

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in Ingegneria meccanica

Tesi di laurea magistrale

**Studio e progetto di un banco
prova per irrorazione di pesticidi in
vigneto tramite droni**



Relatori:

Prof. Terenziano Raparelli

Prof.ssa Gabriella Eula

Ing. Giuseppe Pepe

Candidato:

Marco Persico

Ottobre 2020

Sommario

Il presente lavoro di tesi verte sulla progettazione originale di un banco prova per laboratorio, in grado di riprodurre dei trattamenti di irrorazione eseguiti con un drone in vigneto. L'applicazione di questo progetto è orientata ai vigneti coltivati con uva da vino, tipicamente organizzati in filari paralleli di piante allineate.

La fase di progettazione è stata preceduta da un'ampia ricerca sul panorama attuale dei droni agricoli, specialmente i droni irroratori, e sui metodi di irrorazione dei prodotti fitosanitari che si usano oggi.

Il progetto del banco prova ha fatto riferimento alle caratteristiche di un drone commerciale (DJI MG-1) e di un vigneto situato a Vicoforte (CN), cercando di cogliere i loro punti interessanti per trasferire in laboratorio le proprietà dei trattamenti di irrorazione sul campo.

Dalle informazioni ottenute in fase di ricerca e grazie all'aiuto offerto da figure esperte nell'ambito della viticoltura e dei trattamenti di irrorazione, è stato possibile definire un progetto preliminare del sistema di irrorazione da utilizzare nel banco prova; questo circuito è stato invero pensato per essere impiegato anche a bordo di un drone irroratore, in modo da poter creare un travaso diretto tra le prove sperimentali condotte in laboratorio e l'applicazione pratica della tecnologia esaminata.

Il banco prova è stato progettato per ospitare il suddetto sistema e permettergli di muoversi, come se fosse esattamente installato a bordo di un drone irroratore, ed essere contornato da un simulatore di vigneto, in modo tale da riprodurre e poter studiare a fondo i meccanismi dell'irrorazione in laboratorio, che è un luogo di prova più agevole rispetto a un vero vigneto e dove è sicuramente più facile effettuare una campagna di sperimentazioni.

Successivamente alla progettazione del banco prova, è stata eseguita una valutazione dei costi di costruzione del banco medesimo: per fare ciò sono state effettuate piccole ipotesi su come dovrebbe essere realmente costruito tutto il sistema.

Abstract

This thesis deals with the original design of a laboratory test bench to simulate spraying treatments performed with a drone in vineyards. The application of this project is oriented to wine grapes vineyards, typically organized in parallel rows of aligned plants.

The design phase was preceded by a review of the current agricultural drones, especially spray drones, and the current methods to spray plant protection products.

The test bench project refers to the characteristics of a commercial drone (DJI MG 1) and a vineyard located in Vicoforte (CN), trying to capture their interesting points to transfer the properties of field spraying treatments to the laboratory.

From the information obtained during the research phase and thanks to the help offered by some experts in the field of viticulture and spraying treatments, it was possible to define a preliminary design of the spraying system to be used in the test bench; this circuit was indeed designed to also be used on board a sprayer drone, in order to relate directly the experimental tests conducted in the laboratory to the practical application of the technology examined.

The test bench was designed to house the designed system and allow it to move, as if it were exactly installed on board a sprayer drone; a vineyard simulator is placed around this element, in order to study the mechanisms of spraying deeply in the laboratory, which is an easier place than a real vineyard and where it is certainly easier to carry out an experimental campaign. After the design of the test bench, an evaluation of the construction costs of the test bench was carried out: to do this, some hypotheses were made on how the whole system should really be built.

Indice

Introduzione.....	6
1 Studio di un vigneto	10
1.1 Caratteristiche di un vigneto reale.....	12
2 Droni agricoli e utilizzo in vigneto	17
2.1 Monitoraggio delle colture	18
2.2 Aspetti costruttivi degli UAV	19
2.3 Droni agricoli irroratori attuali	20
2.3.1 Drone di riferimento: DJI AGRAS MG-1	20
2.3.2 Altri modelli di drone	23
2.4 Uso di droni in vigneto	25
2.4.1 Drone centrato tra i filari	27
2.4.2 Drone sopra il filare	28
2.4.3 Drone accostato al filare	29
3 Irrorazione di fitofarmaci in vigneto.....	30
3.1 Macchine irroratrici attuali	30
3.2 Caratteristiche delle irrorazioni.....	35
3.2.1 Gocce.....	35
3.2.2 Ventilazione.....	37
3.3 Ugelli irroratori.....	38
3.3.1 Ugelli per il progetto del banco prova	41
4 Progetto del sistema d'irrorazione del banco prova.....	43
4.1 Pompa.....	47
4.2 Ventole	50
5 Progettazione e costruzione del banco prova	54
5.1 Progetto del banco prova	55
5.1.1 Disegni del banco prova progettato	58
5.2 Circuito irroratore e dimensionamento del serbatoio.....	61
5.3 Organi di movimento.....	63
5.4 Simulazione del vigneto	68
6 Valutazione costi di costruzione del banco prova.....	70
6.1 Portale di supporto del simulatore-drone.....	70
6.2 Organi di movimento della struttura del simulatore-drone.....	71
6.3 Simulatore-drone.....	72
6.4 Simulatore-vigneto.....	73
Conclusioni.....	75
Bibliografia.....	78

Introduzione

La produzione agricola, ovvero l'approvvigionamento di cibo, è da sempre un elemento di importanza capitale nel sostentamento e nello sviluppo della società umana. Questa necessità viene soddisfatta attraverso tecniche produttive che possono tuttavia accompagnarsi a squilibri nel sistema ambientale e danni per la salute umana: soprattutto in passato, l'uso indiscriminato di sostanze pericolose ha avuto un forte impatto sul delicato equilibrio ambientale, causando anche profondi mutamenti nell'ecosistema.

La mancata ponderazione di queste ricadute si traduce fin da ora in effetti ambientali negativi e nemmeno va sottovalutata la questione della sicurezza degli operatori agricoli, che sono sottoposti a forti rischi durante il loro lavoro. Il traguardo futuro deve essere sicuramente quello di coniugare le necessità della produzione agricola insieme all'esigenza di limitare i possibili effetti dannosi, per l'ambiente e per l'uomo, rendendo la produzione sostenibile e l'intensità degli interventi proporzionata agli obiettivi perseguiti.

Nell'ambito della sostenibilità è particolarmente significativo il ruolo della difesa delle colture agrarie dagli organismi nocivi: per loro stessa natura, le coltivazioni sono esposte a numerose avversità di tipo biologico e no; è perciò indispensabile adottare adeguate strategie di lotta e di prevenzione che permettano di evitare ingenti perdite produttive, con danni economici per i produttori e con insidie al sostentamento dell'intera collettività.

Lo strumento di difesa fondamentale è sicuramente l'utilizzo dei *prodotti fitosanitari*, ossia composti chimici in grado di proteggere i vegetali (o i loro prodotti) da organismi nocivi e dagli effetti negativi di questi ultimi, siano essi anche altri organismi vegetali. Nella categoria rientrano anche tutte le sostanze capaci di influire sui processi vitali dei vegetali, di conservare i loro prodotti e controllare, o evitare, una crescita indesiderata delle piante. I prodotti fitosanitari sono conosciuti altrimenti come *agrofarmaci* o *fitofarmaci*, oppure universalmente come "prodotti per la protezione delle piante" (PPP - *Plant Protection Product*).

Come accennato in precedenza, i trattamenti fitosanitari sono problematici e sono spesso causa di seri danni ambientali: ad esempio, considerando un'intera stagione vegetativa di difesa di un vigneto, si stima che mediamente circa il 60% del volume irrorato manchi il bersaglio e vada disperso per gocciolamento sul terreno e deriva aerea [1]. Il problema va affrontato soprattutto quando le colture sono situate nei pressi di strade e abitazioni, di ecosistemi o altre colture sensibili; non vanno assolutamente sottovalutati anche l'impatto sulle acque, superficiali (contatto diretto con canali e fenomeni di ruscellamento) o sotterranee (infiltrazioni dovute all'utilizzo e lavaggio delle attrezzature), e i residui lasciati sui prodotti vegetali, destinati in futuro a diventare cibo. Eseguire correttamente i trattamenti consente di migliorare il deposito di prodotto fitosanitario sulla vegetazione e di ridurre la deriva e altre dispersioni, che non costituiscono solamente un problema ambientale-sanitario, ma anche un danno economico causato dalla bassa efficienza.

Negli ultimi anni sono state promulgate varie norme per contenere questi pericoli che minacciano la salute umana e l'ambiente. L'Unione Europea ha stabilito, attraverso le direttive 127 e 128 del 2009, che la progettazione, la costruzione e la manutenzione delle macchine utilizzate per l'applicazione dei prodotti fitosanitari, svolgono un ruolo importante ai fini della riduzione degli effetti nocivi di questi prodotti e perciò sono state introdotte disposizioni riguardanti questi campi di attività; anche per quanto riguarda le attrezzature già esistenti, sono state stabilite prescrizioni relative alle ispezioni e alla manutenzione, a cui esse devono essere sottoposte periodicamente.

Attualmente, la distribuzione di prodotti fitosanitari in vigneto avviene tramite *macchine irroratrici*, in grado di formare delle gocce e distribuirle sulle piante da trattare; spesso sono conosciute familiarmente come *atomizzatori*. Al di là delle differenze costruttive e tecnologiche, le irroratrici sono macchinari portati o trainati da trattori, dotati di serbatoio contenente miscela fitoiatrica da distribuire, di un eventuale sistema pompante e di un importante sistema di ventilazione, responsabile della diffusione del prodotto; esse sono macchine molto pesanti e aventi un certo ingombro (vedi paragrafo 3.1).

Le irroratrici in uso comprendono un vasto insieme di macchinari che parte dalle semplici macchine tradizionali fino ad arrivare alle macchine più moderne, frutto di ottimizzazioni e affinamenti tecnologici portati avanti nel corso degli anni. Queste macchine sono sostanzialmente efficaci, affidabili e ben conosciute; gli ultimi modelli presentano anche livelli di efficienza notevoli, contenendo fortemente i fenomeni nocivi descritti nei precedenti capoversi, tuttavia in certe situazioni sono molto limitate dalla loro "fisicità". Si pensi ad esempio a vigneti coltivati su terreni molto scoscesi, in cui utilizzare un trattore è difficile per via della scarsa trazione (con l'aggravio di portare un'irroratrice) e non è nemmeno molto sicuro per i lavoratori che operano in questo contesto, essendo molto alto il rischio di ribaltamenti e incidenti. In simili contesti si ricorre solitamente a operazioni manuali, con macchine eventualmente portate dagli operatori, ma che presentano a loro volta problemi di sicurezza, perché gli operatori sono esposti ancora più direttamente ai fitofarmaci che irrorano.

Un'altra limitazione fisica dell'insieme trattore-irroratrice è rappresentata dal non poter compiere manovre con raggi di sterzata al di sotto di certi limiti, precludendo la possibilità di lavorare in ambienti angusti, che possono o meno presentare anche problemi di pendenza, e impedendo di fatto di sfruttare al meglio terreni pianeggianti o comunque facilmente lavorabili. Per permettere di svolgere le normali operazioni, si devono infatti realizzare colture con andane (corridoi tra le piante) sufficientemente larghe, a scapito di un miglior sfruttamento dello spazio a disposizione e causando quindi un'inefficienza. Certamente, l'intensità dello sfruttamento dei terreni deve comunque sottostare ai limiti biologici che regolano la vita dei vegetali, ma dover obbedire a questi limiti tecnologici può essere ancora più restrittivo.

I mezzi agricoli tradizionali causano inoltre un grande problema: la *compattazione del suolo*. Tralasciando le insidie naturali, come siccità, alluvioni e temperature estreme, la compattazione del suolo, insieme all'erosione, è probabilmente la minaccia più grande che colpisce le coltivazioni [2]. Essa è causata quasi esclusivamente dalle operazioni agricole, soprattutto dalla pressione delle ruote dei mezzi esercitata nei numerosi passaggi, i quali spesso insistono sulle stesse traiettorie, come avviene in coltivazioni molto ordinate; i vigneti sono un tipico esempio di colture ad alto grado di meccanizzazione e, nell'arco di una stagione vegetativa, si verificano circa una quindicina di operazioni solo per distribuzione di fitofarmaci [1]. Gli effetti negativi della compattazione perdurano generalmente a lungo (nell'ordine di anni) ed è comunque difficile porvi rimedio; essi derivano dall'aumento della densità e della durezza del suolo e dalla diminuzione della porosità. Queste alterazioni fisiche si riflettono inevitabilmente su peggioramenti delle proprietà del terreno: il suolo subisce una forte polverizzazione, diventando molto fangoso quando è bagnato e formando grossi grumi durante l'essiccazione; la struttura porosa del suolo praticamente scompare e ne consegue un impoverimento della capacità di contenere e trasportare acqua e ossigeno; il suolo diventa sempre meno in grado di assorbire e trasportare nutrienti forniti dai fertilizzanti [2]. Il terreno indurito rappresenta inoltre un ostacolo fisico allo sviluppo delle radici delle piante e alla loro penetrazione nel suolo, che raggiungono sempre più con fatica le zone umide nelle stagioni secche. L'aumento di durezza rende anche la coltivazione del suolo molto più laboriosa ed energivora. Globalmente la compattazione causa anche problemi di inquinamento dell'aria e delle acque.

Il problema della compattazione del suolo (che cresce sempre più nel corso degli anni) è un vero circolo vizioso: il terreno compattato richiede mezzi più potenti per lavorarlo, quindi quasi sicuramente anche più pesanti, andando ad aggravare questo fenomeno; attuare misure di contrasto alla compattazione implica lavorare di più il terreno, aumentando i passaggi ma anche la compattazione stessa; anche cercare di aumentare l'area di contatto delle ruote (es. ruote doppie) per attenuare la pressione sul suolo è controproducente perché allarga la superficie compattata; alcune lavorazioni richiedono sempre più forza di trazione, ma per trasformare la coppia delle ruote in trazione occorre aumentare l'aderenza, quindi il peso sul terreno, ed incrementare quindi la compattazione [2].

