaia e terreno, in modo da proteggerlo da danneggiamenti accidentali dovuti al calpestio o al passaggio di attrezzi agricoli e veicoli.

Gestione della pressione dell'acqua con presa intelligente Poiché l'orto è disposto su un terreno a modesta pendenza e la cisterna non garantisce sempre una pressione idraulica costante è stata prevista una pressurizzazione tramite pompa idraulica. La pressione in caduta dell'acqua infatti, nonostante la cisterna si trovi diversi metri sopra il livello dell'orto, dopo alcune prove si è rivelata insufficiente. Per questo è stato necessario

aumentare la pressione dentro i tubi di raccolta, sfruttando ulteriormente la pendenza della discesa verso l'orto. A tale scopo, è stata installata una pompa elettrica da 220V, posizionata in prossimità della cisterna stessa.

La pompa è controllabile manualmente, consentendo di attivare l'irrigazione in specifiche fasce orarie, ad esempio al mattino presto o al tramonto, riducendo le perdite per evaporazione. La pompa, precedentemente attaccata ad un timer in versione analogica, è stata adattata su una presa smart, una **TP-Link Tapo P110**, in modo che anche l'attivazione della pompa potesse essere possibile tramite interfaccia web.

Dalla pompa parte un secondo tubo che raggiunge un rubinetto di sezionamento. Da questo punto inizia la rete di distribuzione secondaria.

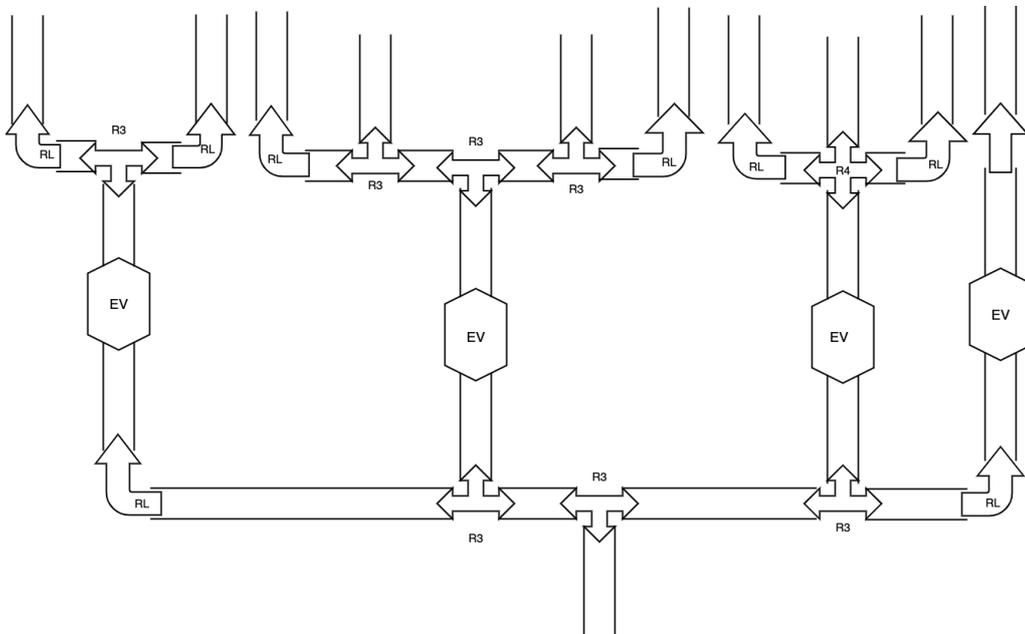


Figura 2.4: Schema semplificato dell'impianto di distribuzione idrica

Rete secondaria e nodo di diramazione Il tubo collegato al rubinetto principale prosegue fino a raggiungere un nodo di diramazione che divide il flusso idrico in quattro vie, ciascuna destinata a una diversa zona irrigua dell'orto. In corrispondenza di ogni diramazione è installata un'elettrovalvola (EV) comandata da una centralina automatica. In alternativa, ogni zona

può essere isolata tramite rubinetti manuali posti a monte della valvola, per permettere interventi di manutenzione o esclusione temporanea.

A partire dalla distribuzione principale, si raggiungono le quattro valvole EV collegate ciascuna a un raccordo da 16 mm che porta verso le singole file dell'orto. I raccordi usati, rispettivamente raccordo a L, a tre e a quattro vie, permettono una connessione semplice e modulare con il tubo gocciolante.

Scatola di distribuzione delle linee idrauliche Un elemento fondamentale per la corretta ripartizione del flusso d'acqua nelle diverse sezioni dell'orto è la scatola di distribuzione delle linee idrauliche. Questa scatola, realizzata in materiale plastico ad alta resistenza e dotata di grado di protezione IP65, ha lo scopo di ospitare i raccordi principali per la derivazione del flusso e le elettrovalvole che regolano il passaggio dell'acqua verso le diverse prode coltivate.

La linea idraulica principale, proveniente dal rubinetto situato al fianco dell'orto e alimentata da una cisterna tramite pompa a 220V, entra nella scatola attraverso uno dei fori laterali. Il collegamento al rubinetto consente sia l'utilizzo manuale, sia l'attivazione automatizzata tramite timer o attuatori controllati dalla centralina.

Il primo elemento attraversato dall'acqua all'interno della scatola è un raccordo a quattro vie. Questo componente è stato scelto per la sua capacità di gestire più diramazioni in uno spazio ridotto e con una buona tenuta idraulica. Ciascuna delle quattro uscite del raccordo è collegata a un'elettrovalvola da 12V, progettata per operare in modalità normalmente chiusa: ciò significa che il passaggio dell'acqua viene permesso solo in presenza di un flusso di corrente attivo. Le elettrovalvole sono collegate elettricamente ai relè della centralina tramite cavi bipolari, fissati con appositi morsetti a leva all'interno della scatola. I cavi di alimentazione provengono da una derivazione situata nella scatola principale di controllo e vengono fatti passare attraverso un tubo corrugato resistente all'acqua ed altri agenti esterni, per evitare infiltrazioni. I cablaggi seguono uno schema ordinato che facilita la manutenzione e minimizza i rischi di cortocircuiti accidentali, come mostrato nella fotografia reale della scatola idraulica (Figura 2.5). Una volta aperta l'elettrovalvola corrispondente, l'acqua fluisce verso l'esterno attraverso i fori predisposti nella scatola, ciascuno associato a una delle quattro vie di uscita. Ogni via conduce a una specifica area dell'orto, come definito nello schema concettuale dell'impianto idraulico visto prece-

dentemente. Le linee vengono ulteriormente suddivise tramite raccordi a tre vie (R3) o quattro vie (R4), in funzione del numero di file da irrigare per ciascuna macrozona.

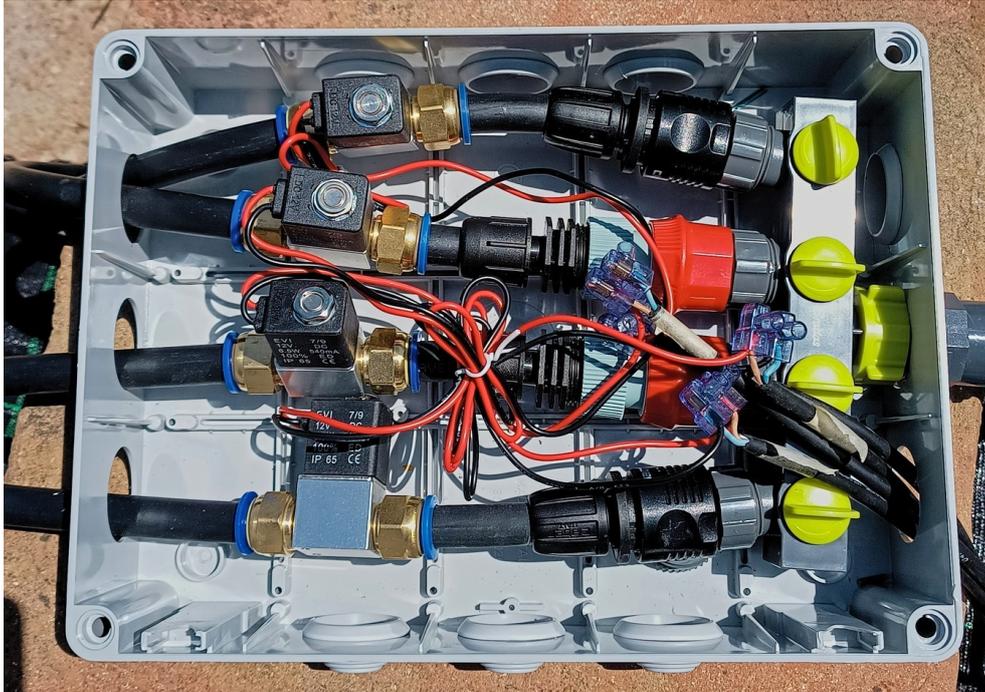


Figura 2.5: Scatola di diramazione idraulica

Il sistema idraulico è progettato per essere facilmente estendibile: qualora fosse necessario aggiungere ulteriori linee o sostituire componenti, l'accessibilità della scatola e la modularità dei raccordi lo rendono pratico da modificare senza interventi invasivi. Grazie a questa struttura, la distribuzione dell'acqua è garantita in modo uniforme, mirato e con possibilità di controllo separato per ogni sezione, rispondendo così ai requisiti fondamentali dell'irrigazione di precisione su piccola scala.

Irrigazione a goccia con tubi da 16 mm La distribuzione finale dell'acqua avviene mediante tubi gocciolanti da 16 mm di diametro, con passo di gocciolamento pari a 20 cm. Questi tubi sono disposti lungo ciascuna

fila coltivata, o *proda*, e garantiscono un apporto localizzato e uniforme alle radici delle piante.

Nonostante le piante si ritrovino a distanze differenti, l'uniformità delle distribuzioni permette l'utilizzo di un passo standard. Questo permette di adattare il sistema alle necessità colturali effettive, evitando irrigazioni superflue in assenza di piante o in condizioni di umidità adeguata.

Laddove il foro di gocciolamento non corrisponda a una pianta effettiva, esso viene tappato mediante nastro isolante e guarnizioni idrauliche, al fine di ridurre le dispersioni d'acqua. Le estremità dei tubi gocciolanti sono chiuse con appositi tappi a pressione.

2.3.2 Sistema elettrico e controllo dell'irrigazione

L'impianto di irrigazione prevede un'infrastruttura elettrica progettata per garantire l'alimentazione e il controllo automatizzato delle elettrovalvole, fondamentali per la gestione delle quattro zone irrigue di cui si compone la zona predisposta alla coltivazione. Il sistema è stato concepito in modo da combinare affidabilità, protezione dagli agenti atmosferici, modularità e sicurezza elettrica.

Siccome vengono utilizzate in questo progetto delle elettrovalvole da 16 mm, la progettazione dei due impianti, elettrico ed idraulico, non può essere separata nei suoi due aspetti. Infatti, a sancire la forte relazione duale, si nota che le elettrovalvole hanno bisogno di corrente per svolgere il loro compito di derivazione del flusso d'acqua.

Distribuzione elettrica e alimentazione primaria La fonte di alimentazione elettrica del sistema si trova in una piccola serra adiacente al magazzino di servizio, dove è presente una presa da 220V. Da tale presa parte una prolunga dotata di ciabatta, che raggiunge una postazione coperta nelle vicinanze di una finestra, fungendo da nodo di distribuzione iniziale.