Per superare i problemi esposti precedentemente, una valida alternativa che si sta piano piano affermando è l'utilizzo di *droni*, ovvero aeromobili a pilotaggio remoto (UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*): si trattano di veicoli radiocomandati a batteria o a motore termico, che possono essere gestiti manualmente o seguire autonomamente percorsi programmati. I droni elettrici hanno modeste portate a causa della piccola capacità delle batterie, ma sono utilizzati con successo in operazioni su piccole superfici, in campi su più livelli o in luoghi impervi [3].

Utilizzare i droni nella lotta ai parassiti porta diversi vantaggi: ad esempio è molto facile raggiungere il luogo delle irrorazioni e non ci sono problemi legati al transito su terreno umido, quindi si risparmia molto tempo sia nelle esecuzioni delle operazioni che nei trasferimenti; si evita ovviamente la questione della compattazione del suolo o possibili accartocciamenti delle piante; sono anche molto utili in caso di spruzzatura a punti su di un'ampia superficie [3]. I droni sono veramente efficaci dal punto di vista della sicurezza degli operatori: chi pilota il drone può stare molto lontano dal punto dell'irrorazione e i rischi per la salute scendono notevolmente rispetto all'utilizzo di trattori o irroratrici manuali [3].

I droni irroratori presentano tuttavia degli aspetti svantaggiosi: non possiedono grandi capacità sia come tempo di volo sia come volumi di miscela fitoiatrica trasportabili; le attrezzature potrebbero essere meno affidabili e i risultati delle operazioni più incerti rispetto alle macchine tradizionali, quindi considerando queste limitazioni, il costo delle attrezzature è perciò relativamente alto [3]. I droni chiaramente operano in aria e le irrorazioni presentano quindi un rischio intrinseco di deriva maggiore, inoltre, tutti i veicoli aerei devono sottostare a leggi e regolamenti relativi al volo, pertanto spesso bisogna impiegare operatori esperti e specializzati per il loro utilizzo, con costi economici considerevoli. Alcune ricerche dimostrano però che la qualità delle irrorazioni eseguite con droni può dare risultati simili a quelle realizzate con macchinari terrestri [3].

Al giorno d'oggi ci sono forti interessi nello studio e nell'applicazione di droni agricoli; un settore che potrebbe beneficiare molto di questa innovazione è quello della viticoltura, che è un comparto economicamente forte, caratterizzato da colture e terreni di valore, spesso difficili da praticare con mezzi terrestri. La viticoltura è una delle più importanti attività del comparto agricolo a livello mondiale e l'Italia è uno dei maggiori attori in questo ambito: con 690 000 ha ricoperti da vigneti, è il terzo coltivatore europeo dopo Spagna e Francia, e detiene circa il 20% della superficie coltivata a vite di tutto il continente (dati 2016) [4]. Nelle zone di coltivazione, l'agroecosistema viticolo ha rilevanti impatti socioeconomici dovuti alla sua interazione con l'ambiente, con il paesaggio, con le caratteristiche culturali e turistiche e con l'occupazione; deve essere gestito e curato con attenzione per preservare le risorse essenziali, come il suolo e l'acqua, ed essere sostenibile [4].

L'ambito di ricerca del presente lavoro di tesi è quello dei vigneti per uva da vino, per i quali si vuole studiare un pacchetto innovativo costituito da un drone e un sistema di irrorazione di fitofarmaci. L'obiettivo di questo lavoro è realizzare un progetto preliminare, completamente originale, di un banco prova da laboratorio per simulare le irrorazioni che si effettuerebbero in vigneto con il drone: è così possibile studiare e mettere a punto il sistema di irrorazione con maggiore facilità rispetto a farlo attraverso delle prove sul campo. Il banco

prova dovrà essere costruibile e gestibile semplicemente e dovrà altresì simulare, il più fedelmente possibile, il vigneto e l'azione del drone, considerando che non è tecnicamente possibile fare prove in laboratorio direttamente con il drone stesso.

1 Studio di un vigneto

Per simulare l'irrorazione tramite drone occorre costruire un banco prova che riproduca molto fedelmente un vigneto, o almeno una porzione di esso, sia a livello geometrico sia a livello fisico. Il *simulatore di vigneto* deve essere molto simile a dei veri filari di viti, cosicché sia possibile trasferire i risultati delle sperimentazioni, condotte in laboratorio, al contesto reale dei veri drone e vigneto. Un simulatore di vigneto poco realistico potrebbe portare a previsioni ingannevoli sul comportamento del drone irroratore in campo.

Per progettare questa parte di banco prova ci si è avvalsi della collaborazione di una azienda agro-turistica di Vicoforte (CN), *Antica Meridiana Relais-Art* di proprietà di Massimo Martinelli, che possiede alcuni vigneti di uva da vino presso la località *Bricco Mollea* (circa 600 m s.l.m.), coltivati con il vitigno *Dolcetto*. L'azienda ha fornito le misure tipiche dell'impianto che sorregge le viti, la cosiddetta *spalliera*, una forma di allevamento molto diffusa nel Nord Italia e molto adatta lavorazioni meccaniche.

In fig. 1 è schematizzata una porzione centrale di spalliera del suddetto vigneto. Questa struttura è formata da una lunga sequenza di pali (metallici, cementizi o lignei) infissi nel terreno a distanze regolari, che hanno come scopo principale quello di sostenere l'altro elemento della struttura, ossia i fili metallici, che sono i veri sostegni per la pianta e la sua chioma. I fili sono corpi continui lunghi quanto l'intera spalliera; devono essere tesi per garantire sufficiente rigidità e sono perciò collegati ad appositi tiranti fissati nel terreno, in corrispondenza dei pali di testata del filare. Il terreno coltivato presenta quindi una serie di spalliere parallele tra loro, occupanti l'intera lunghezza a disposizione, intervallate da corsie (andane) che permettono lo svolgimento delle lavorazioni.

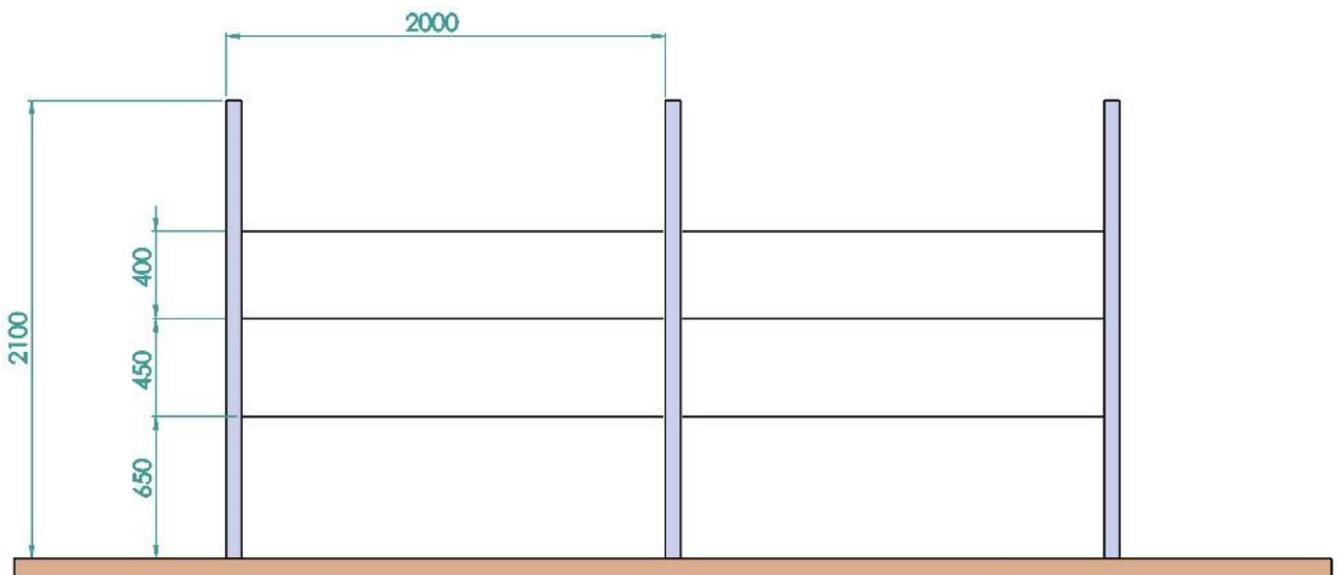
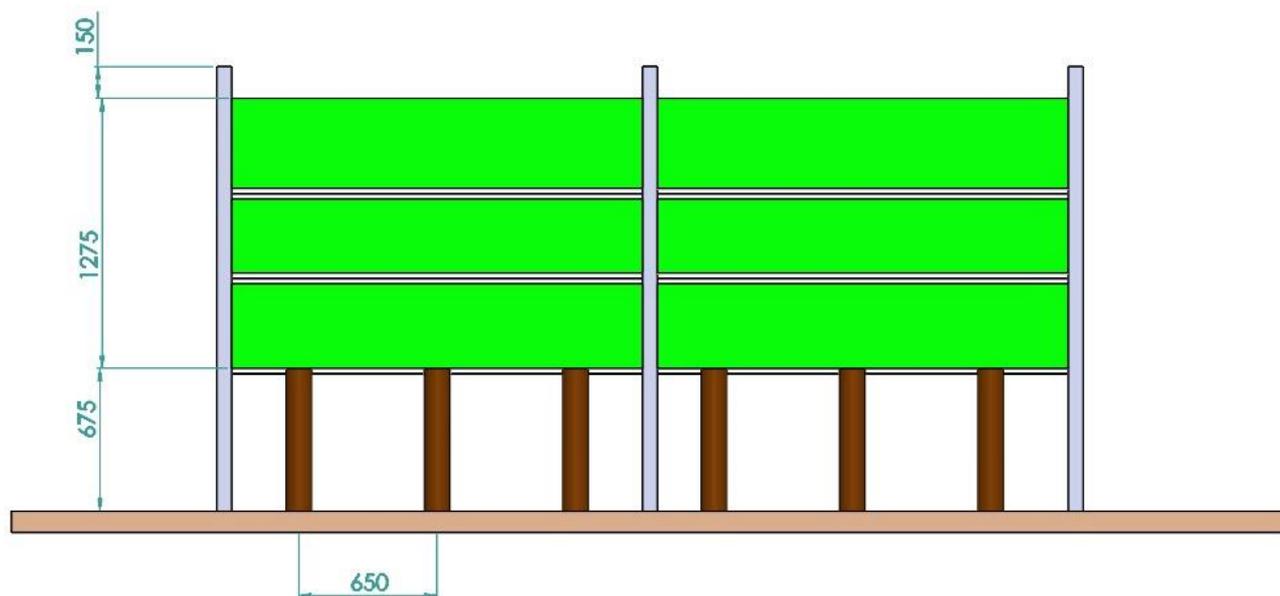


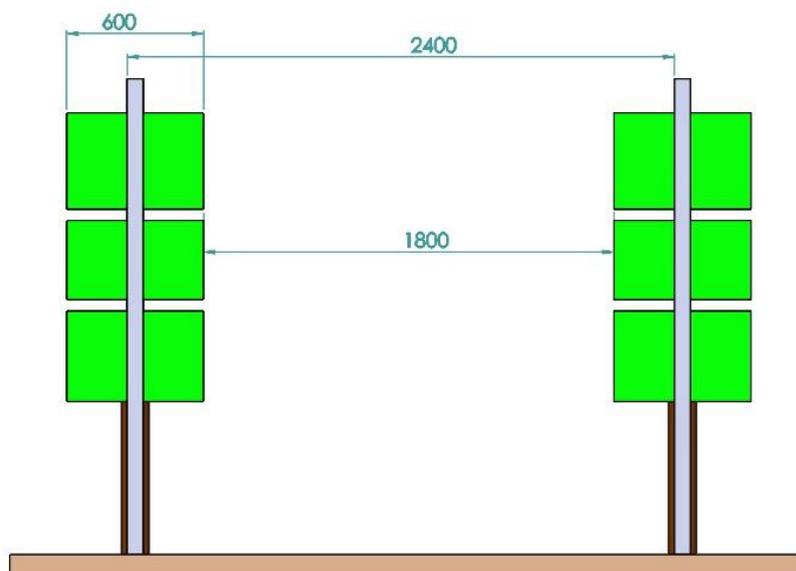
Fig. 1. Prospetto spalliera. Quote in mm

A partire dalle informazioni ricevute, si è provveduto a modellizzare una porzione di vigneto che rappresenti un'unità base dell'intera coltivazione, formata da due campate di spalliera di due filari contigui. In fig. 2 è rappresentato il modello completamente originale

realizzato. Le misure adottate per questo modello corrispondono a quelle di piante completamente sviluppate, quindi con chioma alla massima espansione.



a



b

Fig. 2. Prospetto del vigneto modellizzato: a) laterale; b) frontale. Quote in mm

Questo modello costituisce il progetto di base del simulatore-vigneto del banco prova in questione. Le quote di ingombro reali sono rispettate, ma la complicatissima geometria di una pianta di vite è notevolmente semplificata. Questo approccio è legittimato dal fatto che può essere poco utile inseguire una difficile riproduzione millimetrica della geometria reale, può essere molto più efficace costruire un modello facilmente gestibile, sebbene apparentemente poco realistico, ma che ricalchi adeguatamente il comportamento del vigneto e permetta di ottenere risultati sperimentali coerenti con la realtà. La parte di vegetazione (foglie e rami) è stata perciò resa da corpi prismatici continui: questa approssimazione è giustificata dal fatto

che le operazioni di irrorazione non sono mirate direttamente alle singole foglie, ma coinvolgono l'intera chioma della pianta, quindi può non essere significativo modellizzare le foglie discretamente in quanto distribuite casualmente e oggetto di irrorazioni collettive.

1.1 Caratteristiche di un vigneto reale

Per una corretta simulazione del vigneto reale non è sufficiente una mera riproduzione geometrica dei corpi, ma occorre analizzare più approfonditamente le caratteristiche fisiche delle piante. L'aspetto più interessante da tenere in considerazione è quello del movimento delle foglie nel corso delle irrorazioni: i rami e le foglie non sono infinitamente rigidi ma si deformano e si muovono facilmente. Un altro aspetto importante è quello della dimensione e forma delle foglie: sagome diverse possono influenzare le irrorazioni sia dal punto di vista della superficie-bersaglio (foglie più grosse possono essere più difficili da irrorare e possono schermare più facilmente le foglie interne) sia dal lato fluidodinamico, che riguarda le turbolenze create dal movimento della pianta e delle foglie.

Come appreso da fonti bibliografiche [1] e da colloqui avuti con il proprietario del vigneto, la superficie oggetto dei trattamenti varia nel corso della stagione vegetativa: dall'inizio allo sviluppo dell'infiorescenza, la pianta possiede solo poche gemme ed è poco sviluppata in altezza, occupando lo spazio attorno ai fili più bassi della spalliera; mano a mano che la pianta si sviluppa, vengono eseguite lavorazioni (defogliazioni) che hanno lo scopo di portare i germogli verso l'alto, utilizzando la coppia di fili superiore, per esporre il più possibile i grappoli, in modo che conseguano meno malattie e il loro processo di maturazione sia più rapido. I grappoli, concentrati all'altezza del primo filo nella cosiddetta *fascia produttiva*, possono inoltre essere vendemmiati facilmente dai mezzi meccanici.

Queste lavorazioni porteranno ad avere generalmente una zona con foglie rade e grappoli, compresa entro i fili più bassi; più in alto sarà presente una zona di foglie fitte (circa due o tre strati) e rami legati saldamente, compresa tra i fili superiori; oltre l'ultimo filo, si svilupperà un'area di libera espansione della vegetazione. La parete vegetativa non è quindi omogenea dall'alto in basso: la zona centrale è più difficile da irrorare a dovere, perché molto fitta e le foglie pochissimo mobili a causa delle legature; la zona superiore è trattabile con molta più facilità dato che i rami non sono vincolati; per quanto riguarda la fascia produttiva, un trattamento ottimale dovrebbe investire i grappoli dal basso verso l'alto per irrorare omogeneamente tutti i chicchi [1].

Come illustrato da un colloquio avuto con il dott. Giovanni Minuto del CERSAA (*Centro di Sperimentazione e Assistenza Agricola*) di Albenga (SV), i trattamenti di irrorazione hanno come obiettivo le foglie della pianta o i grappoli o entrambi, a seconda del tipo di trattamento. Non è possibile quindi trascurare l'irrorazione della zona più bassa della pianta perché ha fogliame più rado: le foglie costituiscono il bersaglio delle principali irrorazioni, ma non permettono di esaurire tutti i trattamenti difensivi da svolgere nell'arco di una stagione vegetativa. Il dott. Minuto afferma inoltre che per i trattamenti di irrorazione è di fondamentale importanza l'agitazione delle foglie tramite correnti d'aria: questo movimento crea delle turbolenze locali che aiutano parecchio a diffondere le gocce di miscela fitoiatrica all'interno della chioma, in modo da raggiungere la pagina inferiore delle foglie e le foglie in ombra; anche per i trattamenti localizzati sui grappoli è necessario riuscire a muovere il fogliame perché i grappoli non sono sufficientemente esposti per un'irrorazione diretta efficace. A tal proposito si impiegano sempre le medesime irroratrici per i diversi bersagli.

Sulla scorta di queste informazioni, si è provveduto a svolgere alcune osservazioni sperimentali qualitative che hanno consentito di capire più approfonditamente quanto fossero

in grado di muoversi le foglie di una pianta di vite. Per questioni di praticità è stata analizzata una vite domestica; le seguenti considerazioni potrebbero essere estese al vigneto di riferimento di Bricco Mollea o ad altri tipi di vite, ma allo stato attuale non ci sono garanzie che comprovino questa possibilità.



Fig. 3. *Vite domestica*

In fig. 3 è riportata una fotografia della vite domestica analizzata: si tratta di una pianta di uva da tavola, del vitigno *Italia* (*Uva Italia* o *Ideal*). Questa vite presenta profonde differenze rispetto a quelle del vigneto di riferimento, ma si può comunque osservare un sistema di allevamento analogo alla spalliera, con i rami legati a fili metallici orizzontali e la maggior parte della vegetazione sviluppata attorno al filo più basso, benché in questo caso la crescita dei germogli non sia stata gestita e confinata.

Dalle osservazioni qualitative è emerso quanto schematizzato in fig. 4. La pianta si sviluppa chiaramente in modo ramificato: dal tronco legnoso, il tralcio, si dipartono dei rami erbacei, i germogli, a cui sono attaccate direttamente le foglie oppure altri rami, che si diramano a loro volta in cascata facendosi sempre più sottili.

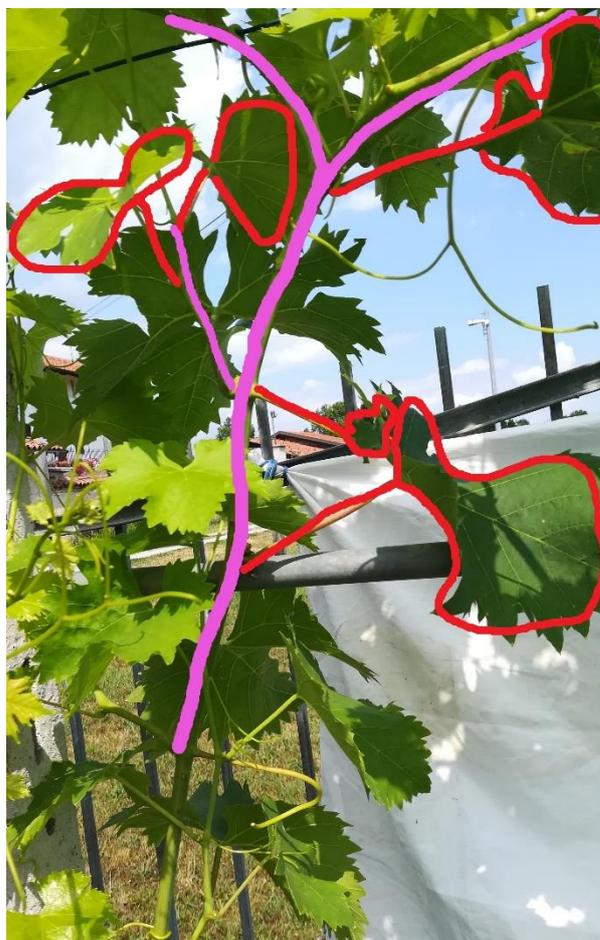


Fig. 4. Vite domestica: a sinistra foto di dettaglio, a destra le stesse foto con parti rigide (magenta) e parti deformabili (rosso) evidenziate

I germogli (segnati in magenta nella fig. 4) sono parecchio rigidi e non si inflettono piegandoli a mano, a meno di non considerare le estremità libere, lunghe circa 50÷100 cm; questi rami costituiscono perciò un “telaio” abbastanza rigido (soprattutto nelle zone centrali, nei pressi dei fili di sostegno) che sorregge la massa fogliare; i rami hanno un diametro approssimativo di 8÷10 mm vicino al tralcio e circa 6 mm nelle zone periferiche, dove si sono diramati più volte.

Le foglie (contornate di rosso in fig. 4 e dettaglio di una in fig. 5) sono chiaramente diverse da quelle del vigneto di riferimento. Si è osservato che presentano una flessibilità modesta: si riescono a flettere tranquillamente a mano, ma bisognerebbe utilizzare una corrente molto forte e concentrata per farlo ad esempio con aria. Le foglie del vitigno *Italia*, approssimate a cerchi, hanno indicativamente un diametro di 10÷13 cm; quella fotografata in fig. 5, che ha caratteristiche medie, ha un diametro di circa 11 cm e una corrispondente area di circa 100 cm². Il vitigno *Dolcetto*, del vigneto di riferimento, ha foglie di dimensioni più piccole, il cui diametro è pressappoco di 5÷6 cm.

Gli elementi di maggior flessibilità sono certamente gli steli delle foglie (segnati in rosso in fig. 4): si trattano di rametti lunghi approssimativamente 4÷10 cm che collegano ogni foglia a un germoglio, aventi un diametro dell'ordine dei 2÷4 mm circa. Questi steli si possono flettere con estrema facilità: nelle fasi di crescita e sviluppo, nella metà dei rametti è presente una zona di colore sbiadito, tra il verde molto chiaro e il giallastro, molto tenera, che assume quasi un comportamento da cerniera rispetto alle estremità degli steli; a fine sviluppo questo comportamento è meno netto, ma gli steli rimangono sempre pochissimo rigidi. In caso la pianta venisse investita da una corrente d'aria, i movimenti che più probabilmente si verificherebbero, sarebbero verosimilmente proprio quelli dovuti alla flessione degli steli delle foglie.

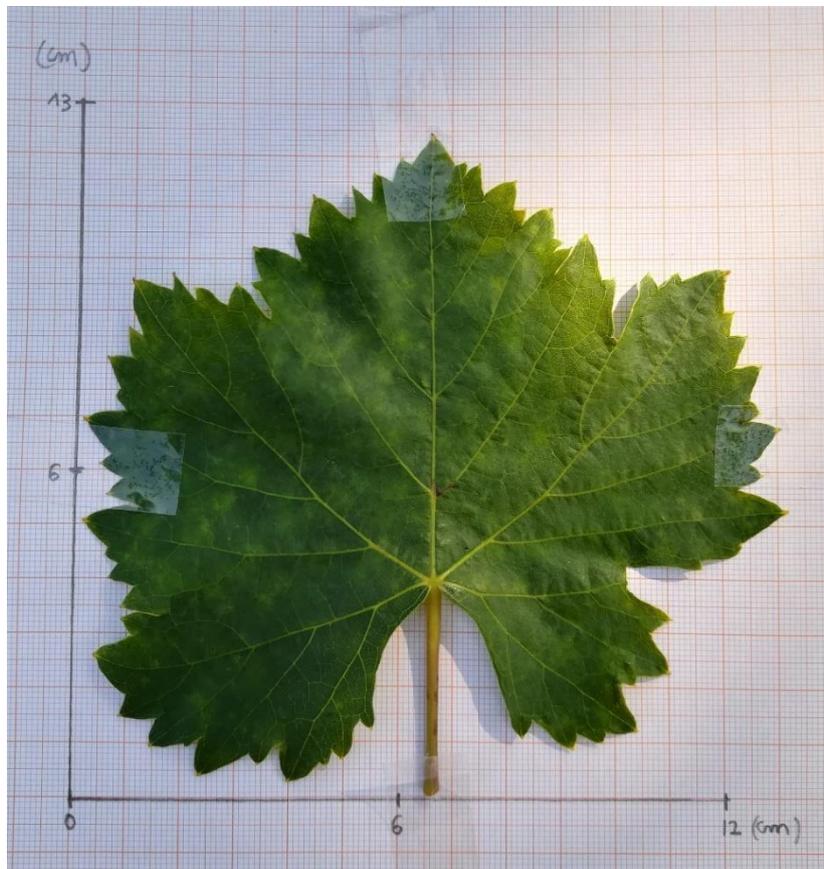


Fig. 5. Foglia di dimensioni medie della vite domestica su carta millimetrata

Dalle osservazioni precedenti si possono ricavare alcune indicazioni per la realizzazione del simulatore-vigneto del banco prova. Si potrebbero impiegare dei fogli plastici non troppo flessibili per simulare le foglie della pianta, evitando di riprodurre la forma lobata nel dettaglio; queste foglie andrebbero a servire come supporto per i captatori, per misurare la copertura dell'irrorazione; sarebbe sufficiente riprodurre la superficie media della foglia, rimandando a successive indagini di approfondimento l'eventuale influenza della sagoma irregolare sulle turbolenze locali, benefiche per il processo di irrorazione.

Si potrebbe inoltre pensare di riprodurre lo stelo delle foglie con tubicini di gomma o materiali simili (ad esempio tubi per aria compressa) che permettano di essere flessi con facilità, ma sufficientemente rigidi da sopportare il peso proprio del tubo e della foglia plastica. Per semplificare il simulatore con un'approssimazione probabilmente accettabile, si potrebbero collegare direttamente i tubicini gommosi ad un telaio metallico che può essere quello del banco stesso. D'altra parte la zona di irrorazione più problematica è quella che presenta maggior rigidità, maggior infittimento delle foglie e minore mobilità: appare più ragionevole concentrarsi sulla riproduzione di questa situazione piuttosto che su quella dei germogli periferici, molto flessibili, liberi di muoversi e facilmente irrorabili, ma che magari presentano più difficoltà ad essere simulati.

2 Droni agricoli e utilizzo in vigneto

Una gestione dell'agricoltura moderna e sostenibile richiede di agire rapidamente e con grande precisione per soddisfare le necessità che si presentano nelle varie colture. I droni possono essere uno strumento molto valido per affrontare queste sfide, sia dal punto di vista esecutivo sia da quello organizzativo. Questi dispositivi permettono di approcciare l'intero ambito dell'agricoltura in modo molto innovativo: essi consentono interventi dall'alto rapidi e puntuali, cosa molto difficile da realizzare con i mezzi terrestri tradizionali, che rimangono prestazionalmente imbattibili per interventi a grande scala su terreni poco insidiosi. Come accennato, l'utilizzo degli UAV non è limitato all'esecuzione di azioni ma rivestono un ruolo importantissimo nell'organizzazione e nella pianificazione delle lavorazioni agricole: questi dispositivi si possono sfruttare per rilevazioni dall'alto, che costituiscono un preziosissimo punto di osservazione (la cosiddetta *vista a volo d'uccello*) praticamente inaccessibile con altri mezzi.

Le applicazioni dei droni in agricoltura sono sempre più numerose [5].

- Si utilizzano per analisi del suolo: i terreni vengono scandagliati con grande precisione e si possono ricavare mappe tridimensionali che consentono di pianificare al meglio semine e irrigazioni e di gestire le fertilizzazioni, controllando il livello di azoto nel terreno.
- Sono utilissimi per il monitoraggio delle colture: campi molto vasti e poco controllabili abbassano fortemente l'efficienza e la resa delle lavorazioni agricole, con l'uso di droni è possibile coprire facilmente queste aree con la sola difficoltà delle condizioni meteorologiche avverse.
- Si può valutare lo stato di salute delle colture, per rilevare tempestivamente processi di infezioni, batteriche o fungine, e identificare piante che mostrano problemi e segnali negativi.
- I droni vengono anche impiegati per l'esecuzione di operazioni quali la semina, sparando nel terreno capsule contenenti semi e sostanze nutritive, e l'irrigazione, utilizzando sensori che possono identificare quali parti di un campo sono secche o necessitano di miglioramenti
- Un'altra importante applicazione è l'irrorazione delle colture con prodotti fitosanitari: i droni possono scansionare il terreno e spruzzare la giusta quantità di miscela, modulando la distanza dal suolo per realizzare una copertura uniforme; questo permette di ottenere migliori efficienze dei trattamenti, riducendo gli sprechi, quindi anche le quantità di sostanze chimiche disperse nell'ambiente, e spesso velocizzando le operazioni rispetto ai macchinari tradizionali.