Alla ciabatta sono collegati:

- una presa smart Wi-Fi che controlla l'accensione della pompa da 220V;
- il cavo elettrico tripolare destinato a portare la corrente fino alla centralina di controllo posta in prossimità dell'orto.

Il cavo elettrico, pensato per uso esterno e protetto da una guaina corrugata, è stato interrato a circa 15 cm di profondità, seguendo un tracciato parallelo ma non coincidente con quello del tubo dell'acqua. La profondità consente di proteggerlo da urti accidentali, agenti atmosferici e dall'eventuale passaggio di mezzi agricoli.

L'impianto elettrico descritto può essere meglio compreso facendo riferimento allo schema illustrato in Figura 2.6. La figura mostra in maniera sintetica ma efficace il flusso di alimentazione e controllo a partire dalla presa elettrica nella serra fino all'attivazione della valvola elettrica all'ingresso dell'orto.

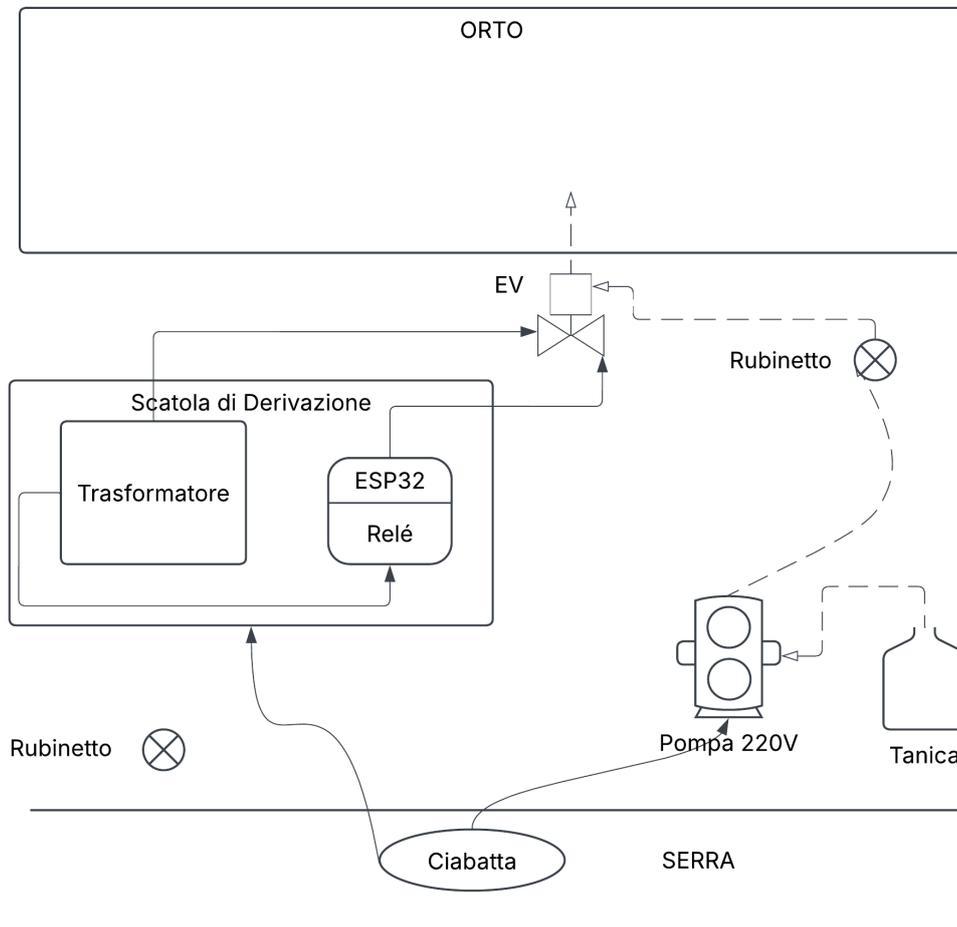


Figura 2.6: Schema semplificato dell'impianto di distribuzione elettrico

Come si può osservare, il sistema trae alimentazione da una ciabatta collegata alla rete domestica all'interno di una piccola serra. Dalla ciabatta si diramano due conduttori: uno fornisce direttamente energia alla pompa da 220V, posta accanto alla tanica di raccolta dell'acqua piovana; l'altro alimenta il cavo interrato che giunge fino alla scatola di derivazione installata vicino all'orto. Tale scatola contiene sia il trasformatore che converte la tensione da 220V a 12V, sia l'unità di controllo costituita da ESP32-WROOM-32E e modulo relé.

Scatola di derivazione e trasformazione della corrente Il cavo giunge ad una scatola di derivazione con grado di protezione IP56, installata su una struttura auto-costruita in legno e acciaio, dotata di copertura anti-pioggia. La scatola contiene un sistema di distribuzione composto da:

- un ponte elettrico che divide la linea principale in due diramazioni;
- una derivazione con fase e neutro destinata al relé controllato dall'ESP32-WROOM-32E;
- una derivazione completa (fase, neutro e terra) che alimenta un trasformatore AC-DC da 220V a 12V, 100W e 8.33A.

Il trasformatore, progettato per montaggio su guida DIN, è dotato di tre ingressi (L, N, GND) e quattro uscite in bassa tensione: due terminali V+ e due V-. Questi vengono duplicati tramite splitter per ottenere quattro linee positive e quattro negative, necessarie all'alimentazione delle quattro elettrovalvole da 12V normalmente chiuse.

All'interno della scatola di derivazione, la corrente viene separata tramite un ponte elettrico: una derivazione è destinata al trasformatore, che fornisce energia in bassa tensione alle elettrovalvole; l'altra alimenta il modulo ESP32-WROOM-32E con relé. L'ESP32-WROOM-32E, connesso alla rete Wi-Fi, riceve i comandi MQTT dalla centrale di controllo e chiude il circuito tra trasformatore e valvola, attivandola. Il relé gestisce la connessione del terminale positivo (V+) tra trasformatore e valvola, mentre il neutro è collegato direttamente. Questo assicura che le valvole, normalmente chiuse, si attivino solo a comando esplicito.

Distribuzione verso le elettrovalvole Ogni coppia V+/V- alimenta una singola elettrovalvola. Il collegamento avviene in questo modo:

- il terminale negativo (V-) viene collegato direttamente alla valvola;
- il terminale positivo (V+) passa, invece, attraverso un modulo relé da un canale controllato via ESP32-WROOM-32E.

Il modulo relé presenta i terminali:

- COM (comune), collegato al positivo proveniente dal trasformatore;
- NO (Normally Open), collegato al positivo dell'elettrovalvola;
- NC (Normally Closed), non utilizzato in questa configurazione.

In condizioni normali, il circuito resta aperto e la valvola chiusa. Quando il micro-controllore attiva il relé, il contatto viene chiuso e l'alimentazione raggiunge la valvola, consentendone l'apertura.

L'acqua pompata dalla tanica, prima di arrivare alle elettrovalvole, passa attraverso un rubinetto di sezionamento entrando nel circuito distribuito a valle dell'elettrovalvola. Il sistema così concepito consente un controllo affidabile e centralizzato dell'apertura delle zone irrigue, garantendo protezione elettrica (grazie al cablaggio con guaina, interrimento e IP56), modularità, e possibilità di estensione verso ulteriori zone o funzionalità, come illustrato nei paragrafi precedenti.

2.4 Architettura Hardware

L'architettura hardware rappresenta il cuore operativo del sistema di irrigazione di precisione. Essa integra dispositivi di rilevamento, unità computazionali, componenti di alimentazione e attuatori, orchestrati per garantire il monitoraggio continuo delle condizioni ambientali e l'attivazione automatica o manuale degli interventi irrigui. Questa sezione descrive le scelte progettuali alla base dell'infrastruttura fisica del sistema, evidenziando le soluzioni adottate per massimizzare l'efficienza energetica, modularità e affidabilità in un contesto agricolo reale.

2.4.1 Il micro-controllore

Il sistema di gestione dell'irrigazione è costituito da una rete di elettrovalvole, ognuna per la copertura delle diverse aree dell'orto, ciascuna delle quali ha il compito di attivare localmente l'irrigazione del suolo. Il micro-controllore scelto per la realizzazione del centro di controllo è l'ESP32-WROOM-32E, un dispositivo prodotto da Espressif Systems, dotato di connettività Wi-Fi, consumi energetici contenuti e capacità computazionali adeguate per l'elaborazione locale delle informazioni [18].

L'ESP32 rappresenta una scelta particolarmente adatta a contesti IoT grazie alla presenza di:

- una CPU a 32 bit RISC-V con frequenza fino a 160 MHz;
- supporto per modalità di *risparmio energetico*;
- stack nativo per comunicazioni MQTT, HTTP e Bluetooth Low Energy;
- un'ampia gamma di pin GPIO configurabili per input/output analogico e digitale.

L'architettura hardware del sistema si fonda su una struttura modulare e facilmente manutenibile, pensata per offrire controllo preciso e scalabile sull'irrigazione. Il cuore della gestione degli attuatori è rappresentato da un modulo relè a quattro canali con ESP32-WROOM-32E integrato, modello **LC-Relay-ESP-32-4R-A2**, che permette di ricevere comandi da remoto via Wi-Fi e MQTT e di pilotare in modo indipendente le elettrovalvole collegate.

Il modulo, visibile in Figura 2.7, integra un microcontrollore ESP32-WROOM-32E, programmabile direttamente tramite USB-C e alimentabile sia via 5V che 12V. Il relè permette la gestione di carichi in corrente continua (DC) fino a 30V/10A, perfettamente compatibili con le elettrovalvole a 12V normalmente chiuse utilizzate nel sistema. La scheda è alloggiata all'interno della scatola di derivazione principale e gestisce in tempo reale lo stato di ogni linea irrigua.

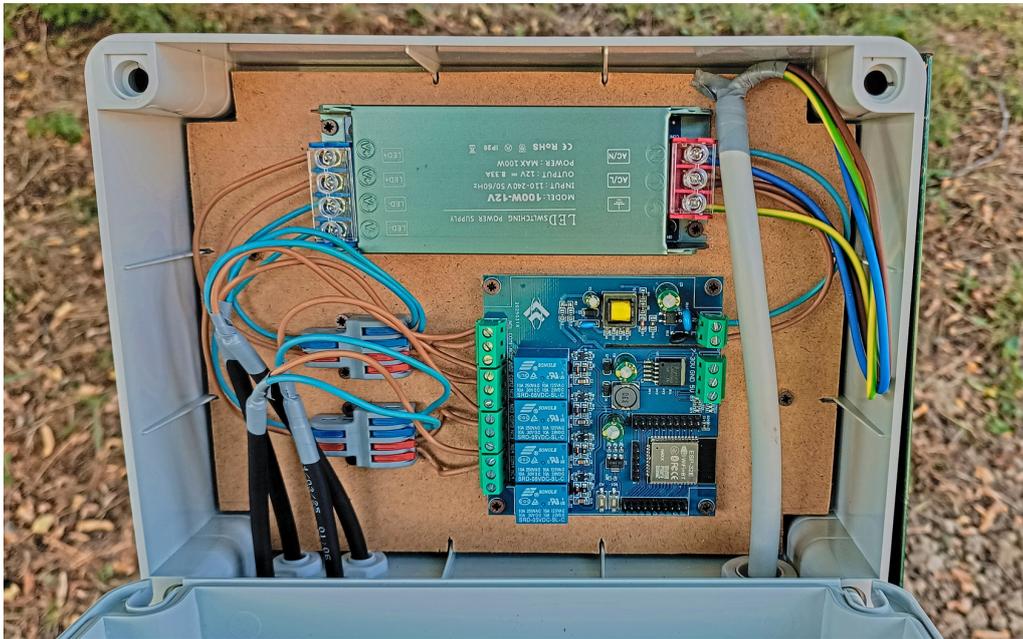


Figura 2.7: Scatola di derivazione elettrica

2.4.2 Il modulo di alimentazione

Per garantire una distribuzione stabile della corrente necessaria all'attivazione dei relè e delle elettrovalvole, è stato adottato un trasformatore switching da **220V a 12V DC, 100W 8.3A**, conforme agli standard CE, con tensione d'uscita regolabile e protezione da sovraccarichi. Il dispositivo, dotato di tre ingressi (fase, neutro e terra) e quattro uscite (due V+ e due V-), è stato installato nella stessa scatola su un supporto dedicato in legno e acciaio, protetto da pioggia e sole. Il modello esatto utilizzato è disponibile online¹.