L'approccio adottato nelle suddette applicazioni si riassume con il termine *agricoltura di precisione*: questo è un concetto di gestione delle lavorazioni agricole che si basa fortemente sull'analisi delle variabili temporali e spaziali di una coltura e sulla formulazione di un sistema di supporto decisionale per rispondere ai problemi rilevati. Questa filosofia ha come scopo quello di migliorare l'efficienza delle colture ottimizzando gli input e consumando le minori risorse possibili, anche attraverso una miglior cura della salute delle piante.

2.1 Monitoraggio delle colture

Come riportato in precedenza, i droni hanno un ruolo molto importante nel monitoraggio dello stato delle colture, una pratica molto utile e sempre più diffusa, che non riguarda solo l'ambito di lavorazioni agricole eseguite tramite UAV, ma anche operazioni svolte in grandi appezzamenti con macchine terrestri più o meno moderne. Attualmente sono impiegate molte tecniche di rilevazione, quali analisi multispettrali, iperspettrali e analisi termiche, affiancate alla più tradizionale fotogrammetria e alle semplici immagini aeree.

Una delle principali tecniche moderne è appunto rappresentata dalle analisi spettrali condotte tramite sensori ottici: queste rilevazioni sono molto rapide e sono condotte a distanza elevata dal campione in esame, evitando così analisi distruttive o invasive che ostacolano lo sviluppo della coltura. È molto semplice immaginare la potenzialità di tali tecniche abbinate all'uso di droni.

La valutazione dello stato fisiologico delle colture è basata sulle modifiche che le radiazioni luminose subiscono nell'interazione con la pianta e i suoi tessuti: ogni costituente del tessuto vegetale (acqua, clorofilla, pigmenti secondari, cellulosa, lignina e proteine) assorbe la radiazione incidente in specifiche bande spettrali, modificando lo spettro della frazione riflessa in funzione della concentrazione del medesimo nel tessuto analizzato [1]. Attraverso studi e ricerche si sono potute stabilire correlazioni tra le proprietà spettrali misurate e quelle della coltura: ad esempio il valore di riflettanza misurato nella banda 350÷480 nm è associato al contenuto di clorofilla del tessuto [1]. Conducendo perciò analisi sulla riflettanza, l'emissione, la fluorescenza o altre proprietà in bande spettrali ben determinate, è possibile ipotizzare lo stato della coltura in esame. Dai risultati di queste analisi non è ovviamente banale risalire alle cause che originano i problemi delle piante; i parametri biologici sono molto concatenati ed è difficile individuare un unico fattore responsabile dei loro cambiamenti.

Le rilevazioni condotte non dipendono solo dalla risoluzione spettrale, ma anche dalla risoluzione spaziale: è molto diverso analizzare un bersaglio con l'ordine di precisione della dimensione di una foglia o della chioma, le misurazioni devono essere eseguite coerentemente con l'obiettivo che sta alla base dell'analisi, per ottenere così risultati sensati. Allo stato attuale, i sensori ottici hanno raggiunto una sufficiente maturità tecnologica per raccogliere adeguatamente dati riguardanti il vigore vegetativo delle colture e anche dei vigneti [1]. Le rilevazioni vengono eseguite con telecamere multispettrali in diversi momenti della stagione vegetativa, successivamente vengono elaborate mappe che evidenziano la distribuzione dell'attività vegetativa della coltura. Gli indici spettrali più utilizzati in queste valutazioni sono ad esempio l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e l'NDRE (*Normalized Difference Red Edge index*), che misurano il rapporto fra la luce riflessa nel campo del visibile e quella nel campo dell'infrarosso; se la coltura è sana e quindi ricca di clorofilla, la pianta assorbe una grande quantità di luce visibile, riflettendo molto nell'infrarosso e poco nel visibile, al contrario piante poco ricche di clorofilla, terreni nudi o acque superficiali hanno riflettanze simili tra infrarosso. e visibile: gli indici soppesano il rapporto tra queste riflettanze permettendo di capire che tipo di corpo o vegetazione si sta esaminando [6].

I droni sono solitamente guidati e controllati tramite un modulo GPS integrato che, oltre a mantenere la rotta, permette di collegare le immagini o le scansioni acquisite a punti geografici precisi; quando verranno eseguiti i successivi trattamenti di risposta, è possibile che il drone (o un altro macchinario sufficientemente intelligente) regoli l'intensità dell'intervento in quel punto in base a quanto misurato e valutato in precedenza, senza necessità di supervisioni o controlli manuali. I droni possono essere dotati di un sistema che mantiene la quota costante e possono stazionare su punti ben precisi individuati con il sistema GPS (purché siano modelli ad ala rotante).

2.2 Aspetti costruttivi degli UAV

I droni aerei (UAV), esattamente come gli aeromobili convenzionali, sono classificabili essenzialmente in due categorie:

- Droni ad *ala fissa*, in cui il velivolo ha delle superfici (ali) atte a generare portanza con il semplice avanzamento, sotto la spinta di rotori ad asse orizzontale. Questi droni sono adatti a voli su distanze più lunghe, con scarse variazioni di traiettoria e velocità. Taluni modelli possono sfruttare correnti e flussi d'aria ed evitare l'impiego di motori.
- Droni ad *ala rotante*, questi velivoli sono dotati di uno o più rotori ad asse verticale che realizzano la necessaria portanza. Molti modelli sono dotati di un grande numero di rotori (multicotteri) disposti su un piano, collegati ad un corpo centrale tramite bracci eventualmente estraibili o ripiegabili. Questi droni possono volare a punto fisso ed effettuare virate repentine o muoversi in varie direzioni.

I droni ad ala fissa hanno solitamente portate maggiori dei droni ad ala rotante: questi ultimi hanno sicuramente bisogno di spendere molta energia per realizzare la portanza necessaria, mentre i primi possono impiegarla quasi esclusivamente per l'avanzamento; tipicamente i droni ad ala fissa possono volare per 30÷40 minuti, rispetto ai 15÷25 minuti raggiunti con i droni ad ala rotante [6].

I droni ad ala fissa possono inoltre spostarsi a velocità maggiori rispetto a quelle tipiche dell'altra categoria; tuttavia, questo aspetto può anche essere svantaggioso perché non possono volare a velocità troppo basse e potrebbero faticare nelle acquisizioni di immagini ad alta risoluzione, con più sovrapposizioni, operazione dove i droni ad ala rotante sono validissimi e accuratissimi [6]. I droni ad ala rotante sono spesso più trasportabili e gestibili, viste le dimensioni eventualmente ridotte o la possibilità di smontaggio e ripiegamento.

I droni agricoli possono essere equipaggiati da motori termici, soprattutto nei primi modelli storicamente impiegati e con un unico rotore, oppure da batterie, generalmente in quelli più moderni e multirotores. I droni a batteria (normalmente del tipo litio-ione-polimero, hanno alta densità di potenza e capacità di ricarica) hanno autonomia molto ridotta (quelli a motore termico possono volare per ore e ore) ma sono i modelli che vanno sempre più diffondendosi.

Nei droni ad ala rotante multirotores ogni rotore ha un proprio motore comandato indipendentemente: la portanza generata è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione; i movimenti orizzontali sono consentiti dalla composizione vettoriale dei diversi valori di portanza di ogni rotore; chiaramente una maggior velocità di rotazione corrisponde ad un maggior consumo di energia e a una riduzione dell'autonomia di volo [5]. La dimensione dei rotori influenza la capacità di carico di questi tipi di droni: una maggior lunghezza delle eliche causa una maggior portanza a velocità inferiori ma peggiora la capacità dinamica di accelerare o decelerare del rotore e quindi dell'aeromobile; d'altra parte le eliche corte, richiedono più velocità per generare la stessa portanza, sforzando maggiormente i motori, che avranno una vita più limitata nel tempo; anche il passo dell'elica è un parametro importante perché influisce sull'efficienza del volo stazionario piuttosto che sull'efficienza delle manovre rapide [5].

Nei droni multirotores c'è un controllore che sovrintende la distribuzione di corrente tra i vari rotori, agendo come un'interfaccia tra i comandi di volo e l'attuazione con i singoli motori per produrre la traiettoria richiesta; questo sistema è conosciuto come ESC (*Electronic Speed Controller*) [5].

2.3 Droni agricoli irroratori attuali

Il panorama dei moderni droni irroratori si arricchisce sempre più di diversi modelli, tuttavia la tendenza che più si è affermata è quella di utilizzare multicotteri, quindi con motori elettrici e batteria, con capacità di carico e di irrorazione molto variabile, privilegiando ora le grandi dimensioni e le grandi potenze, ora le dimensioni compatte e agili, con piccole potenze e magari costi più abbordabili.

Gli UAV per uso agricolo, soprattutto per irrorazioni, sono molto più grandi dei modelli di uso domestico, fotografico o di sorveglianza, cui si è soliti riferirsi; trasportano carichi minimi dell'ordine di 10 kg, mentre quelli normalmente considerati hanno capacità di carico minore di un ordine di grandezza.

Per le caratteristiche di progettazione del banco prova e del sistema di irrorazione da installare a bordo velivolo, si è fatto riferimento a un drone irroratore già diffuso commercialmente: si tratta del drone AGRAS MG-1 prodotto da DJI.

2.3.1 Drone di riferimento: DJI AGRAS MG-1

L'MG-1 è un drone a otto rotori resistente alla polvere, all'acqua e alla corrosione, quindi lavabile senza problemi e perfettamente resistente all'ambiente agricolo; esso può trasportare un carico utile fino a 10 kg. Il produttore afferma che questo macchinario ha la capacità di poter trattare da 2,8 a 4 ettari di piantagione ogni ora, con un'efficienza anche quaranta volte superiore a quella di irrorazioni condotte manualmente. Il drone è rappresentato in fig. 6.



Fig. 6. Drone MG-1

Un serbatoio per il trasporto di sostanze chimiche è collocato sotto il corpo del drone; la miscela fitoiatrica viene irrorata da quattro ugelli irroratori rivolti verso il basso (fig. 7) tramite un sistema di spruzzatura a pressione. Questo drone utilizza un radar a onde per volare sulle colture a un'altitudine costante, in modo da offrire un'irrorazione il più uniforme possibile.

L'MG-1 può essere pilotato in modalità completamente automatica, nella quale segue una rotta preimpostata, mantiene un'altezza da terra costante e regola la spruzzatura in modo automatico; semiautomatica, nella quale velocità, rotta e portata di irrorazione sono fisse, ma l'operatore può spostare il drone o cambiare parametri; manuale, il pilotaggio è completamente affidato all'operatore.

Questo drone (e i modelli simili) è dotato di un radar che consente di rilevare ed evitare ostacoli che si possono trovare lungo il percorso. La velocità di spruzzatura può essere regolata per adattarsi ai vari prodotti fitosanitari. Il drone può volare per circa 12 minuti a pieno carico e per circa 25 minuti senza carico, l'MG-1 potrebbe non essere adatto per gli agricoltori che operano in aree pianeggianti, aperte e con molto terreno da coprire. Il drone ha una massa a pieno carico di 24,5 kg e assorbe circa 6,4 kW di potenza massima e 3,3 kW in volo stazionario.

Il velivolo è formato da un corpo centrale da cui si dipartono delle strutture a Y che supportano i rotori, costituite da bracci pieghevoli per facilitare il trasporto. Il produttore fornisce alcune dimensioni del drone ma non mette a disposizione dei disegni quotati. In fig. 8, fig. 9 e fig. 10, sono illustrati i disegni che sono stati realizzati per rappresentare schematicamente il modello; è possibile avere perciò un'idea degli ingombri dichiarati dal costruttore e delle posizioni stimate degli ugelli irroratori.

Questo drone non è un modello avanzatissimo, si trova in commercio da circa cinque anni, ma è una buona base da utilizzare come riferimento per la categoria dei multicotteri agricoli non eccessivamente grandi. Si può assumere indicativamente che abbia un costo attorno a 10 000 €.

Nel successivo capitolo sono forniti ulteriori dati tecnici, utili al confronto con altri modelli di drone.