Le uscite V+ e V- del trasformatore sono collegate a morsetti a leva WAGO che fungono da distributori verso i comuni e i canali del relé. La configurazione COM/NO (Common / Normally Open) permette di chiudere il circuito solo quando il relé è attivato, garantendo la sicurezza dell'impianto.

L'intero sistema è alimentato da una linea interrata da 220V, protetta da tubo corrugato e collegata a una ciabatta, a cui sono collegati anche il

¹Disponibile su Amazon: <https://www.amazon.it/dp/B0CZNPQZN>

centro di raccolta, la presa intelligente che modula l'accensione e spegnimento della pompa e il router 4G che fornisce connessione a tutti i dispositivi. Il design è pensato per consentire una facile espansione: il modulo relé può essere riprogrammato o sostituito rapidamente, mentre il trasformatore supporta correnti fino a 8.3A, sufficienti ad alimentare fino a 8 valvole simultaneamente, permettendo quindi un'espansione futura del sistema.

L'algoritmo di controllo Il comportamento dell'algoritmo su cui si basa il controllo dei dispositivi di distribuzione idrica è riassunto nel seguente pseudo-codice:

Setup:

- Connetti al Wi-Fi
- Connetti al broker MQTT
- Iscriviti al topic "valves/ID/control"

Loop:

- Attendi messaggio MQTT
- Se messaggio == "APRI VALVOLA X":
 attiva relay (apertura valvola x)
- Se messaggio == "CHIUDI VALVOLA X":
 disattiva relay (chiusura valvola x)

Grazie a questo approccio, il sistema consente di attivare l'irrigazione in ciascuna zona in modo completamente indipendente, sia in risposta a condizioni rilevate (ad esempio umidità del suolo) sia in base a programmazioni manuali o temporizzazioni automatiche.

In sintesi, l'architettura hardware assicura una separazione netta tra la logica di controllo (ESP32), la potenza (12V DC) e la gestione del carico (elettrovalvole), mantenendo alta l'affidabilità, la sicurezza e la semplicità di manutenzione.

Capitolo 3

Il sistema di monitoraggio e prescrizione irrigua

Il cuore operativo di ogni sistema di irrigazione di precisione è rappresentato dal sistema di controllo e monitoraggio, ovvero dall'insieme dei meccanismi logici, algoritmici e interattivi che governano la raccolta dei dati e l'attivazione degli interventi irrigui. In un contesto industriale, tali sistemi assumono un ruolo strategico, permettendo di orchestrare in modo efficiente le risorse idriche su superfici coltivate estese. Tuttavia, anche in ambiti più contenuti, come l'orto domestico oggetto del presente lavoro, è possibile beneficiare di un'architettura intelligente, capace di adattarsi dinamicamente alle condizioni ambientali e alle esigenze colturali specifiche.

La disponibilità di micro-controllori, sensori e piattaforme software open-source ha reso sempre più accessibile la progettazione di sistemi complessi, basati su principi di automazione e reattività. In questo scenario si inserisce il sistema realizzato, che integra algoritmi di raccolta dati, una piattaforma di visualizzazione e controllo via browser e una logica di prescrizione irrigua modulare, sviluppata per supportare decisioni agronomiche localizzate.

La progettazione ha previsto l'impiego delle seguenti tecnologie:

- **Python**, utilizzato per lo sviluppo del backend di controllo (basato su **Flask**), responsabile della ricezione e gestione dei dati provenienti dai nodi sensore;
- **JavaScript** e **HTML5**, per la realizzazione del frontend interattivo accessibile tramite browser;

- **Debian Linux Raspbian**, come sistema operativo della centrale di controllo basata su Raspberry Pi;
- **MQTT**, come protocollo di comunicazione asincrono tra i nodi remoti e il server centrale.

Per garantire l'accesso remoto al sistema, anche da reti esterne, il servizio web è reso disponibile tramite un Fully Qualified Domain Name (FQDN): `orto.capponi.casa`. Questo richiede una configurazione accurata del router domestico, del DNS dinamico e della gestione dei certificati HTTPS tramite **Let's Encrypt**. In contesti rurali, dove la connettività può essere intermittente o debole, dove l'estensione del terreno è significativa, solitamente le centraline comunicano coi server tramite protocolli molto leggeri, e.g. SIGFOX, Lora, Zigbee. Questa esigenza rappresenta una sfida tecnica non trascurabile, che tuttavia è stata affrontata con successo tramite strumenti open-source e tecniche di ottimizzazione della banda disponibile. In un contesto ridotto come il caso di studi, è stata sufficiente una connessione WiFi a router 4G, sfruttando per la comunicazione il protocollo MQTT e il suo paradigma publisher-subscriber.

L'importanza di tali sistemi non si limita alla comodità operativa. Secondo recenti studi [1], l'integrazione di tecnologie IoT e di controllo automatico in ambienti agricoli permette una riduzione dei consumi idrici fino al 30%, con un miglioramento netto della qualità e omogeneità della produzione. Anche su piccola scala, tali vantaggi si riflettono in termini di risparmio, sostenibilità e maggiore autonomia gestionale per l'utente finale.

Nel prosieguo del capitolo verranno trattati i tre elementi fondamentali del sistema:

1. gli **algoritmi di raccolta dei dati**, responsabili dell'acquisizione continua delle letture dei sensori, della validazione dei dati e della loro memorizzazione;
2. l'**elaborazione dei dati e visualizzazione su interfaccia utente**, che permette la visualizzazione delle letture, lo stato del sistema e il controllo manuale dell'irrigazione tramite dashboard;
3. le **guide decisionali per la gestione del sistema di irrigazione tramite analisi dei dati**, che rappresenta il modulo logico in grado di determinare quando e quanto irrigare sulla base delle misure raccolte, delle soglie di umidità e delle condizioni ambientali attese.

Queste componenti, pur mantenendo una complessità ridotta, costituiscono una solida base per l'espansione futura del sistema e dimostrano l'efficacia della filosofia dell'agricoltura di precisione anche in orticoltura familiare.

3.1 Algoritmi per la raccolta dei dati

Un sistema di irrigazione di precisione non può prescindere da una raccolta dati affidabile, continua e rappresentativa dello stato del terreno. L'acquisizione e l'elaborazione dei parametri ambientali sono fondamentali per determinare se, quando e quanto irrigare. In questo progetto, i due parametri monitorati sono:

- il livello di umidità del suolo;
- la tensione della batteria che alimenta ciascun nodo sensore.

Entrambi i valori sono raccolti in tempo quasi reale da ciascun nodo basato su micro-ctrllore ESP32-C3, per poi essere trasmessi tramite protocollo MQTT alla centrale di controllo.

3.1.1 Struttura elettrica e funzionamento del punto di raccolta dati

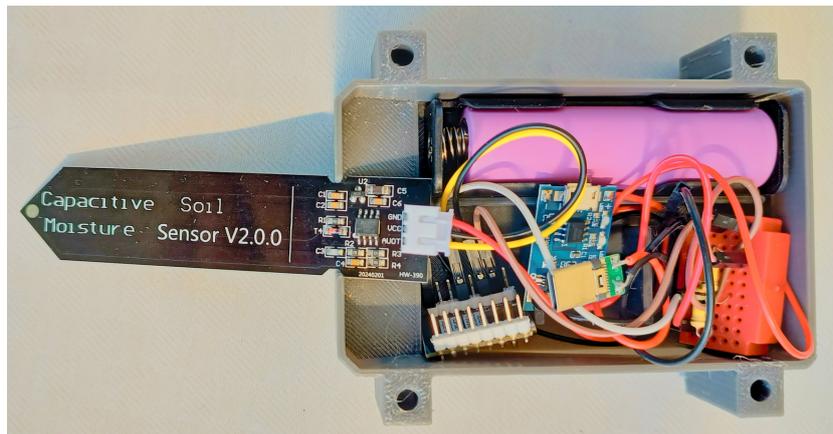


Figura 3.1: Prototipo sensore wireless - interno

Il nodo sensore utilizza un'architettura compatta e modulare per acquisire in modo affidabile i valori di umidità del terreno e la tensione residua della batteria. Il cuore del nodo è rappresentato dal micro-controllore ESP32-C3, che dispone di ingressi analogici (ADC) ad alta risoluzione e supporta una modalità a risparmio energetico per l'ottimizzazione dei consumi.

Il prototipo attualmente realizzato, documentato nell'immagine 3.1, è composto dalle seguenti parti:

- ESP32-C3: micro-controllore Wi-Fi a basso consumo, scelto per la sua compattezza, capacità di entrare in modalità "risparmio energetico" tra un campionamento e l'altro e supporto alla comunicazione MQTT [17];
- Sensore capacitivo di umidità del suolo v1.2/v2.0: un sensore analogico non invasivo che misura la capacità del suolo di trattenere l'acqua, restituendo un valore di tensione proporzionale all'umidità rilevata;
- modulo TP4056: circuito di gestione per la ricarica sicura delle batterie agli ioni di litio (18650), dotato di protezione contro sovraccarico e scarica profonda [4];
- partitore di tensione: due resistenze da 100Ω collegate in parallelo e montate su una *breadboard* per praticità, collegate infine ad un pin analogico del micro-controllore per permettere di rilevare il livello di carica della batteria.
- batteria 18650 da 3.7V: cella ricaricabile ad alta capacità (2600 mAh), selezionata per garantire autonomia di diversi giorni anche in condizioni di bassa irradiazione solare;
- pannello solare da 5V, 50mA: incollato su un lato del contenitore per ricaricare la batteria durante il giorno, di piccole dimensioni e bassa capacità ma necessario per mantenere costante il livello della batteria e alimentare il modulo TP4056;
- contenitore plastico da esterno: una scatola contenitore, costruita appositamente con stampa 3D in PETG. Non essendo un prodotto industriale, non ha certificazioni di impermeabilità completa, tuttavia

l'assenza di prese d'ARIA per il sensore ed i componenti e le guarnizioni per il pannello solare, dovrebbero fornire abbastanza protezione contro polvere o acqua.

- jumper e dupont di collegamento tra i contatti, necessari per saldare a stagno o collegare correttamente i componenti.

Tutti i componenti provengono da fornitori asiatici e sono facilmente reperibili tramite le più grosse piattaforme di e-commerce. La componentistica utilizzata non è molto costosa e il prototipo potrebbe benissimo essere utilizzato in ambienti domestici, anche di dimensioni più ridotte, come, per esempio, nel caso di piante in vaso.

Il sensore nella sua interezza è composto da elementi di ridotte dimensioni che facilitano anche un eventuale spostamento del prototipo verso altre colture. Infatti, la posizione potrà essere cambiata per verificare nello specifico l'umidità e il livello di acqua che una specifica pianta debba o riesca a ricevere, purché si resti all'interno dell'area di copertura del ripetitore Wi-Fi.