Fig. 7. Dettaglio irroratore MG-1

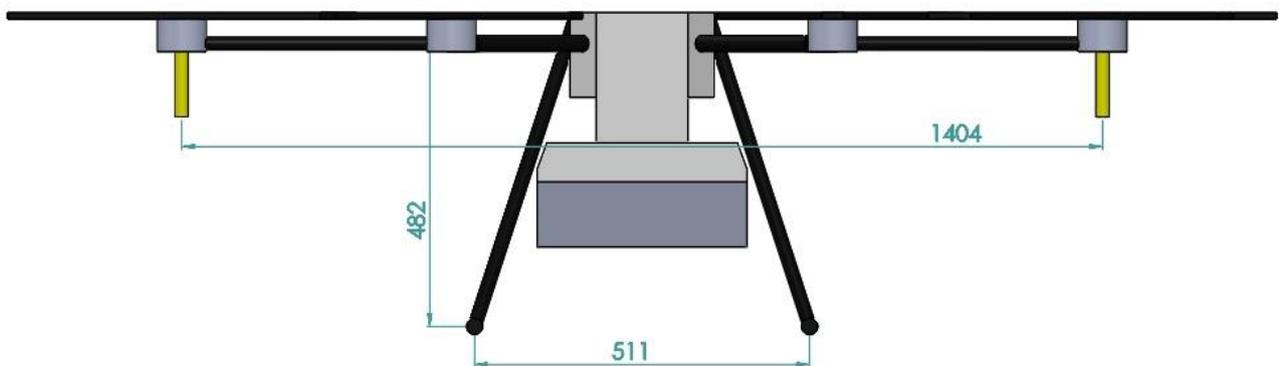


Fig. 8. Disegno MG-1, vista frontale. Quote in mm

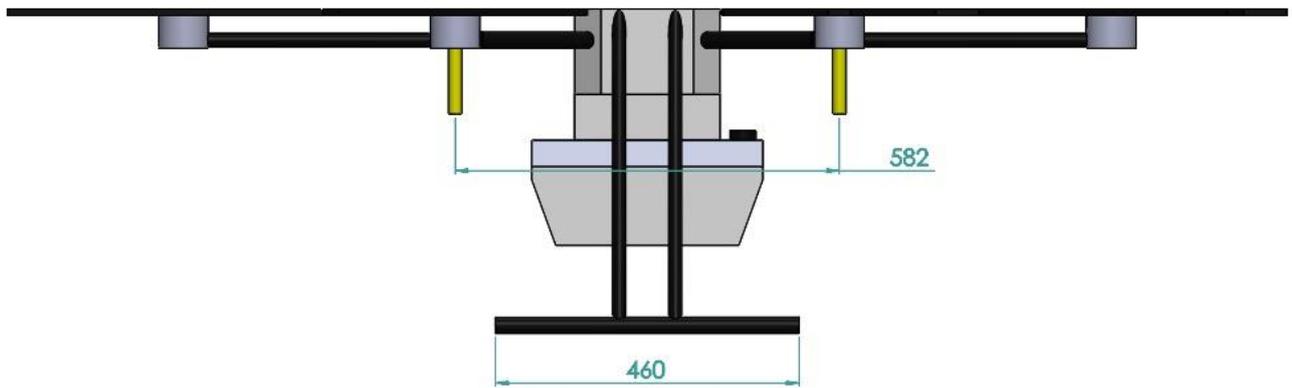


Fig. 9. Disegno MG-1, vista laterale. Quote in mm

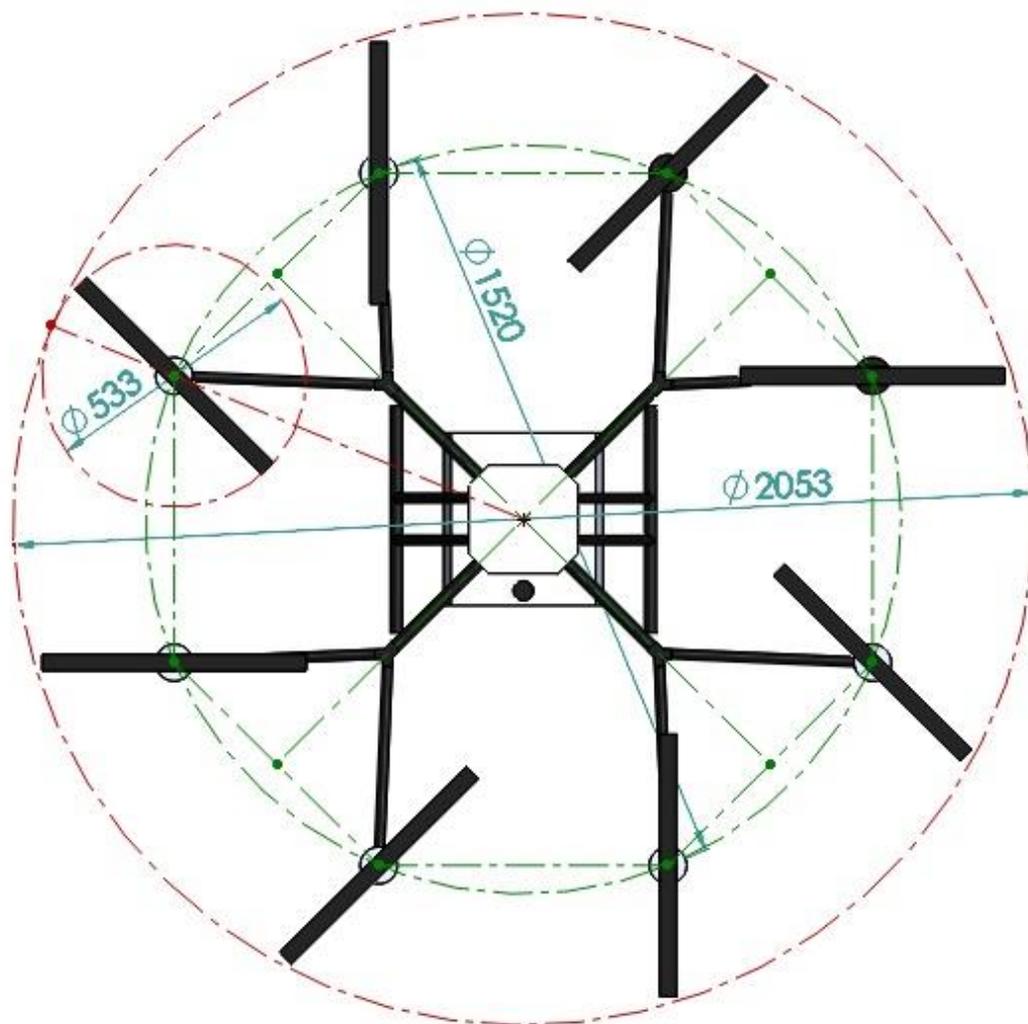


Fig. 10. Disegno MG-1 visto dall'alto: sono evidenziati gli ingombri (rosso) e la disposizione di base dei rotori (verde).
Quote in mm

2.3.2 Altri modelli di drone

Per contestualizzare meglio le caratteristiche di progetto del banco prova, si è confrontato il drone di riferimento con altri modelli di drone.

Il costruttore DJI nel corso degli anni ha evoluto l' MG-1 realizzando le versioni S e P. Questi modelli hanno sempre come base l' MG-1, conservandone le caratteristiche meccaniche e aeronautiche, ma sono progrediti nel campo dei controlli, della sensoristica e dell'intelligenza a bordo; queste versioni migliorano l'efficienza (l' MG-1 P può lavorare circa 6 ha/h secondo il produttore) del drone base e consentono di operare in modo migliore con la stessa base di partenza. In tab. 1 è presentato un confronto tra le varie versioni, a cui si aggiunge il modello, completamente nuovo e recentissimo, T16.

Nome modello drone	Velocità operativa max (m/s)	Quota operativa da terra (m)	Portata totale max con ugelli di serie (l/min)	Capacità di carico (kg)	Massa a pieno carico (kg)
MG-1	8	2 ÷ 3,5	1,72	10	24,5
MG-1 S	7	1,5 ÷ 3,5	1,52	10	24,8
MG-1 P	7	1,5 ÷ 10	1,52	10	24,8
T16	7	1,5 ÷ 15	3,6	16	40,5

Tab. 1. Confronto droni DJI



Fig. 11. Drone T16

Il modello T16 (fig. 11) è un drone esarotore di dimensioni maggiori rispetto all' MG-1 (circa 1795 x 1510 x 730 mm contro 1460 x 1460 x 570 mm, non considerando le eliche). Esso ha una capacità di carico di 6 kg più grande rispetto al modello precedente e anche un sistema di erogazione più potente, che consente di raddoppiare la portata smaltita, raggiungendo fino a 4 bar di pressione (l' MG-1 si stima raggiunga 3÷3,5 bar); il T16 è dotato di otto ugelli disposti a gruppi di due a due, i modelli precedenti disponevano solo di quattro ugelli in quattro punti.

Il drone è progettato in modo da sfilare molto facilmente il serbatoio e la batteria, per velocizzare i rifornimenti che sono molto frequenti; la durata della batteria è però inferiore rispetto a quella dell'MG-1. Il costruttore dichiara che con questo drone è possibile coprire fino a 10 ha/h di coltivazioni; i droni DJI più recenti possono essere controllati fino a circa 3÷5 km di distanza, mentre i modelli più vecchi devono rimanere entro un chilometro circa dal radiocomando. Fatte le debite proporzioni, si nota alla fine come questa famiglia di modelli sia piuttosto omogenea, anche se il T16, nonostante le maggiori prestazioni, assorbe meno potenza: 5,6 kW di massimo ma 4,6 kW in volo stazionario (più dell'MG-1).

Un velivolo per irrorazione con caratteristiche completamente diverse è l'*Airboard Agro* (fig. 12): questo drone è di dimensioni veramente notevoli (circa 3,5 x 5,5 x 1 m considerando anche la barra irroratrice, ma il costruttore non fornisce i dati), ha una massa a vuoto di 150 kg e può portare fino a 100 l di miscela fitoiatrica. Si tratta di un quadricottero con rotori a doppia elica, con 140 kW di potenza massima totale; le irrorazioni sono eseguite tramite una barra irroratrice di stampo tradizionale, che alimenta dieci ugelli. Il costruttore dichiara che questa macchina è in grado di operare con una velocità di 7 m/s e un'autonomia della batteria di circa 12 minuti.



Fig. 12. Drone Airboard Agro



Fig. 13. Drone Yamaha R-MAX

Uno dei primi UAV per uso agricolo, nati negli anni '90, è stato lo *Yamaha R-MAX* (fig. 13). Questo drone ha la stessa architettura di un tradizionale elicottero: un rotore ad asse verticale

di grandi dimensioni (diametro circa 3 m) genera portanza e spinta per l'avanzamento, accompagnato da un piccolo rotore di coda (diametro circa 0,5 m) che controlla i movimenti di imbardata. L'R-MAX è controllato manualmente ma è dotato di strumentazioni che assistono il pilota remoto e permettono di fare attività di monitoraggio delle colture. Il costruttore dichiara che la resa di questo drone è circa 5 ha/h. Le dimensioni sono considerevoli ma in linea con gli altri droni agricoli: 2750 x 720 x 1080 mm senza considerare il rotore principale, con una massa a vuoto di circa 65 kg. Questo drone è dotato di un motore a due tempi con circa 250 cm³ di cilindrata, che sviluppa una potenza di 15.4 kW, con un'autonomia di circa un'ora; la sua massima velocità operativa è di 5,5 m/s; la capacità di carico è di circa 30 kg ma il serbatoio può contenere solo fino a 16 l; è dotato di due ugelli che possono irrorare fino a un massimo di 1,3÷2,0 l/min.

2.4 Uso di droni in vigneto

I droni agricoli trovano facile applicazione anche nelle viticole: spesso i vigneti sono realizzati in luoghi caratterizzati da forti pendenze o da più livelli (ad esempio terrazzamenti), nei quali utilizzare questi macchinari si rivela molto vantaggioso.

L'irrorazione condotta tramite droni può essere impostata secondo diverse strategie, analizzate nei sottoparagrafi seguenti (2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3): si può far volare il drone tra i filari, seguendo quindi la linea mediana dell'andana, si può far percorrere al drone la linea d'asse di un filare, volando a cavallo della spalliera, oppure il drone può essere posizionato tra la sommità e il fianco di un filare, con un comportamento misto tra i primi due. In ogni caso non è consigliabile volare troppo a ridosso della vegetazione, sia per le difficoltà di pilotaggio e la probabilità di impatti e danneggiamenti, ma anche per una questione di omogeneità dell'irrorazione: se gli ugelli sono troppo vicini al bersaglio l'irrorazione è concentrata in una piccola area e non diffusa su tutta la chioma.

Non è possibile stabilire a priori un'altezza di irrorazione ideale perché ci sono tanti fattori che influiscono su questo parametro, dalle caratteristiche del circuito di irrorazione del drone e dei flussi d'aria dei suoi rotori, fino alle condizioni climatiche o altri particolari problemi che sorgono durante le operazioni di irrorazione in campo. Indicativamente l'altezza di volo ottimale per droni di questo formato può essere tra 70 e 100 cm dalla sommità della vegetazione (la cui quota può variare nell'arco della stagione vegetativa).

La posizione di installazione degli ugelli irroratori a bordo del drone è ovviamente un parametro di fondamentale importanza: si pensi ad esempio alla loro larghezza frontale (vedi anche fig. 8) rispetto alle dimensioni del vigneto, in base al loro rapporto si può scegliere una strategia di irrorazione piuttosto che un'altra; la loro larghezza laterale (fig. 14, vedi anche fig. 9) è meno importante poiché il drone ripassa lo stesso bersaglio con tutti e due gli ugelli (riferendosi al drone MG-1) nel suo naturale avanzamento, ma potrebbe interessare alcuni fenomeni secondari che impattano sull'omogeneità dell'irrorazione, legati magari al disturbo dato dal vento della corsa. Il drone di riferimento MG-1 ha gli ugelli disposti su un unico piano, ai vertici di un rettangolo, ma si potrebbe pensare di realizzare altre architetture nelle quali gli ugelli stanno anche ad altezze diverse, persino dotati di movimenti di posizionamento rispetto al corpo del drone.

L'irrorazione tramite droni dev'essere opportunamente calibrata in base alle condizioni di volo, oltretutto a fattori ambientali che influenzano anche le irrorazioni eseguite con mezzi tradizionali. I droni possono sfruttare le loro caratteristiche di alta intelligenza: i modelli più avanzati gestiscono i parametri dell'irrorazione in modo congiunto alla loro posizione attuale, grazie a tecnologie come il GPS, e alle condizioni di volo istantanee [3].

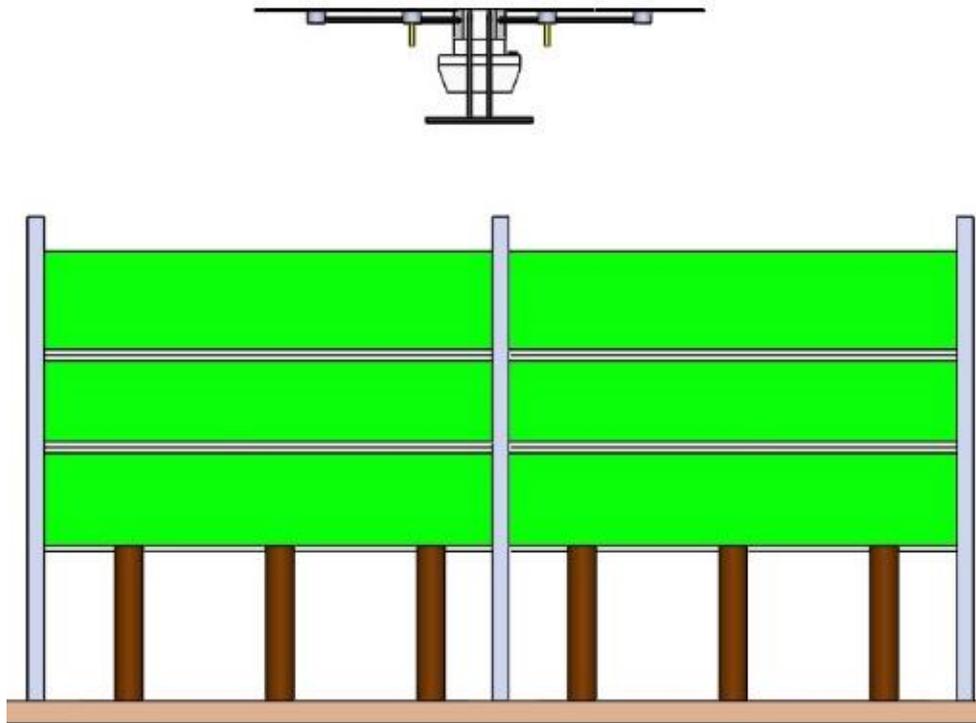


Fig. 14. Posizione del drone irroratore di riferimento in vigneto. Vista laterale

Lo studio della deposizione della miscela fitoiatrice non può esimersi dal considerare l'effetto combinato della spruzzatura con il flusso d'aria proveniente dai rotori dell'UAV: il velivolo deve obbligatoriamente muovere i rotori per la sua sustentazione, questo crea un flusso d'aria diretto verso il basso, chiamato *downwash*, che giocoforza interferisce con i getti degli ugelli irroratori [3].