Questa portabilità permette anche una facile installazione del sensore nelle parti più critiche dell'orto.

Il sensore capacitivo di umidità viene alimentato direttamente dal pin 3.3V dell'ESP32-C3 e fornisce un'uscita analogica, con valori compresi tra 0 e 4095, proporzionali al contenuto di umidità del suolo. Il valore è letto da un pin ADC dell'ESP32-C3 e successivamente gestito dalla programmazione del dispositivo. Tale dato rappresenta il principale parametro per determinare la necessità di irrigazione.

Oltre al sensore, il nodo rileva anche la tensione della batteria 18650 che lo alimenta, per monitorarne lo stato di carica e garantire la manutenzione predittiva. Poiché la tensione nominale della batteria (tipicamente tra 3.0V e 4.2V) supera i limiti di ingresso dell'ADC, viene utilizzato un partitore resistivo costituito da due resistenze da 100kΩ collegate in serie. Il punto intermedio del partitore viene collegato a un secondo ingresso ADC dell'ESP32-C3. La formula utilizzata per il calcolo della tensione reale è la seguente:

$$V_{\text{batt}} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \cdot V_{\text{adc}} = 2 \cdot V_{\text{adc}} \quad \text{con } R_1 = R_2 = 100k\Omega$$

Per realizzare fisicamente le connessioni, viene utilizzata una mini breadboard interna al contenitore del nodo. Su di essa sono montati i fili provenienti:

- dal modulo TP4056 (B+ e GND), per alimentazione e monitoraggio;
- dall'ESP32-C3 (GND, pin ADC, pin 3.3V);
- dal sensore di umidità.

La breadboard agisce come nodo centrale di distribuzione elettrica, semplificando il cablaggio interno, facilitando eventuali modifiche future e migliorando la modularità del sistema.

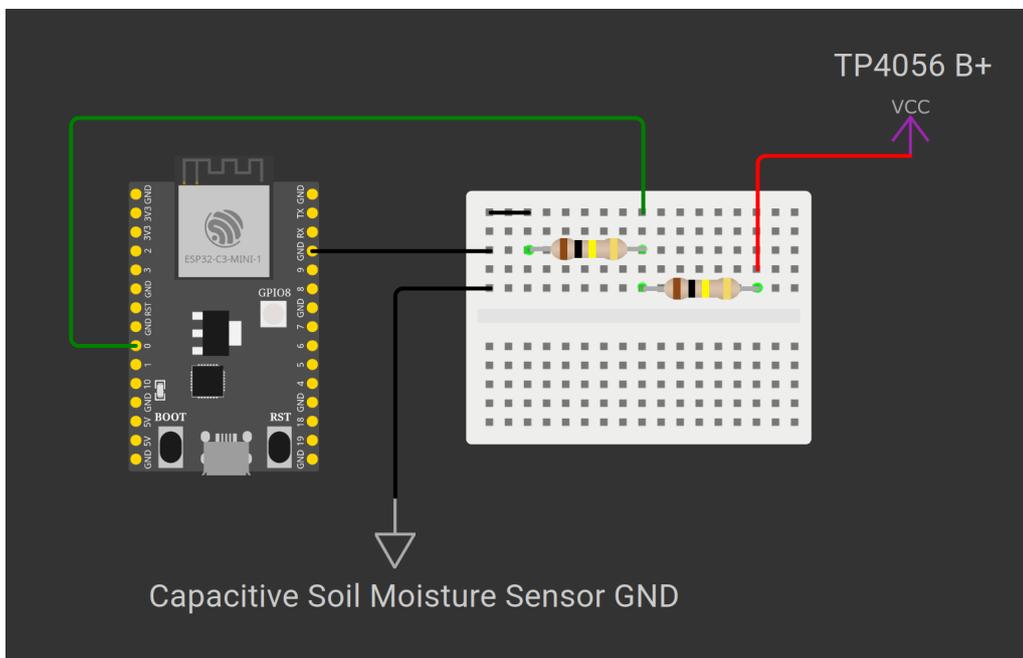


Figura 3.2: Schema funzionale del partitore resistivo e connessioni interne del nodo sensore.

Come mostrato in Figura 3.2, il partitore resistivo consente di leggere in sicurezza il valore della tensione della batteria, mentre il modulo TP4056 fornisce l'alimentazione al micro-controllore direttamente tramite connessione USB di tipo C. Il GND comune funge da riferimento sia per il sensore

di umidità che per l'ESP32-C3. Le connessioni sono ridotte al minimo necessario e la disposizione dei componenti è stata ottimizzata per contenere le dimensioni complessive.

Questa configurazione rappresenta un buon compromesso tra semplicità, robustezza e modularità, e consente di integrare sensori supplementari in futuro senza la necessità di riprogettare l'intera struttura.

3.1.2 Descrizione del sensore capacitivo

Il sensore di umidità del suolo utilizzato è di tipo capacitivo, con forma allungata e struttura in fibra di vetro, pensata per migliorare la resistenza alla corrosione e all'umidità. Il modello scelto (capacitive soil moisture sensor v2.0 [15]) ha un funzionamento basato sulla variazione di capacità del dielettrico, in funzione del contenuto d'acqua nel suolo.

Il sensore deve essere inserito nel terreno fino a pochi millimetri prima del blocco elettronico superiore. La zona sensibile si comporta come un condensatore planare, il cui valore capacitivo cambia con la variazione della costante dielettrica del terreno. In un suolo secco (bassa costante dielettrica), il valore del segnale analogico sarà più alto, mentre in un terreno umido (alta costante dielettrica) il segnale sarà più basso.

Il sensore restituisce un valore analogico letto dall'ESP32-C3 tramite un ingresso ADC, con risoluzione a 12 bit (range 0–4095). Per la calibrazione sono stati usati gli algoritmi specificati dalla casa madre, definita tramite i seguenti passi:

```
max_bagnato = il dato dal sensore, immerso in acqua.  
max_asciutto = il dato dal sensore, a contatto con l'aria.  
intervallo = (max_asciutto - max_bagnato) / 3  
soglia_umido = max_bagnato + intervallo  
soglia_normale = max_asciutto - intervallo
```

Queste osservazioni polarizzate sono state raccolte su un sensore come prova e, tenendo conto di un margine di errore dovuto alle specifiche fisiche e alle limitazioni del processo costruttivo dei sensori, si è osservato che:

- valori superiori a 3150 corrispondono a sensore completamente asciutto (anche fuori terra);

- valori tra 2350–3150 indicano un livello di umidità ottimale;
- valori tra 1500–2350 rappresentano un livello di umidità molto alto;
- valori inferiori a 1500 corrispondono a solo acqua.

Questi range possono variare leggermente in base al tipo di terreno e alla sua salinità, per cui è stata effettuata una calibrazione empirica iniziale.

3.1.3 Logica dell’algoritmo di raccolta

L’ESP32-C3 esegue cicli di raccolta a intervalli regolari che si ripetono ogni 60 minuti, definiti dal firmware caricato al suo interno e che è stato sviluppato in ambiente Arduino, ed opera secondo le funzionalità descritte nel seguente algoritmo:

- *lettura del sensore*: il pin analogico riceve il segnale dal sensore capacitivo. In particolare, sono state impostate due soglie, un limite inferiore ed uno superiore, al di fuori dalle quali, idealmente, non si vorrebbero rilevazioni. In questo modo si cerca di mantenere il livello di umidità del terreno costante. I valori alti indicano un terreno secco, quelli bassi uno umido;
- *lettura del livello di carica della batteria*: il livello della carica, rilevato anch’esso tramite pin analogico, viene calcolato tramite una formula di conversione per la tensione. Questo valore viene letto con l’obiettivo di dividerlo col centro di raccolta, una volta ottenuto anche il valore di umidità del suolo;
- *invio via MQTT*: i dati precedenti vengono trasmessi via Wi-Fi a un broker MQTT messo a disposizione da HiveMQ a titolo gratuito, al quale il nodo si sottoscrive sul suo topic relativo. Il topic include l’identificativo del nodo sensore;
- *risparmio energetico*: dopo la trasmissione, l’ESP entra in modalità ”risparmio energetico” per un intervallo predefinito, attualmente impostato su un ora, periodo ragionevole per la raccolta del dato. Questo consente di ridurre drasticamente il consumo energetico e abilitare una gestione della carica molto conservativa.

Il protocollo MQTT assicura una trasmissione leggera ed efficace, anche in reti con copertura Wi-Fi intermittente. I messaggi vengono pubblicati su topic dedicati e univoci per ogni nodo, in modo da poter essere identificati e tracciati dal server centrale.

Il codice include anche meccanismi per:

- connessione al Wi-Fi, con gestione delle credenziali e timeout;
- riconnessione automatica in caso di fallimento;
- debug via seriale per fasi di test.

Il sistema è pensato per funzionare in ambienti esterni con connettività intermittente, quindi l'invio dati è "stateless": non si basa su connessioni persistenti, ma invia ogni dato come evento singolo.

Strategia di campionamento agronomico Idealmente, l'adozione di un sensore per ogni pianta consentirebbe un controllo estremamente preciso dello stato idrico del suolo. Tuttavia, per contenere i costi e ridurre la complessità dell'impianto, si è optato per una strategia basata su sensori campione: ogni sensore rappresenta un'intera fila coltivata e viene posizionato in prossimità di una pianta *tipo*, posta nella zona più rappresentativa della fila.

Il posizionamento è stato effettuato tenendo conto dell'uniformità dell'irrigazione, del tipo di coltura e delle caratteristiche del terreno. Per superare le problematiche dell'eccessivo impatto economico, oltre che di tempo, materiali e assemblamento, che avrebbe richiesto avere un sensore per pianta, si è deciso di organizzare l'orto in "settori" che sono uniformi nelle necessità irrigue. I tubi gocciolanti garantiscono una buona distribuzione lungo la fila, con un passo di goccia pari a 20 cm, e la prossimità del sensore all'area irrigata permette di stimare efficacemente le condizioni idriche vissute dalla maggior parte delle piante.

Considerazioni sulla robustezza e affidabilità La scelta di un sensore capacitivo offre diversi vantaggi rispetto ai più comuni sensori resistivi, che non sono stati presi in considerazione in questo progetto anche per fattori di costo, in questi ultimi più elevati:

- maggiore resistenza alla corrosione dovuta ai sali presenti nel terreno;
- assenza di polarizzazione diretta e quindi minore deterioramento;
- risposta più lineare nel tempo.

L'unico svantaggio rilevante è la possibile influenza della composizione del suolo sulla calibrazione: valori assoluti di acqua contenuta nel suolo possono differire tra suoli argillosi e sabbiosi. Tuttavia, in contesti a scala locale e omogenea come un orto domestico, tale limitazione ha un impatto trascurabile.

Nel complesso, il sistema di raccolta dei dati permette un monitoraggio affidabile e a basso consumo energetico, fondamentale per il funzionamento autonomo del sistema. Le informazioni raccolte costituiranno la base per la visualizzazione interattiva e per le decisioni di irrigazione che saranno discusse nelle sezioni successive del capitolo.

3.2 Il centro operativo e l'elaborazione dati

Il cuore del sistema di raccolta, elaborazione e supervisione dei dati ambientali è costituito da un computer a scheda singola Raspberry Pi 3B+, configurato per svolgere il ruolo di server centrale. Questo dispositivo riceve i dati dai nodi distribuiti tramite protocollo MQTT, li archivia localmente e li mette a disposizione dell'utente attraverso un'interfaccia web interattiva.

Le caratteristiche tecniche principali del modello Raspberry Pi 3B+ [6], visto in figura 3.3, sono:

- Processore Broadcom BCM2837B0, quad-core ARM Cortex-A53 @ 1.4GHz;
- 1GB di RAM LPDDR2;
- Wi-Fi 802.11 b/g/n/ac dual band e Bluetooth 4.2 integrati;
- Porta Ethernet 10/100 Mbps e 4 porte USB 2.0;
- GPIO a 40 pin per connessioni con dispositivi esterni;
- Supporto a microSD per il sistema operativo e i dati.

Questa architettura consente una comunicazione asincrona, scalabile e a bassa latenza tra i dispositivi, con un carico computazionale minimo sulla rete e un'elevata affidabilità nella trasmissione. Inoltre, la struttura dei messaggi MQTT consente di identificare in modo univoco ciascun nodo e area dell'orto, facilitando il tracciamento e la gestione dei dati.

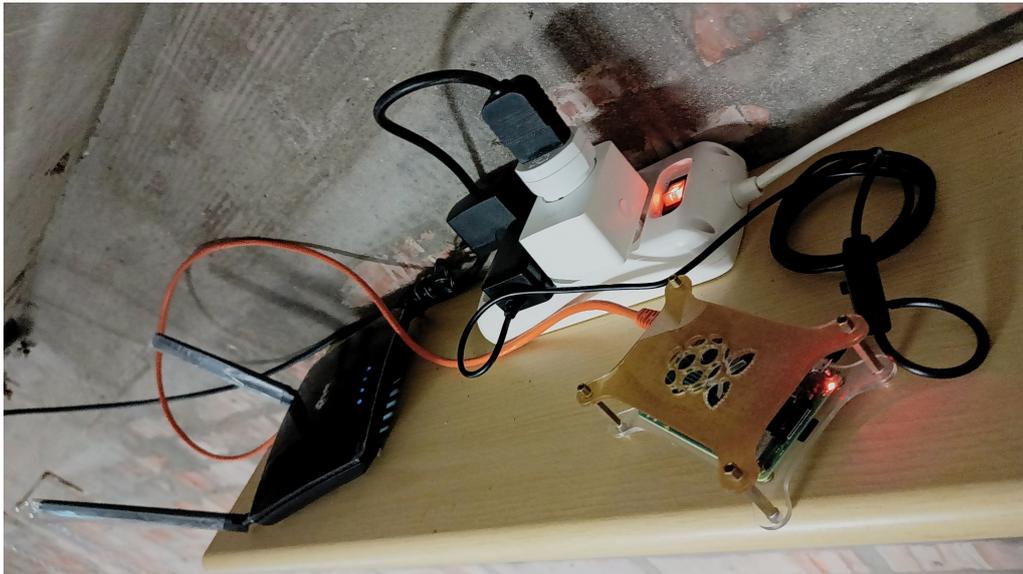


Figura 3.3: Il centro di raccolta, con: router, raspberry e smart plug

Il basso consumo energetico del dispositivo (circa 3-5W in media) ne consente il funzionamento continuo durante le 24 ore giornaliere, con un impatto energetico minimo, rendendolo idoneo anche per contesti off-grid se opportunamente alimentato.

Il Raspberry Pi è connesso alla stessa rete dei nodi tramite Wi-Fi ed anch'esso effettua la connessione con il broker MQTT *Mosquitto*, un servizio open source leggero e altamente affidabile per la gestione della messaggistica che si attesta al modello publisher/subscriber. I nodi sensore pubblicano su topic identificativi (es. `sensors/sensorID/moisture`) i valori rilevati, mentre il server si occupa di elaborare i dati, confrontandoli con le soglie di umidità per quelli provenienti dai sensori, mentre memorizza i dati di input per la gestione dell'impianto di irrigazione, per inoltrarli poi alla dashboard o al relé rispettivamente per la visualizzazione e per l'attuazione dei comandi dell'operatrice.

Anche il Raspberry Pi, come l'ESP32-C3, è basato su architettura ARM, a riprova del fatto che quest'ultima sia particolarmente adatta per ambienti in cui la potenza computazionale può essere limitata, mentre sono importanti bassi consumi e operatività continua.

La modularità della piattaforma consente future estensioni del sistema: ad esempio, l'integrazione di sensori per la temperatura e l'umidità dell'aria, l'aggiunta di previsioni meteo tramite API REST o la connessione a una piattaforma cloud per il backup automatico dei dati.

Nel complesso, il Raspberry Pi svolge un ruolo essenziale di orchestratore dell'intero sistema: oltre a raccogliere e visualizzare i dati, può eseguire funzioni di analisi leggera (elaborazione soglie, medie mobili, logiche di trigger), rendendo l'architettura adatta anche a scenari agricoli più ampi e articolati.

3.3 Interfaccia utente

L'interfaccia utente rappresenta l'elemento visivo e operativo tramite cui l'operatore può monitorare lo stato del sistema e intervenire direttamente sui dispositivi di controllo. La dashboard progettata per il sistema di irrigazione di precisione è pensata per essere chiara, funzionale e accessibile, anche da utenti con competenze tecniche limitate. Essa viene eseguita su un Raspberry Pi 3B+ collocato fisicamente nella serra, in prossimità della tanica e della pompa, collegato alla stessa rete dei sensori e del relè e attaccato direttamente al router tramite cavo Ethernet, ed è raggiungibile tramite browser Web attraverso il dominio `orto.capponi.casa`.

L'interfaccia web è stata costruita tenendo in considerazione, principalmente, facilità di utilizzo e semplicità. Il design infatti risulta minimale e diretto, con pochi colori e componenti, giustapposti al messaggio che si è voluto dare, ovvero: l'utente deve ritrovarsi in un pannello di controllo e non stare navigando in un sito vetrina. Per questo tutte le funzionalità della dashboard si ritrovano in una singola pagina, essendo comunque in questa prima versione in numero limitato, fornendo solo le basi di un sistema integrato di facile espansione futura.

Come si può osservare in Figura 3.4, l'interfaccia è suddivisa in quattro sezioni principali, più un pulsante di logout (non visibile in figura) per la disconnessione sicura dell'utente. Ogni sezione è pensata per offrire un

controllo diretto o una visualizzazione immediata dello stato di uno specifico sottosistema: sensori, elettrovalvole, pompa e legenda delle zone.

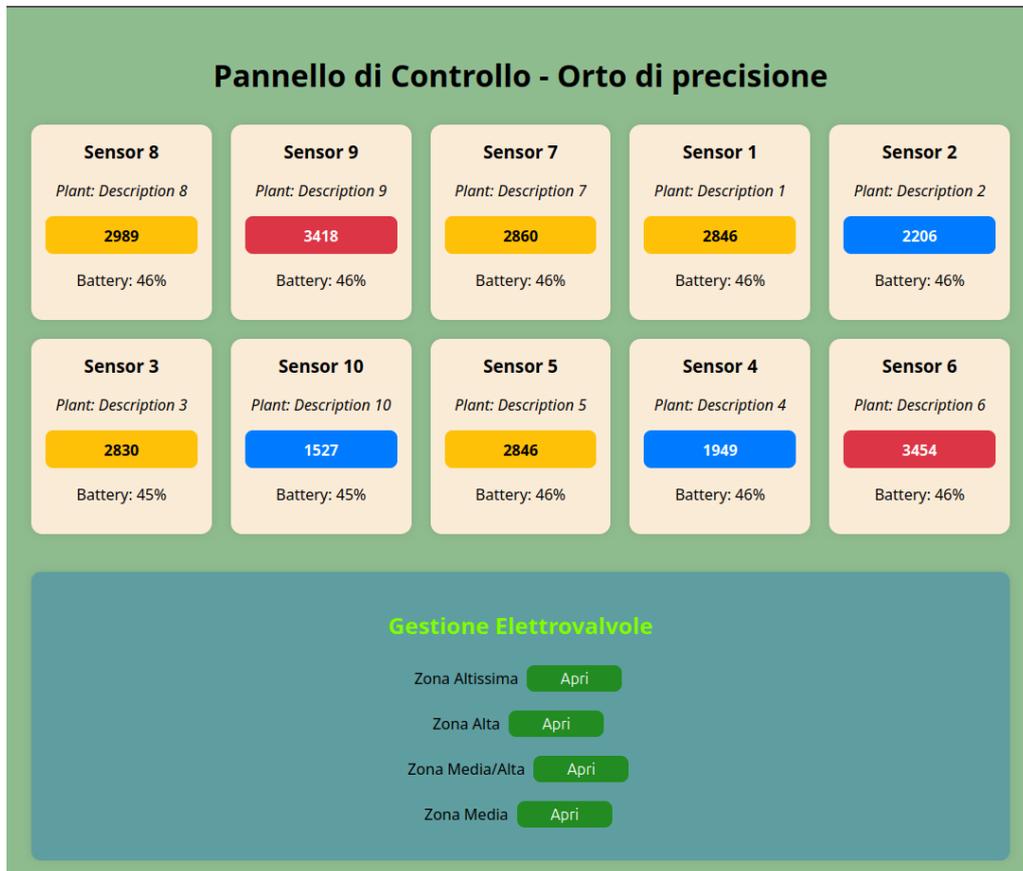


Figura 3.4: Interfaccia utente della dashboard web per la gestione dell'orto.

3.3.1 Visualizzazione dei dati dei sensori

La prima sezione della dashboard, mostrata completamente nella figura e parte integrante del layout, è dedicata al monitoraggio dei dati provenienti dai sensori di umidità. Ogni sensore è rappresentato da un riquadro che mostra:

- un indicatore colorato che riflette il livello di umidità rilevato (blu = umido, giallo = normale, rosso = secco);

- il valore numerico della carica residua della batteria;
- il nome del sensore, associato a un ID numerico univoco.

Questa visualizzazione genera una sorta di *heat map monodimensionale*, utile per farsi un'idea generale dell'umidità nelle diverse aree dell'orto. Nonostante il numero di sensori sia limitato, la suddivisione per zona e coltura consente comunque di effettuare inferenze attendibili sullo stato idrico dell'orto.

La raccolta dei dati avviene ogni ora, scelta progettuale motivata dalla necessità di ottimizzare il consumo energetico dei nodi sensore. Questa frequenza è considerata un buon compromesso tra tempestività e autonomia operativa. Al momento non è previsto un sistema di storico, ma tale funzione potrà essere facilmente integrata in futuro.

3.3.2 Interfaccia di controllo

Controllo delle elettrovalvole Subito dopo la sezione dei sensori si trova il pannello per la gestione delle elettrovalvole. Per ciascuna valvola sono presenti:

- una label testuale che identifica la zona (es. "Valvola Zona Alta");
- un pulsante, ad indicare anche lo stato di apertura o di chiusura della valvola.

Le valvole sono controllate in tempo reale grazie al relè attivo di continuo collegato via MQTT al Raspberry Pi. Solo il pulsante relativo all'azione effettivamente disponibile (la funzione che attiva lo stato opposto rispetto a quello in cui si trova il relè) risulta visibile; alla pressione del pulsante la descrizione è modificata tramite script JavaScript, in base allo stato ricevuto dal controller MQTT.

Controllo della pompa La terza sezione della dashboard consente di accendere o spegnere la pompa di irrigazione principale. Anche in questo caso, lo stato viene rappresentato con un pulsante a due stati: *Accendi* e *Spegni*, dei quali solo quello coerente con lo stato corrente risulta attivo. Il controllo in tempo reale consente di attivare la pompa manualmente in caso di necessità, ad esempio per prove o irrigazioni d'emergenza.