Secondo il parere del dott. Minuto del CERSAA di Albenga (SV), è fondamentale sfruttare il più possibile questo flusso per far penetrare la miscela fitoiatrice all'interno della vegetazione: dal suo punto di vista potrebbe essere molto efficace irrorare dall'alto verso il basso accodandosi a questo flusso di aria, riproducendo in piccola scala il lavoro che fanno le irroratrici ad aeroconvezione attualmente impiegate nei vigneti. Questo aspetto del *downwash* però può essere difficile da gestire: non solo questo flusso ha caratteristiche diverse in base alla distanza dai rotori che si considera, rendendo necessario un accurato studio sul posizionamento degli ugelli rispetto ai rotori, ma varia durante il volo del drone, con più flusso e velocità nelle fasi iniziali dove il drone è a pieno carico e meno nelle fasi finali, dove il peso del drone è alleggerito essendo stata consumata la miscela presente nel serbatoio [3]. Si fa notare che la quota del drone rispetto alla vegetazione (o al terreno) è tenuta costante per uniformità di trattamento, ma questa potrebbe non verificarsi se non si gestisce l'aspetto che il flusso dei rotori è tanto differente fra inizio e fine del volo operativo.

Inoltre, il dottor Minuto afferma con certezza che non si possono irrorare direttamente le gocce di miscela fitoiatrice sulla pianta di vite, ma bisogna sempre utilizzare un getto d'aria che metta in movimento le foglie: in vigneto, una spruzzatura esclusivamente meccanica, realizzata con la pressione del circuito irroratore, è sostanzialmente inutile perché il fitofarmaco deve quasi sempre depositarsi su tutta la superficie fogliare, incluse le foglie in ombra ed entrambe le pagine di una foglia, per dare un effetto concreto.

Di seguito sono analizzate nel dettaglio alcune possibili strategie di esecuzione dei trattamenti.

2.4.1 Drone centrato tra i filari

In questo scenario il drone volerebbe in corrispondenza della linea mediana dell'andana, ovvero starebbe esattamente in mezzo a due filari contigui, effettuando il trattamento sui lati interni di entrambi.

Nella fig. 15 è schematizzato quanto detto: il drone MG-1 è stato collocato nel vigneto di riferimento; le altezze da terra minima e massima, indicate dal costruttore, sono presumibilmente misurate dal punto di installazione del radar a bordo del velivolo.

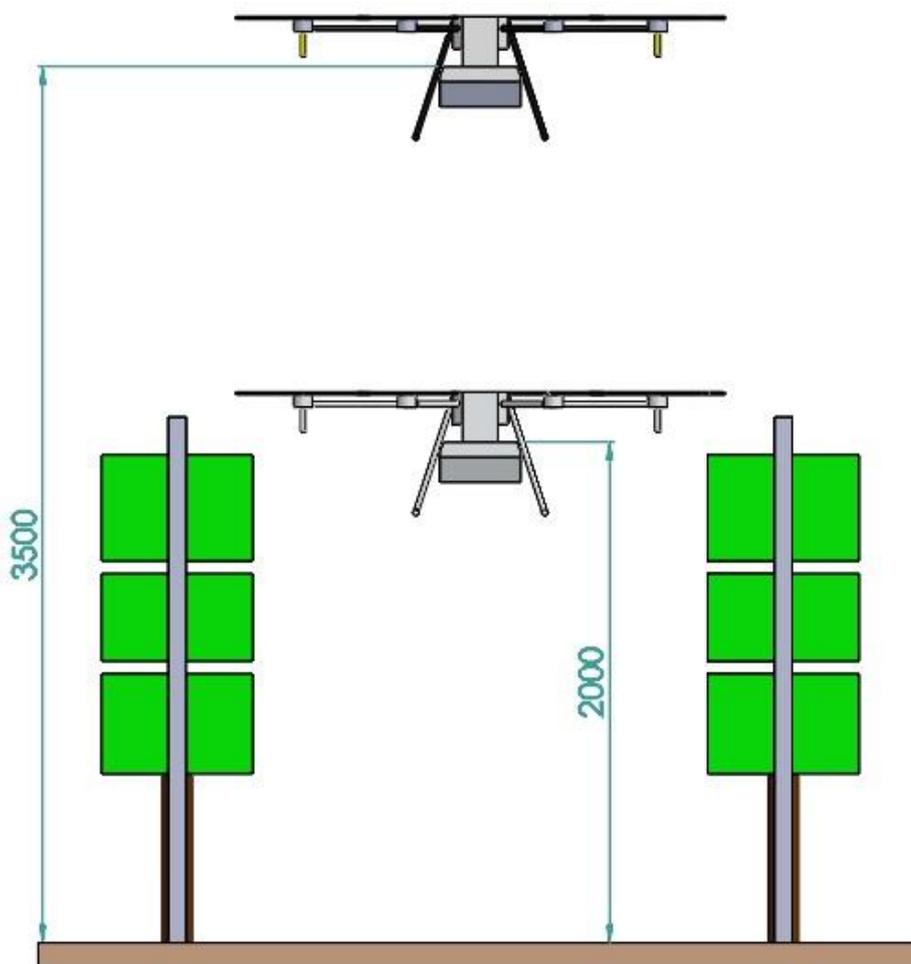


Fig. 15. Irrorazione con drone in asse con l'andana. Le quote (in mm) sono relative alle posizioni verticali limite assumibili dal drone MG-1

L'adozione di questa strategia è fortemente basata sulla distanza interfilare: può essere efficace in un vigneto con spalliere molto ravvicinate o al contrario può essere totalmente inutile se la distanza è molto elevata rispetto alla dimensione del drone, e soprattutto alla posizione degli ugelli irroratori nella macchina. In questa configurazione il drone potrebbe perfino volare dentro al corridoio formato dai due filari, tuttavia questo comporterebbe grosse difficoltà di controllo e mancanza di copertura della sommità delle piante; potrebbe comunque essere un'idea praticabile per i trattamenti che hanno come bersaglio i grappoli.

Secondo il dott. Minuto non è consigliabile praticare metodi di irrorazione laterali ad altezza parete fogliare: in caso di adozione di prolunghe o metodi simili si potrebbe pensare di tenere gli ugelli molto vicini al loro bersaglio, eventualmente coprendo anche l'intera parete nel

verso dell'altezza, e spruzzando direttamente sul lato della parete con getti orizzontali, ma questa situazione porta però ad avere sempre la direzione dei getti irroratori ortogonale al flusso d'aria proveniente dai rotori, perciò secondo il parere fornito, questa interferenza si rivelerà più distruttiva che costruttiva. In ogni modo, anche riuscendo a superare questo problema l'irrorazione non potrebbe essere soddisfacente senza il supporto dell'aeroconvezione, essenziale per trattare le parti interne della chioma.

Questa strategia di irrorazione potrebbe avere come vantaggio il poter investire direttamente le zone più basse della parete fogliare, sicuramente raggiungibili lateralmente, mentre potrebbero essere colpite con difficoltà se il drone volasse sopra le piante, come nel caso seguente.

2.4.2 Drone sopra il filare

In questo caso il drone irroratore volerebbe sulla linea d'asse di un filare, trattando ovviamente solo il filare in questione. La spruzzatura eseguibile da questa posizione è quasi esclusivamente verticale, anche se un opportuno posizionamento degli ugelli irroratori, che tenga conto della larghezza del drone e della chioma, potrebbe consentire di colpire lateralmente la parete della pianta, soprattutto nella zona superiore.

In fig. 16 è mostrato lo scenario descritto.

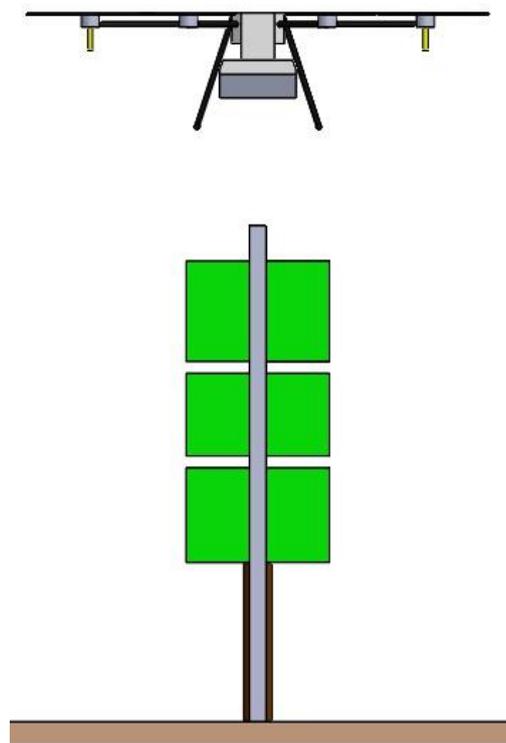


Fig. 16. Irrorazione con drone in asse con il filare

A differenza del caso precedente, il drone non può certo abbassarsi oltre la sommità della vegetazione. Il velivolo deve mantenere una distanza idonea dalla chioma, quantificabile indicativamente in 70÷100 cm, come accennato in precedenza. Nel caso del drone di riferimento, restano sempre validi i limiti del campo di funzionamento previsti dal costruttore, rispetto al terreno, analizzati nel caso precedente.

Secondo il dott. Minuto, le irrorazioni condotte con drone in asse con il filare hanno il vantaggio di non forzare le gocce spruzzate a dover curvare per raggiungere il bersaglio, operazione sempre difficile e soggetta a rischi di deriva, come avviene con le irroratrici tradizionali che irrorano lateralmente, con i getti diretti anche verso l'alto; questo vantaggio è compensato però dalla difficoltà di penetrare tutta la chioma nella sua altezza, quindi realizzare ad esempio un trattamento che comprenda i grappoli, localizzati molto in basso nella fascia produttiva, diventa molto arduo.

2.4.3 Drone accostato al filare

Questa configurazione prevede una strategia mista tra le prime due analizzate: il drone vola principalmente seguendo l'asse del filare, ma è anche libero di posizionarsi eccentricamente e accostarsi al filare. In fig. 17 è schematizzata questa tecnica.

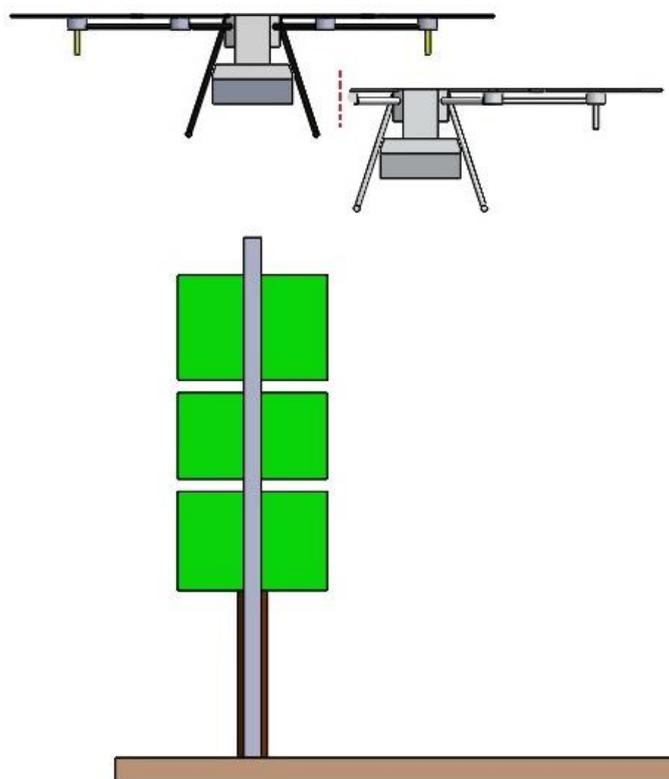


Fig. 17. Irrorazione con drone affiancato al filare in modo misto. La posizione meno frequente è stata resa con il drone non colorato e privato della parte di sovrapposizione del disegno

Il drone può essere posizionato sopra il filare ma anche a fianco, in base alle condizioni particolari da affrontare di volta in volta. Questa strategia riguarda sempre il trattamento di un solo filare; nel caso di irrorazione accostata occorrono probabilmente due passaggi per filare, in modo da coprire entrambi i lati della chioma, quindi il doppio di passaggi e tempo rispetto ai casi precedenti.

Questa strategia potrebbe sintetizzare i vantaggi delle due analizzate in precedenza (per la prima, bassa altezza e copertura laterale migliore, per la seconda, miglior traiettoria delle gocce e penetrazione), decidendo opportunisticamente la posizione migliore durante il trattamento, al prezzo di dover compiere due passaggi per filare.

3 Irrorazione di fitofarmaci in vigneto

Nell'arco della stagione vegetativa di un vigneto vengono eseguiti numerosi trattamenti con prodotti fitosanitari, sia per necessità di difesa, per le quali occorre combattere fisiopatie, organismi patogeni e parassiti, sia per l'ottenimento di prodotti migliori, conseguito sanando le carenze di microelementi, effettuando concimazioni fogliari e frenando il vigore vegetativo della vite per ottenere produzioni di uva di elevata qualità [1].

Come confermato da fonti bibliografiche e dai viticoltori della vigna di Bricco Mollea, ogni stagione vengono solitamente effettuati circa una quindicina di trattamenti; il numero può oscillare in funzione delle precipitazioni atmosferiche, in caso di annate molto umide e piovose occorre aumentare i trattamenti perché si verifica una specie di lavaggio del deposito di miscela fitosanitaria sulle foglie, vanificando l'efficacia del trattamento.