Legenda zone e colture L'ultima sezione fornisce all'utente una mappa logica dell'orto. Viene specificata, per ciascun sensore:

- l'ID del sensore (es. Sensore 3);
- la zona di appartenenza (es. Zona Alta);
- le colture di riferimento (es. Melanzane, Peperoni).

Questa legenda facilita la lettura dei dati nella sezione di monitoraggio, rendendo la dashboard accessibile anche a chi non abbia familiarità con gli ID tecnici.

Sicurezza e autenticazione Poiché la dashboard è accessibile via Web, anche dall'esterno della rete locale, è stato implementato un meccanismo di login tramite credenziali di amministratore. La pagina `login.html` prevede un semplice form con username e password, richiesti prima di accedere a qualsiasi funzionalità della dashboard.

Questo livello base di autenticazione serve a impedire modifiche accidentali o accessi non autorizzati. Le credenziali sono gestite dal backend Python (non visibile lato client), che verifica le credenziali ricevute tramite metodo POST.

3.3.3 Pseudocodice dello script di controllo

Il comportamento dinamico della dashboard è gestito da uno script JavaScript (`script.js`) che interagisce con il backend via fetch o MQTT. Di seguito un esempio semplificato in pseudocodice del comportamento:

```
aCaricamentoPagina():
  prendiSatatiDalServer()
  per ogni sensore:
    aggiornaColoreUmidita(sensore.umidita)
    aggiornaLivelloBatteria(sensore.batteria)
  per ogni valvola:
    impostaStatoBottoni(valvola.id, valvola.stato)
    impostaBottoniPompa(pompa.stato)
```

```
aClick(bottoneValvola):
```

```
mandaMessaggioMQTT("valvola", id, azione)
```

```
alClick(bottonePompa):  
  mandaMessaggioMQTT("pompa", azione)
```

Il sistema è pensato per essere estendibile: in futuro si potrà implementare una sezione storico per i valori di umidità, orari irrigui o una dashboard mobile.

L'interfaccia utente descritta costituisce un elemento fondamentale per l'usabilità del sistema. Pur mantenendo un approccio semplice e minimale, essa integra tutti gli strumenti necessari per un controllo efficace e tempestivo del sistema di irrigazione di precisione. Grazie alla chiarezza visiva, al feedback near real time e alla sicurezza d'accesso, la dashboard rappresenta un ponte funzionale tra il sistema fisico e l'utente, rendendo il controllo dell'orto digitale affidabile, efficiente e intuitivo.

3.4 Principi guida agronomici

Le *linee guida di irrigazione* rappresentano il cuore decisionale del sistema: esse determinano *quando*, *quanto* e *come* irrigare le diverse zone dell'orto, basandosi sui dati raccolti, sulle condizioni ambientali e sui principi agronomici. In questo contesto, si deve tener conto non solo dei livelli di umidità rilevati, ma anche delle esigenze specifiche delle colture, delle pratiche colturali adottate e delle condizioni stagionali.

Per l'orto in questione, coltiviamo pomodori, melanzane, porri, zucchine, cetrioli, fagiolini, zucca, anguria, meloni, peperoni, oca, cavolo nero e broccoli. Queste piante presentano esigenze diverse in termini di acqua, luce, nutrimento e spazio, per cui la funzione di prescrizione deve essere sufficientemente flessibile.

La rotazione delle famiglie botaniche tra le file (es. solanacee, cucurbitacee, brassicacee, leguminose) permette di migliorare la fertilità del suolo, rompere cicli di parassiti e ridurre l'esaurimento di nutrienti [12].

Nell'orto in questione sono state intercambiate negli anni le posizioni delle colture, ad eccezione di pomodori e fagiolini, per ottimizzare l'equilibrio biologico.

Esigenze di spazio, luce e acqua Le colture vengono posizionate in base alla loro statura, affinché le più alte (es. pomodori, zucca) non ombreggino quelle basse (es. broccolo, cetriolo). Le piante sono abbastanza distanti da non incrociarsi o intrecciarsi, senza allo stesso momento essere troppo distanti da non permettere di collocare abbastanza piante sulla stessa fila. Questa disposizione mirata permette sia una buona acquisizione di luce, sia un'ottimale raccolta di acqua per il fabbisogno idrico delle piante. L'irrigazione a goccia fornisce acqua in modo localizzato, limitando le perdite e adattandosi alle esigenze delle piante.

Tempistica di maturazione

Le irrigazioni erano precedentemente implementate tramite un timer meccanico. Successivamente, nell'arco di questo progetto, si è voluto dare, prima di tutto, pieno controllo sull'irrigazione. Sarà cura dell'operatore od operatrice di attivare l'irrigazione nei momenti più adatti: prime ore del mattino e sera, per massimizzare l'assorbimento, o le ore di maggior calura, per evitare alla pianta un'eccessiva secchezza del terreno. La semplicità della dashboard di controllo, vista nella sezione precedente, aiuterà nello svolgimento di tale operazione.

Sintesi del modello operativo Il sistema combina:

1. Dati dai sensori (umidità, batteria);
2. Supporto al controllo delle valvole;
3. Supporto al controllo della pompa.

La logica da seguire per l'irrigazione manuale deve agire su questi aspetti e generare comandi di irrigazione mirati, con interventi specifici per ciascuna zona, integrati con trattamenti agronomici naturali.

Tutto questo è stato reso possibile dalla pianificazione della posa dei sensori, dalla costruzione di un sistema di irrigazione efficace e mirato e dalla prototipazione di un sistema di controllo efficace e diretto.

Capitolo 4

Prototipazione e testing

Dopo una fase di progettazione articolata e una successiva implementazione dettagliata delle componenti hardware e software, il sistema è stato finalmente predisposto per la messa in opera. In questa fase, tutte le parti sviluppate vengono integrate e testate congiuntamente, simulando le condizioni operative reali e preparando il sistema a un utilizzo continuativo nel tempo.

L'approccio adottato ha previsto prima una validazione parziale dei singoli moduli: i nodi sensore sono stati collaudati singolarmente per verificarne la stabilità energetica, la capacità di acquisizione dati e la trasmissione MQTT. Parallelamente, sono stati testati anche il modulo relè con ESP32-WROOM-32E, la logica di attivazione delle elettrovalvole e la pompa di irrigazione. Una volta accertata l'affidabilità di ciascuna componente, si è proceduto all'integrazione e al test del sistema nel suo insieme.

La versione finale del sistema include tutti i sottosistemi previsti in fase di progetto:

- nodi sensore per l'umidità del terreno e il monitoraggio delle batterie, montati in contenitori protettivi e alimentati autonomamente da pannelli solari e batterie 18650;
- una rete idraulica a quattro zone controllata da elettrovalvole attivate elettricamente;
- una centralina principale costituita da un Raspberry Pi 3B+ che si connette con il server MQTT e fornisce la dashboard di controllo;

- un'interfaccia web responsiva per il monitoraggio e l'attivazione manuale e automatica dell'irrigazione;
- una funzionalità di *programmazione automatica* degli eventi irrigui, introdotta nella fase finale e descritta in dettaglio nella sezione successiva.

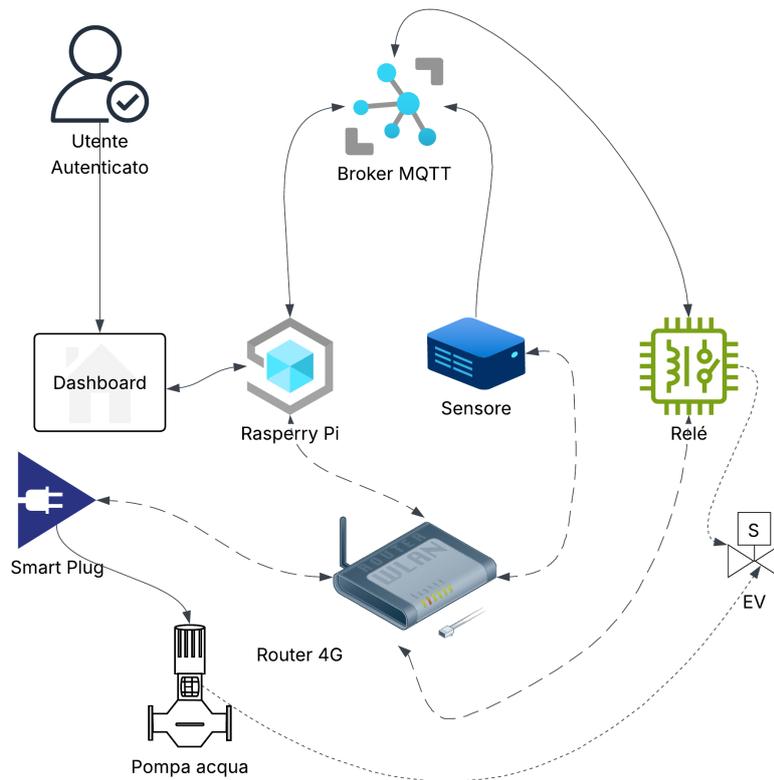


Figura 4.1: Diagramma della configurazione finale del sistema: flusso dati, attuatori e logica software.

Come mostrato nel diagramma in Figura 4.1, il sistema è organizzato in un'architettura distribuita che separa logicamente le funzioni di acquisizione (nodi ESP32-C3), controllo (controller MQTT e logica Python) e visualizzazione (dashboard HTML/JS). Questa separazione ha permesso

una maggiore flessibilità nello sviluppo, facilitando l'estensione del progetto con nuove funzionalità e moduli aggiuntivi, come quello dell'irrigazione programmata, implementata successivamente al buon esito dell'irrigazione manuale.

Durante la fase di test integrato sono stati condotti numerosi cicli di raccolta dati e attivazione dell'irrigazione, sia in modalità manuale tramite interfaccia, sia in modalità automatica attraverso temporizzazioni preimpostate. Inoltre, è stato attivato un sistema di programmazione oraria, in cui l'utente può definire per ciascun dispositivo un orario di inizio, una durata e una ripetizione ciclica. Questa funzione, integrata nel backend Python e visibile nell'interfaccia, permette una gestione completamente autonoma dell'irrigazione anche in assenza di operatori.

Il sistema ha dimostrato una buona reattività e affidabilità nel contesto operativo, riuscendo a garantire la distribuzione idrica mirata alle diverse aree dell'orto. L'adozione di tecnologie leggere ma robuste ha confermato la validità dell'approccio basato su componenti open-source e facilmente reperibili, rendendo il modello replicabile in altri contesti agricoli su piccola scala.

Nel prosieguo di questo capitolo verranno presentate le misurazioni ottenute durante l'utilizzo del sistema (sezione *Collaudo e dati rilevati*) e la dinamica concreta delle attivazioni irrigue sia manuali che automatiche (sezione *Esecuzione dell'irrigazione*), fornendo un quadro chiaro delle prestazioni del prototipo.

4.1 Collaudo e dati rilevati

Una volta completata l'implementazione delle varie componenti del sistema, si è passati alla fase di collaudo sul campo, con l'obiettivo di valutare il comportamento dei sensori in condizioni operative reali. L'attenzione principale è stata rivolta alla qualità e coerenza dei dati di umidità rilevati, alla stabilità delle letture nel tempo e alla resistenza del sistema in presenza di condizioni ambientali variabili.

I sensori di umidità sono stati installati nelle vicinanze delle radici di piante campione appartenenti a ciascuna zona irrigua, nei dintorni anche del foro del gocciolante. La loro collocazione è avvenuta manualmente, con la punta del sensore inserita nel terreno fino a pochi millimetri dal

corpo elettronico superiore. In Figura 4.2, si può osservare un esempio di posizionamento in prossimità di una pianta di pomodoro. Il sensore è stato orientato parallelamente al tubo gocciolante, in modo da monitorare l'area effettivamente raggiunta dall'irrigazione.

4.1.1 Tendenze osservate nelle letture

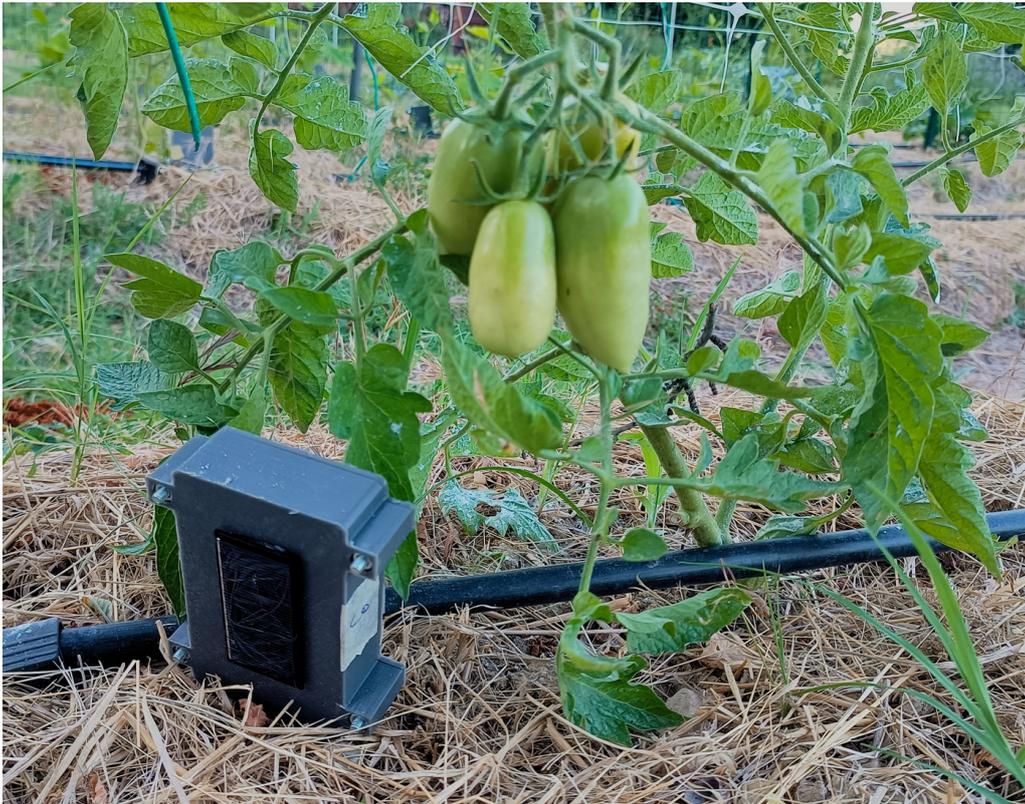


Figura 4.2: Nodo sensore posizionato nel terreno ai piedi di una pianta di pomodoro.

Durante i primi giorni di test, si è osservato un comportamento coerente dei valori di umidità ricevuti. I dati venivano raccolti ogni ora, pubblicati via MQTT e visualizzati nella dashboard. Le letture hanno evidenziato una variazione sensibile in seguito alle irrigazioni, seguite da una discesa graduale che conferma l'evaporazione naturale dell'acqua dal suolo. Tuttavia, è stato

anche osservato che il terreno tendeva ad asciugarsi piuttosto rapidamente in alcune aree, probabilmente a causa del fatto che i sensori non raggiungono grande profondità nel terreno. Questo effetto è stato accentuato nei giorni più caldi e in presenza di forte vento.

Per validare la precisione delle letture, si è proceduto anche a effettuare irrigazioni manuali mediante tubo a pressione, indipendentemente dal sistema di gocciolamento. Queste irrigazioni localizzate hanno permesso di valutare la sensibilità del sensore a un incremento d'acqua superficiale e a microinfiltrazioni. I risultati hanno confermato la buona capacità del sensore di registrare variazioni repentine nell'umidità superficiale, dimostrando la sua efficacia anche in condizioni variabili.

Un ulteriore aspetto considerato è stato la resistenza del sensore agli spruzzi d'acqua e alla pioggia. Sebbene non siano certificati impermeabili, essendo stati disegnati a mano e costruiti tramite stampante 3D, i contenitori protettivi stampati in PETG si sono dimostrati sufficientemente resistenti a piccoli schizzi. Non si sono registrate infiltrazioni o danni ai componenti, a patto che l'acqua non superasse la guarnizione del coperchio superiore.

I dati raccolti hanno inoltre messo in luce differenze tra le diverse tipologie di colture. Piante come pomodori, zucchine, meloni e oca hanno mostrato una minore capacità di ritenzione dell'umidità nel suolo, con curve di asciugatura più veloci rispetto, ad esempio, a colture come porri, cavolo nero e fagiolini, che tendevano a esaurire l'acqua più lentamente. Queste osservazioni sono state confermate da ispezioni visive e misurazioni dei sensori, dimostrando che il sistema è in grado di evidenziare differenze agronomicamente significative anche su scala ridotta.

Il sistema di raccolta dati è risultato stabile: le letture sono state trasmesse regolarmente e visualizzate nella dashboard, con valori coerenti e privi di fluttuazioni anomale. La logica del microcontrollore prevede l'attivazione del modulo Wi-Fi, l'invio dei dati e il ritorno in modalità a risparmio energetico, riducendo al minimo il consumo energetico. Nessun nodo ha mostrato segni di malfunzionamento nei primi giorni di funzionamento.

4.1.2 Gestione energetica e autonomia dei nodi

Durante l'intero periodo di test, non sono stati registrati episodi di disconnessione o perdita di pacchetti MQTT da parte dei nodi sensore. I microcontrollori ESP32-C3, configurati con identificativi univoci e gestiti dal

broker MQTT online che comunica con il Raspberry Pi, hanno mantenuto una comunicazione stabile, confermando la solidità dell'architettura proposta. La gestione dei dati tramite codice asincrono, insieme all'uso di topic separati per ciascun sensore, ha permesso una raccolta ordinata e continua.

Uno dei punti cardine del progetto era assicurare che i sensori potessero operare in modo autonomo e per lunghi periodi senza necessità di interventi esterni. Ciascun nodo è alimentato da una batteria agli ioni di litio da 3.7V (18650), mantenuta carica da un piccolo pannello solare da 5V montato sul coperchio del contenitore.

Il firmware del sensore è stato progettato per minimizzare i consumi energetici: il microcontrollore si risveglia ogni ora, effettua due letture (umidità e tensione batteria), le invia via MQTT e torna in modalità risparmio energetico. La durata complessiva di ogni ciclo attivo è inferiore al minuto, rendendo il consumo medio estremamente ridotto. Questa configurazione ha permesso ai nodi di mantenere una carica residua costante anche con un'irradiazione solare parziale, garantendo continuità di funzionamento.

Le letture della tensione raccolte tramite partitore resistivo hanno confermato che la carica della batteria oscilla stabilmente tra 3.7 e 4.2 V, con un picco al mattino e un calo minimo verso sera. Anche nei giorni nuvolosi, l'autonomia non è stata compromessa, dimostrando la validità della soluzione adottata.

Analizzando i dati complessivi, si osserva come la distribuzione dell'umidità nel terreno sia effettivamente influenzata dalla tipologia colturale e dalla posizione. Nelle ultime settimane di Giugno, le letture medie di umidità, ADC su scala da 0 a 4095, si attestavano tra i 3200 e i 3800, indicando un terreno generalmente secco nelle ore centrali della giornata. Solo nelle zone irrigate in modo più frequente e con piante più ombreggianti o ad alta ritenzione idrica come zucchine e meloni, i valori si mantenevano sotto quota 2500 anche per più di 24 ore.

Queste informazioni si possono rivelare preziose per calibrare soglie ad hoc per l'attivazione dell'irrigazione tramite temporizzazioni personalizzate, contribuendo a ridurre sprechi e a migliorare l'efficacia complessiva dell'intervento agronomico.

In sintesi, la fase di collaudo ha confermato il corretto funzionamento dei nodi sensore sotto diversi aspetti: stabilità elettrica, precisione nella rilevazione, autonomia energetica e resistenza agli agenti esterni. Complessivamente quindi, questa fase di collaudo dei sensori ha confermato anche la

validità dell'approccio adottato. La combinazione tra posizionamento mirato, contenitore protettivo e letture periodiche ha permesso di monitorare in modo efficace lo stato idrico del terreno in prossimità delle radici. La capacità di adattarsi alle dinamiche del terreno e alle caratteristiche delle colture ha posto le basi per una gestione irrigua realmente intelligente, che sarà discussa nella prossima sezione.

4.2 Esecuzione dell'irrigazione

Dopo aver verificato il corretto funzionamento del sistema di rilevamento dati, l'attenzione si è spostata sull'esecuzione pratica dell'irrigazione. Questa fase rappresenta il compimento dell'obiettivo progettuale: garantire la distribuzione efficiente e automatica dell'acqua alle colture, riducendo l'intervento umano e ottimizzando le risorse disponibili.

La gestione dell'irrigazione ha attraversato due fasi principali: una fase iniziale a controllo manuale, utile per testare l'hardware e valutare le tempistiche ottimali e una successiva fase automatizzata, ottenuta grazie all'estensione della logica software, che ha permesso di introdurre una funzionalità di programmazione temporizzata.

4.2.1 Controllo manuale e primo utilizzo funzionale

Considerando la natura del caso di studio, ovvero che si sarebbe dovuto cercare una soluzione concreta e fruibile per il problema dell'irrigazione di un orto domestico, l'idea di automatizzare il processo di manutenzione del campo riguardava un dominio familiare. Per questo il controllo manuale dell'irrigazione era stato previsto come base di partenza per un sistema modulare e facile da ampliare, accessibile ed usufruibile anche da persone non avvezze a tecnologie *IoT*.

Infatti, in una prima configurazione operativa, l'attivazione dell'irrigazione era affidata esclusivamente all'intervento manuale dell'operatore, attraverso la sezione dedicata della dashboard. In questo contesto, l'interfaccia utente forniva comandi di apertura e chiusura per ciascuna elettrovalvola, nonché per la pompa principale, consentendo un controllo diretto e immediato. Questa funzionalità è permessa in due metodologie differenti:

- **Per le elettrovalvole:** grazie al trasporto Wi-Fi dei comandi pubblicati con protocollo MQTT, che sono inviati dall'operatore tramite il pannello web e sono ricevuti dalla piattaforma server in esecuzione sul Raspberry Pi 3B+. Il server, o controller, invia i comandi al modulo ESP32-WROOM-32E integrato nel relé nella scatola di derivazione elettrica, che attiva la corrispondente valvola.
- **Per la pompa:** Il controllo passa attraverso una presa Smart, TP-Link Tapo 110, che prevede funzioni di accensione e spegnimento tramite una libreria dedicata, sviluppata dalla community, in Python. La presa è anche controllabile tramite applicazione mobile appositamente sviluppata direttamente dal produttore, che però non viene usata in questo progetto.