Come accennato nell'introduzione, le perdite che si verificano durante i trattamenti costituiscono un problema molto doloroso: si stima che utilizzando irroratrici tradizionali venga dispersa una quota anche pari all'80% di volume di miscela distribuita nei trattamenti di inizio stagione, quando la vegetazione è poco sviluppata; quando la vegetazione è ben sviluppata, sul finire della stagione, la quota dispersa si attesta su un valore più clemente, circa il 50% [1]. Nel corso degli anni sono stati sviluppati nuovi macchinari, progettati diversamente per cercare di limitare questo fenomeno negativo, sia dal punto di vista dei danni ambientali che da quello economico.

3.1 Macchine irroratrici attuali

Al giorno d'oggi a livello europeo, o anche più specificatamente italiano, è vietato condurre irrorazioni con mezzi aerei perché risentono fortemente del problema della deriva; ci sono tuttavia alcune deroghe ed eccezioni nelle quali ultimamente si stanno inserendo i droni irroratori. Allo stato attuale si adoperano perciò mezzi terrestri, trainati o trasportati da trattori, nella quasi totalità dei vigneti dove non sussistono problemi legati alla ripidezza del terreno, mentre si utilizzano irroratrici manuali (lance portatili), talvolta assistite da piccoli mezzi d'appoggio, nei vigneti molto impervi e di piccola estensione. Non è detto che le irrorazioni effettuate in vigneto siano esaurite dall'uso di prodotti fitosanitari in forma liquida: talvolta si possono utilizzare polveri distribuite da apposite *impolveratrici*, tuttavia quest'uso è raro e non si è appunto trovata evidenza nelle fonti bibliografiche e nelle informazioni ottenute sul vigneto di riferimento.

È interessante analizzare quali tipi di macchine siano utilizzate con i trattori perché presentano, a grande scala, similitudini con il metodo di lavoro dei droni irroratori, avendo in comune il fatto di sfruttare una corrente d'aria per distribuire la miscela fitoiatrica e il fatto di funzionare in modo automatico (le irroratrici manuali sono imbracciate da operatori che possono controllare visivamente in tempo diretto l'irrorazione, adottando accorgimenti e regolazioni ad hoc, quasi foglia per foglia, cosa impraticabile per un macchinario automatico).

La principale distinzione tra i tipi di macchine irroratrici è fatta sulla base del meccanismo di polverizzazione, ovvero di frantumazione della miscela fitoiatrica (miscela di prodotto fitosanitario con acqua, il solvente che si utilizza comunemente) in gocce: ci sono macchine irroratrici a *polverizzazione meccanica*, le quali innalzano la pressione del liquido (tipicamente tra i 5 e i 15 bar) tramite una pompa e lo espellono da ugelli idraulici, i quali trasformano

l'energia di pressione in energia cinetica cosicché la sottile vena di liquido in uscita si trasformi in gocce nel forte impatto con l'aria, le quali hanno dimensioni diametrali di circa $200\div 600\ \mu\text{m}$; un'altra importante categoria è rappresentata dalle macchine irroratrici a *polverizzazione pneumatica*, le quali provvedono ad inviare una corposa portata d'aria attraverso tubi con sezioni ristrette sulle quali si affacciano prese di liquido (in questo modo si realizza lo stesso principio di un tubo di Venturi), attraverso cui la miscela viene aspirata e frantumata dall'impatto con l'aria molto veloce, che genera gocce molto fini con un diametro di circa $50\div 100\ \mu\text{m}$ (è comunque presente una pompa di circolazione che porta il fluido a circa 2 bar) [7]. Esistono anche altri tipi di polverizzazioni ma non sono comuni in irroratrici per vigneti: ad esempio la *polverizzazione centrifuga*, nella quale il liquido viene inviato al centro di un rotore ad alta velocità, subisce un'accelerazione e fuoriesce alla periferia del rotore con molta velocità, frantumandosi; la *polverizzazione termica*, provocata da una corrente di gas caldi, usata raramente [7].

Un'ulteriore suddivisione può essere fatta sul tipo di trasporto delle gocce verso il bersaglio: si parla di *getto proiettato* se le gocce sono mosse esclusivamente dalla propria energia cinetica acquisita in fase di frantumazione (tipici esempi sono le lance manuali o le barre irroratrici per colture erbose); le irroratrici sono a *getto portato* se sfruttano una portata d'aria generata da un ventilatore, in questo caso sono anche dette *ad aeroconvezione* o *aeroassistite*. Nei vigneti si utilizzano principalmente macchine a getto portato, per la necessità delle gocce di penetrare adeguatamente nelle chiome delle piante e raggiungere un buon livello di deposizione (vedi paragrafo 1.1 e 3.2).

Le irroratrici più popolari in campo viticolo sono quelle a polverizzazione meccanica con getto portato, generalmente identificate come *atomizzatori* (conosciute anche come *irroratrici ad aeroconvezione*), che costituiscono il tipo di macchina più tradizionale; ampiamente diffuse e di stampo più moderno sono le irroratrici a polverizzazione pneumatica (che sono obbligatoriamente del tipo a getto portato), solitamente conosciute come *nebulizzatori* o macchine a "*basso volume*" (o ancora *irroratrici pneumatiche*), in quanto producendo gocce molto più fini delle macchine tradizionali necessitano di una minor quantità di acqua per realizzare la stessa copertura (vedi 3.2) [1]. Occorre prestare molta attenzione ai nomi con i quali ci si riferisce alle irroratrici in questione perché spesso sono usati in maniera familiare o confusionaria e viene completamente a mancare l'univocità: il termine atomizzatore o nebulizzatore è spesso usato come sinonimo di irroratrice, per cui non ci sono garanzie su cosa si stia realmente intendendo.

Le irroratrici utilizzate in vigneto hanno diverse architetture (fig. 18): gli atomizzatori sono essenzialmente costituiti da un grosso ventilatore che invia una portata d'aria considerevole a una zona di espulsione nella quale sono posizionati gli ugelli irroratori, collegati ad un tubo rigido di alimentazione, chiamato *barra*; i nebulizzatori utilizzano una ventola di alimentazione, di dimensioni inferiori rispetto alla taglia di quelle per atomizzatori, che invia aria ad alta velocità ai diffusori di tipo Venturi. I nebulizzatori hanno solitamente un numero molto alto di diffusori (che fungono direttamente da bocche di espulsione): a differenza degli atomizzatori dove il flusso è pressoché unico, diviso al massimo tra lato destro e lato sinistro, i nebulizzatori frazionano la portata d'aria aspirata in vari tubi di sezione relativamente piccola per guadagnare velocità nel flusso, potendo quindi disporre variamente le bocche di espulsione nel telaio del macchinario. In ogni caso, tutte le irroratrici hanno dei serbatoi integrati che contengono la miscela fitoiatrica da distribuire e trasportano le gocce di miscela all'interno di un piano verticale, ortogonale all'asse del vigneto e chiaramente traslante con l'avanzamento del macchinario, trattando contemporaneamente sia il filare di destra che quello di sinistra; spesso si effettuano deposizioni più o meno volute anche sui filari esterni a quelli oggetto di trattamento. Le irroratrici sono macchine pesanti, con una massa a vuoto nell'ordine di $300\div 1500\ \text{kg}$ e una capacità di carico di circa $500\div 3000\ \text{kg}$.

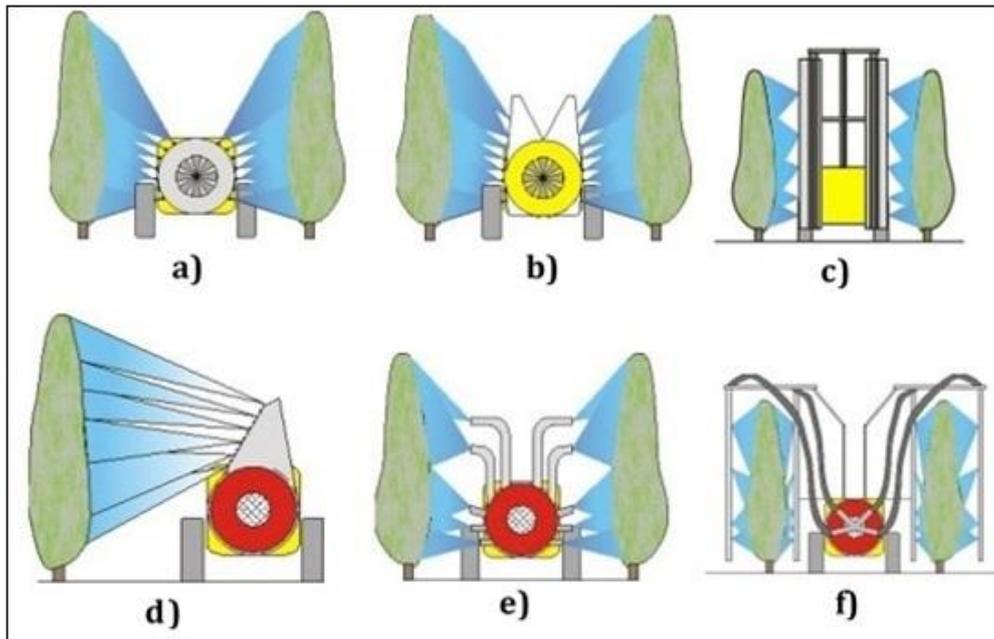


Fig. 18. Schema irroratrici: a) convenzionale, b) a torretta, c) tangenziale, d) a cannone, e) a flussi orientabili, f) scavallante o a recupero

In particolare si utilizzano i seguenti tipi di irroratrici [8].

- Irroratrici *convenzionali* (fig. 19): sono atomizzatori molto semplici, costituiti da un ventilatore assiale di dimensioni considerevoli (il diametro ha come ordine di grandezza 500÷900 mm) che è in grado di sviluppare una portata d'aria compresa tra circa 10 000 e 80 000 m³/h, che fuoriesce radialmente, investendo una barra circolare, avente lo stesso diametro del ventilatore, coronata di ugelli. Essi sono molto economici, irrorano alti volumi di miscela (tra i 300 e i 1500 l/ha), ma sono probabilmente la tipologia con peggior efficienza: il flusso d'aria non è guidato e la distanza tra il bersaglio e la bocca di espulsione può essere notevole; soffrono perciò di perdite verso terra e deriva, ma anche di scarsa omogeneità della deposizione di miscela.



Fig. 19. Atomizzatore convenzionale Genesini Sirio. La versione più piccola ha una massa di 520 kg a vuoto, può trasportare 880 l di miscela, è lungo circa 2,5 m e la ventola da 80 cm può generare fino a 60 000 m³/h di flusso d'aria

- Irroratrici *a torretta* (fig. 20) e *tangenziali*: queste irroratrici sono un'evoluzione del tipo convenzionale e utilizzano delle strategie per cercare di accoppiare

maggiormente la forma della pianta-bersaglio con quella dell'irroratrice, diminuendo la gittata delle gocce (e quindi i rischi di perdita) e uniformando la deposizione lungo l'altezza della pianta. L'atomizzatore a torretta, pur mantenendo l'impostazione tradizionale con ventilatore assiale, è dotato di barre (e quindi bocche di espulsione) verticali, mentre l'irroratrice tangenziale utilizza ventole tangenziali e non assiali.



Fig. 20. Atomizzatore a torretta

- Irroratrici *pneumatiche* semplici (fig. 21a) e *a flussi* (o *a diffusori multipli orientabili*) (fig. 21b): si trattano di nebulizzatori con bocche fisse nel primo caso o di bocche orientabili collegate a tubi flessibili nell'altro; sono solitamente dotate di un ventilatore centrifugo da cui si dipartono i tubi di alimentazione dei diffusori. Questo macchinario, soprattutto il secondo tipo, permette il posizionamento degli erogatori in prossimità della vegetazione per indirizzare il flusso d'aria in modo mirato, contendo le perdite e realizzando una deposizione molto omogenea. Come già accennato, queste macchine sono familiarmente note come *irroratrici a basso volume* perché impiegano minori quantità di miscela (tipicamente 250 l/ha e non più di 300÷400 l/ha) per ottenere buone deposizioni.

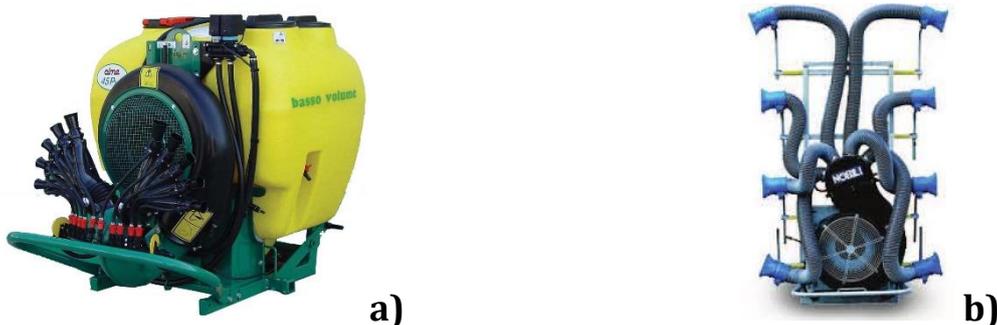


Fig. 21. Irroratrice: a) pneumatica semplice, b) a flussi orientabili

- Irroratrici *scavallanti* (fig. 22): sono sempre appartenenti alla categoria delle irroratrici pneumatiche, ma sono strutturate in modo da avvolgere la vegetazione e trattare entrambi i lati di un filare contemporaneamente; poiché i flussi d'aria sono concorrenti tra loro, si rallentano a vicenda nel punto dello scontro, causando quindi una riduzione della deriva, dovuta più che altro a miscela sparata in aria libera o fuori bersaglio. Esistono anche modelli in grado di trattare più di due filari per volta.