Questa soluzione primaria ha permesso di verificare in modo puntuale la funzionalità degli attuatori: ogni comando inviato alla dashboard veniva immediatamente trasmesso al controller Python sul Raspberry Pi, che pubblicava via MQTT il relativo messaggio su topic specifici. I relé, collegati alle elettrovalvole, rispondevano in tempo reale all'apertura e chiusura della linea idrica. Lo stesso valeva per la smart plug che controlla la pompa.

La modalità manuale è stata particolarmente utile nella fase iniziale per calibrare i tempi di irrigazione, osservare la risposta del terreno e dei sensori e correggere eventuali inefficienze idrauliche. Tuttavia, l'assenza di automazione rappresentava un limite: l'utente doveva accedere periodicamente alla dashboard per avviare e interrompere ogni ciclo, riducendo l'efficienza del sistema soprattutto in caso di assenza prolungata.

4.2.2 Programmazione automatica e temporizzazione

In una fase successiva, a impianto idraulico ultimato e dopo aver confermato la stabilità delle elettrovalvole e della pompa, si è deciso di integrare una funzionalità di programmazione dell'irrigazione. Questo modulo consente all'utente di definire in modo indipendente, per ciascun dispositivo (pompa e valvole), un orario di inizio, una durata in minuti e un intervallo di ripetizione.

L'interfaccia è stata ampliata per includere una tabella interattiva, come mostrato in Figura 4.3, dove l'utente può impostare i parametri per ciascun attuatore. Ogni riga rappresenta un dispositivo controllabile; l'utente può

attivare o disattivare la schedulazione, scegliere l'orario e la frequenza e salvare le impostazioni con un semplice clic.



Figura 4.3: Sezione della dashboard dedicata alla programmazione dell'irrigazione.

La logica è gestita completamente nel backend Python che gira sul Raspberry Pi. Un thread separato monitora ciclicamente l'orario di sistema e confronta i valori con quelli salvati dall'utente. Se le condizioni sono soddisfatte, il sistema invia automaticamente i comandi di apertura ai dispositivi programmati e ne gestisce la chiusura dopo il tempo impostato.

Il seguente pseudocodice rappresenta in modo semplificato l'algoritmo implementato:

```
ciclo_di_temporizzazione():
    ogni minuto:
        per ogni dispositivo programmato:
            se attivo e orario corrisponde:
                se tempo trascorso > intervallo:
                    invia comando di apertura
                    pianifica chiusura dopo X minuti
                    aggiorna data/ora dell'ultimo avvio
```

La modularità dell'architettura software ha reso possibile l'aggiunta di questa funzionalità in modo fluido e con minimi interventi sulla struttura esistente. L'infrastruttura MQTT ha supportato pienamente la tran-

sizione da un sistema a controllo manuale a uno completamente automatico, mantenendo comunque la possibilità di intervento diretto da parte dell'utente.

Questa soluzione apre inoltre la strada verso forme più evolute di prescrizione irrigua, basate su regole temporali. Sebbene attualmente la logica segua solo orari predefiniti (ad esempio, mattina presto, ore centrali o sera), la struttura consente di estendere facilmente l'algoritmo, introducendo in futuro anche condizioni meteo o dati storici.

La scelta degli orari di irrigazione ha tenuto conto dei principi agronomici: l'irrigazione al mattino permette alle piante di disporre dell'umidità durante la giornata e limita la proliferazione di muffe e funghi. L'attivazione serale, invece, può risultare utile in giornate particolarmente calde per favorire il recupero delle piante stressate. L'attivazione, per un breve periodo, di un ciclo a metà giornata, o comunque nelle ore più calde, potrebbe permettere alle piante di essere più avvezze a resistere ai lunghi ed estenuanti periodi di caldo afoso.

Verifica dei risultati Ad ogni attivazione programmata corrisponde anche l'aggiornamento dello stato del dispositivo nella sezione principale della dashboard. In questo modo, l'utente può verificare se il comando è stato effettivamente eseguito. L'integrazione tra programmazione e visualizzazione in tempo reale assicura un feedback immediato sul corretto funzionamento del sistema.

La transizione da un controllo manuale a uno automatico rappresenta un importante passo in avanti nella gestione dell'orto. Essa ha permesso non solo di ridurre il carico operativo per l'utente, ma anche di aumentare la regolarità e precisione degli interventi irrigui. Questa funzionalità costituisce un primo approccio a una vera prescrizione intelligente, aprendo la strada a future evoluzioni del sistema basate su intelligenza ambientale e dati storici.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppo futuri

Il lavoro svolto ha dimostrato concretamente come i principi dell'agricoltura di precisione possano essere efficacemente applicati anche a contesti ridotti e non professionali, come gli orti domestici, familiari o urbani. L'approccio integrato tra tecnologie open-source, sensori a basso consumo energetico, attuatori e interfacce intuitive ha permesso la realizzazione di un sistema completo, stabile e funzionale, in grado di monitorare lo stato del suolo e di gestire l'irrigazione in modo distribuito, automatico e scalabile.

Sebbene spesso l'agricoltura di precisione venga associata a grandi impianti o coltivazioni estensive, l'esperienza condotta ha evidenziato come anche piccoli appezzamenti o addirittura orti da balcone, possano beneficiare dell'introduzione di logiche di raccolta dati, analisi e intervento mirato. Il basso costo dei componenti e la flessibilità delle piattaforme utilizzate rendono infatti queste soluzioni accessibili a un ampio pubblico, potenzialmente rivoluzionando il modo in cui l'agricoltura viene percepita e gestita in ambito domestico.

5.1 Bilancio complessivo dell'esperienza

La realizzazione del sistema ha richiesto competenze trasversali in ambito elettronico, informatico, idraulico e agronomico. Tutte le componenti sono state progettate, prototipate e installate ex-novo: dalla rete idraulica con valvole controllabili elettricamente, ai nodi sensore autosufficienti, fino all'infrastruttura software basata su Raspberry Pi, MQTT e dashboard web personalizzata.

I dati raccolti durante il collaudo hanno confermato la coerenza e l'affidabilità del sistema: l'umidità del terreno viene monitorata con regolarità, i sensori si mantengono autonomi grazie all'alimentazione solare, le elettrovalvole rispondono correttamente ai comandi e l'interfaccia utente permette di controllare ogni funzione, anche da remoto.

L'aggiunta, in corso d'opera, della programmazione automatica dell'irrigazione ha ulteriormente rafforzato l'autonomia del sistema, permettendo l'esecuzione di cicli irrigui in orari prestabiliti, secondo intervalli e durate configurabili per ogni zona.

Per quanto riguarda invece la sensoristica, elemento fondamentale si è rilevato il contenitore del nodo di raccolta, necessario per garantire l'operatività continua in ambiente esterno. La sua compattezza consente l'installazione direttamente vicino al terreno o montato su un palo e lo spazio interno può essere facilmente adattato anche ad altri formati di sensori o micro-controllori compatibili con il form factor dell'ESP32-C3.

Il contenitore progettato è un esempio concreto di come la stampa 3D possa affiancare l'elettronica embedded e l'IoT, permettendo la realizzazione di prototipi robusti e personalizzati con costi contenuti.

5.2 Sviluppi futuri e prospettive

Sebbene il sistema non implementi ancora una vera e propria funzione di prescrizione irrigua, è evidente come le basi siano state tutte predisposte per una sua integrazione futura. Dopo un periodo di raccolta dati sufficiente a identificare soglie di comportamento, si potrebbe infatti introdurre un modulo di analisi automatica, attivabile dalla dashboard, che verifichi in tempo reale lo stato di umidità del suolo.

Un algoritmo semplice ma efficace potrebbe, ad esempio, attivare l'irrigazione automatica se, in una determinata fascia oraria, un certo numero di sensori in una zona rileva valori inferiori a una soglia di siccità (es. 3000 su scala ADC). Tale logica consentirebbe un intervento più intelligente, flessibile rispetto alla sola programmazione temporale, ma al contempo controllabile e trasparente per l'utente.

Altri sviluppi possibili includono:

- l'estensione del numero di zone irrigue e nodi sensore;

- l'introduzione di uno storico visivo dei dati raccolti, con grafici e media settimanali;
- l'integrazione con servizi meteo o sensori climatici per una prescrizione più accurata;
- l'ottimizzazione del consumo energetico tramite protocolli a lungo raggio (es. LoRa);
- la stampa 3D di contenitori con migliori caratteristiche di isolamento.
- l'utilizzo di un sensore di prossimità, associato ad un micro-controllore, per rilevare il livello dell'acqua nella tanica.

Vantaggi della configurazione modulare La configurazione adottata permette una gestione altamente flessibile dell'irrigazione, adattabile alle diverse colture e stagioni. Ogni componente può essere sostituito o riparato con facilità e la rete può essere estesa per coprire nuove aree coltivate.

L'adozione del tubo interrato, la protezione delle diramazioni con coperture in tegole e la possibilità di controllo manuale e automatico rendono l'impianto adatto a un utilizzo domestico evoluto, ispirato ai principi delle moderne serre agricole ma realizzato con costi contenuti.

Considerazione finale L'esperienza ha evidenziato come sia possibile, con risorse limitate e tecnologie aperte, costruire un sistema completo e funzionale che porti benefici reali nella gestione dell'acqua e nella salute delle piante. Con il progredire del progetto, si potrà arrivare a un sistema totalmente autonomo, in grado di adattarsi dinamicamente alle condizioni ambientali, migliorando produttività, efficienza e sostenibilità anche nel più piccolo degli orti.

Bibliografia

- [1] Park Y. Ahn C. *Design and Implementation of IoT-based Smart Irrigation System Using MQTT Protocol and Cloud Platform*. MDPI, 2022.
- [2] Alimentatore trasformatore ac-dc 220v-12v 100w 8.33a ip20. Disponibile online.
- [3] Modulo relè a 4 canali con esp32-wroom integrato. Disponibile online.
- [4] NanJing Top Power ASIC Corp. *TP4056 Datasheet*, 2024.
- [5] FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The Future of Food and Agriculture - Trends and Challenges*. Food and Agriculture Organization, 2017.
- [6] Raspberry Pi Foundation. *Raspberry Pi 3 Model B+ Product Brief*.
- [7] Valenti G. *IoT per l'agricoltura: progettare sensori e sistemi di monitoraggio*. Tecniche Nuove, 2020.
- [8] Natasha Harris. Companion planting guide. *WVU Extension*, 2025.
- [9] Texas Instruments. *Designing battery-powered applications with low-power MCUs*. Texas Instruments, 2020.
- [10] L. A. et al. Monteiro. *Precision irrigation management: A contribution toward sustainable agriculture*. Elsevier, 2016.
- [11] F. J. Pierce and P. Novak. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 2002.

-
- [12] Matteo Ruggeri Pierluigi Meriggi. Sistemi colturali sostenibili, i vantaggi delle leguminose in rotazione. *Terra e Vita*, 2019.
- [13] Carte dei suoli dell'emilia-romagna. Disponibile online.
- [14] I suoli dell'emilia-romagna. Disponibile online.
- [15] LTD Shenzhen haiwang sensor co. *HW-101 HW-moisture sensor V2.0 Specification*.
- [16] OASIS Standard. *MQTT Version 3.1.1 Protocol Specification*, 2014.
- [17] Espressif Systems. *ESP32-C3 Technical Reference Manual v4.0*, 2025.
- [18] Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32E Datasheet Version 1.8*, 2025.
- [19] Eggplant companion plants. Vegega.
- [20] Goodspeed Vishnumolakala, Jia and Hatterman-Valenti. Evaluating irrigation strategies for tomato and pepper crops. *Hortidaily*, 2025.
- [21] Wang N. Zhang N., Wang M. Precision agriculture. a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002.