Fig. 22. *Irroratrice scavallante*

- *Irroratrici a recupero o a tunnel* (fig. 23a): si trattano di evoluzioni delle irroratrici scavallanti; vengono impiegati degli schermi laterali o dei sistemi a tunnel per circondare la zona di vegetazione trattata, capaci di recuperare una parte della miscela fitosanitaria che manca il bersaglio e riutilizzarla successivamente.
- *Irroratrici a cannone* (fig. 23b): sono utilizzate in vigneti su terreni molto difficili e dirupati o in coltivazioni di vecchia concezione, dove non si può transitare con altri macchinari; sono irroratrici a polverizzazione meccanica, in cui gli ugelli sono disposti lungo il perimetro della bocca di espulsione, e aeroassistite, per mezzo di un ventilatore centrifugo che spinge l'aria ad alta velocità attraverso un convogliatore a forma di cannone, con un'unica bocca terminale o con un'apertura verticale. Questi macchinari possono raggiungere una portata di qualche decina di metri di distanza, ma sono ovviamente molto sensibili al problema della deriva.



a)



b)

Fig. 23. *Irroratrici: a) a tunnel, b) a cannone*

Le macchine irroratrici moderne potrebbero essere distinte ancora più finemente di quanto fatto con la soprascritta analisi: al giorno d'oggi vengono impiegate tecnologie sempre più sofisticate, anche con un certo grado di intelligenza, in modo da aumentare i livelli di efficienza.

Una tecnica abbastanza diffusa trasversalmente è quella della *spruzzatura elettrostatica*: la miscela fitosanitaria polverizzata viene elettrizzata in fase di espulsione da un elettrodo, con diversi metodi elettromagnetici (l'induzione è il più usato); le gocce assumono un certo potenziale elettrico e sono caricate tutte con lo stesso segno (positivo), respingendosi quindi tra di loro, ma venendo attratte dalla pianta, che si trova al potenziale di terra (carica negativa), migliorando perciò la deposizione che diventa attiva. Il respingimento tra gocce è positivo per realizzare una copertura omogenea e diffusa; la tensione elettrica necessaria per queste elettrizzazioni è dell'ordine di 1 kV o superiore, per cui si impiegano degli appositi innalzatori di tensione, dato che la tensione di bordo del trattore è 12 o 24 V [9].

3.2 Caratteristiche delle irrorazioni

Lo studio della distribuzione di prodotti fitosanitari non può prescindere dall'analisi delle gocce di miscela, che costituiscono il vero vettore fondamentale del fitofarmaco. La gestione dell'irrorazione e delle gocce è molto complessa; non esistono modelli semplici a cui affidarsi per individuare i giusti parametri, che consentano di compiere un trattamento ottimale, riducendo al minimo gli sprechi, i rischi ambientali e massimizzando la copertura, evitando sovrapposizioni su stessi punti e zone d'ombra.

Solitamente, sono gli agricoltori stessi a gestire questi trattamenti, con metodi empirici, sulla base della loro esperienza e delle condizioni che si presentano di volta in volta nelle colture. L'uso dei fitofarmaci, vista la loro pericolosità, è severamente regolamentato: i produttori forniscono le indicazioni dei dosaggi da rispettare, in special modo la dose di fitofarmaco per unità di superficie di coltura, ma è compito di chi esegue il trattamento (e per questo deve ricevere un'adeguata formazione) modulare i parametri (dosi, dimensione delle gocce, portata di un eventuale ventilatore, ecc.) in base alle condizioni climatiche, alle condizioni del bersaglio, al tipo di trattamento e prodotto utilizzato.

Come testimoniato dal dott. Minuto del CERSAA di Albenga (SV) e confermato ampiamente in letteratura, solitamente in un vigneto vengono eseguiti trattamenti con volumi di miscela fitoiatrica compresi tra 400 e 1200 l/ha e tipicamente il valore si attesta su 600÷800 l/ha (considerando condizioni e trattamenti standard). Esistono vari metodi per determinare il volume di miscela per unità di superficie da utilizzare, ma la mediazione dell'esperienza sui risultati resta fondamentale.

La questione di una buona irrorazione non è solamente legata all'aspetto quantitativo ma anche all'aspetto qualitativo del trattamento, ovvero è molto importante la qualità delle gocce di miscela irrorata e il buon utilizzo della ventilazione di supporto.

3.2.1 Gocce

Come esposto in precedenza, i nebulizzatori sono in grado di generare gocce più fini di un ordine di grandezza rispetto agli atomizzatori. Assumendo che il volume irrorato sia composto da gocce di forma sferica e l'area coperta da deposizione sia la somma delle superfici sferiche delle varie gocce (o più correttamente delle superfici dei cerchi massimi delle sfere, se si considera idealmente l'area di impatto), il rapporto tra superficie di deposizione e volume irrorato è inversamente proporzionale al diametro delle sfere-gocce: questa caratteristica geometrica delle sfere fa sì che per coprire una stessa superficie, serva un volume minore se il diametro delle gocce è anch'esso minore. Da qui il fatto di associare i nebulizzatori a un basso volume di acqua: teoricamente a pari area di coltivazione trattata, un nebulizzatore impiega meno volume di acqua rispetto a un atomizzatore, che emette gocce di diametri maggiori. Le dosi (massime) di soluto-fitofarmaco per unità di superficie, valutate dai produttori in rigorosi studi e indicate sulle confezioni dei prodotti, devono essere rispettate indipendentemente dalla tipologia di irrorazione, ad alto o basso volume, che quindi si differenziano soltanto per il volume di solvente-acqua.

Queste considerazioni sono perfettamente valide nonostante le gocce reali non abbiano certamente una forma sferica perfetta e intervengano fenomeni chimico-fisici secondari che modificano l'area di impatto della goccia (solitamente in maniera positiva provocando un allargamento, soprattutto nelle gocce piccole); esistono in letteratura delle correlazioni che permettono di risalire alle dimensioni della goccia dalla misurazione dell'area di impatto.

La scelta delle dimensioni delle gocce non è banale perché deve essere un compromesso tra diversi fattori [8]:

- le gocce più piccole consentono una miglior deposizione con volumi di acqua inferiori; la loro densità è però paragonabile a quella dell'aria, tendono a galleggiare e ad avere lunghi tempi di caduta e quindi essere molto esposte a deriva, soprattutto quelle di taglia inferiore a $80\div 100\ \mu\text{m}$; in condizioni di temperature elevate e bassa umidità relativa, l'acqua della miscela evapora rapidamente, il fitofarmaco rimanente ha un grande potere inquinante e può essere trasportato a grandi distanze dal vento; sono tutto sommato facili da trasportare verso il bersaglio e sono adatte ai casi di chioma ampia e irregolare;
- le gocce più grandi sono più difficili da trasportare verso il bersaglio ma avendo una massa maggiore sono poco soggette al pericolo di deriva; generalmente le gocce superiori a $500\ \mu\text{m}$ di diametro hanno poca adesione e provocano notevoli perdite per ruscellamento sulle foglie e gocciolamento a terra, che possono coinvolgere altre gocce incontrate lungo la traiettoria di caduta, dando luogo a un fenomeno chiamato "effetto valanga", che asporta il deposito e riduce notevolmente la protezione sanitaria [1].

La dimensione delle gocce non è comunque facilmente controllabile, dipende dal tipo di ugello irroratore, dalla viscosità della miscela (più è bassa meno sono grandi) e dalla pressione di irrorazione nelle polverizzazioni meccaniche (o soprattutto velocità dell'aria per le polverizzazioni pneumatiche): più è alta la pressione più vengono polverizzate finemente le gocce. Al problema di individuare la giusta dimensione, si aggiunge il fatto che gli ugelli non sempre producono una popolazione di gocce ottimali: spesso manca omogeneità nelle dimensioni delle gocce e potrebbero verificarsi problemi legati alle gocce piccole contemporaneamente a quelli relativi alle gocce grosse; bisogna avere esperienza per trovare i giusti compromessi.

La dimensione delle gocce è inoltre collegata al tipo di fitofarmaco impiegato [1]: alcuni lavorano per azione di *contatto*, eventualmente devono coinvolgere anche direttamente il patogeno, quindi per essere efficaci devono almeno coprire tutta la superficie vegetativa, richiedendo gocce piccole e un'irrorazione di tipo *coprente*, ovvero che presenta moltissime gocce ampiamente diffuse, fino a saturare la superficie-bersaglio; altri funzionano in modo *sistemico*, il principio attivo viene assorbito dalla pianta e veicolato al patogeno tramite il sistema linfatico, non esigono quindi una copertura totale della vegetazione ma solamente una deposizione sulle foglie in vista. In quest'ultimo caso è altresì sufficiente un'irrorazione *bagnante*, caratterizzata da una deposizione a gocce grosse e rade, depositate in pochi punti della superficie-bersaglio. La maggior parte dei trattamenti effettuati in vigneto sono ad azione di contatto e richiedono quindi un'alta copertura della vegetazione, pena l'inutilità e il fallimento del trattamento; questo aspetto è stato confermato anche dal dott. Minuto e dall'azienda del vigneto di riferimento, che afferma di condurre irrorazioni dove la miscela è preferibilmente polverizzata in modo fine per coprire adeguatamente il vigneto.

La meccanica del trasporto e deposizione non è solamente dominata dal fattore dimensione della goccia ma ci sono altri fattori che la influenzano: la massa della goccia, la sua velocità, l'angolo d'impatto e la tensione superficiale. Si ribadisce il fatto che sia fondamentale possedere esperienza e svolgere prove per controllare bene questi processi.

3.2.2 Ventilazione

Nei trattamenti di colture arboree o arbustive, tra le quali rientrano i vigneti, è necessario utilizzare irroratrici aeroassistite, soprattutto per piante di grandi dimensioni e con chiome folte. L'utilizzo dell'aria non ha un impatto sulla quantità di volume di miscela irrorata (se la polverizzazione è meccanica), ma è solo funzionale al trasporto verso il bersaglio. Le macchine irroratrici analizzate al paragrafo 3.1 utilizzano diversi ventilatori: i ventilatori assiali hanno diametro anche considerevole, tra i 500 e i 900 mm, e sono in grado di sviluppare notevoli portate d'aria, tra i circa 10 000 e gli 80 000 m³/h, ruotando a circa 1000÷2500 giri/min, con velocità di espulsione (15÷60 m/s) paragonabili ai ventilatori tangenziali e inferiori a quelli centrifughi; i ventilatori centrifughi e quelli tangenziali generano portate nell'ordine di 5000÷20 000 m³/h e primi sono capaci di sviluppare velocità molto alte, fino a 150 m/s. Generalmente i ventilatori centrifughi sono impiegati nelle irroratrici pneumatiche, mentre gli assiali sono installati su atomizzatori convenzionali e a torretta. I ventilatori assorbono potenze nell'ordine di 5÷50 kW [7].

La portata di aria erogata dall'irroratrice non è un parametro sufficientemente significativo per valutare la bontà dell'irrorazione aeroassistita, ma è certamente una grandezza facile da controllare perché direttamente legata al funzionamento meccanico del ventilatore: la portata può essere incrementata aumentando la velocità di rotazione della ventola, agendo su rapporti di trasmissione o velocità della *presa di potenza* del trattore (a meno che l'irroratrice non abbia un proprio motore autonomo), oppure agendo sull'angolo di calettamento delle pale se è possibile farlo, tenendo presente che la portata d'aria viene aumentata da maggiori inclinazioni (ossia quando guardando la ventola frontalmente, si vede più il profilo della pala che la sua superficie).

Le proprietà che influenza maggiormente l'irrorazione è la velocità dell'aria in corrispondenza della vegetazione, intesa in senso tridimensionale, ovvero valutando anche la direzione vettoriale nello spazio. Il getto d'aria ha l'obiettivo di trasportare e far penetrare la nube di gocce irrorate all'interno della chioma, sulle foglie in ombra e sulle pagine inferiori delle foglie, soprattutto nei frequenti casi di utilizzo di prodotti fitosanitari ad azione di contatto.

Il flusso d'aria deve perciò essere diretto il più possibile all'interno della vegetazione-bersaglio: questa esigenza è relativamente facile da soddisfare con irroratrici a flussi orientabili, dotate di bocche di espulsione mobili, mentre è più difficile da realizzare con atomizzatori convenzionale, dotati al massimo di deflettori per dirigere il flusso più orizzontalmente verso le piante e non verticalmente verso l'alto (nell'atomizzatore convenzionale il flusso d'aria è espulso radialmente verso i lati e l'alto). Gli atomizzatori convenzionali, nonostante generino gocce di dimensioni anche grosse, soffrono tantissimo il problema della deriva perché la velocità dell'aria emessa è poco controllabile; la velocità sulla parete fogliare è inoltre poco omogenea lungo l'altezza della pianta, assumendo valori tra i 5 e i 15 m/s [7].

La quantità di miscela depositata sulla vegetazione è ovviamente proporzionale al flusso d'aria: una portata molto scarsa o con basse velocità non favorirebbe il trasporto delle gocce, tuttavia, l'aumento del flusso d'aria oltre un certo valore diventa negativo ai fini del trattamento. Quando la velocità dell'aria è troppo elevata aumentano le perdite per deriva, perché l'aria trapassa facilmente la vegetazione che è di per sé una barriera, ma diminuiscono le perdite a terra, perché tutte le gocce riescono quantomeno a raggiungere la pianta; può succedere che troppa aria rimuova gocce già depositate in precedenza e che la vegetazione si muova troppo, con le foglie che in certi casi assumono posizioni trasversali rispetto al flusso d'aria, chiudendo di fatto i passaggi verso l'interno della chioma. Esistono perciò velocità di ottimo del ventilatore.

Un parametro ugualmente importante nelle irrorazioni è la velocità di avanzamento dell'irroratrice: più è veloce, meno si ottengono penetrazione della chioma e uniformità della deposizione nelle varie zone della pianta. Essenzialmente si verifica che all'aumentare della velocità di avanzamento l'aria non riesce a raggiungere alte velocità in corrispondenza della parete, come se non avesse abbastanza tempo per raggiungere una sorta di condizione di regime (considerando un punto di rilevazione fisso sulla parete fogliare). Anche la direzione della corrente d'aria rispetto all'asse dei filari è significativa: se la corrente è direzionata avanti, in parte concorde con il verso di avanzamento del trattore, la deposizione sarà generalmente minore, mentre aumenta positivamente se la corrente viene direzionata verso indietro.

La quantità d'aria impiegata nel trattamento deve essere frutto di un compromesso tra l'uniformità della deposizione, favorita con medio-basse portate e basse velocità di avanzamento e la quantità di deposito, favorita da grandi portate d'aria. Produrre grossi flussi d'aria è sinonimo di sprechi e di minaccia ambientale, perché il problema della deriva aumenta e cresce anche l'assorbimento di potenza, quindi il consumo di carburante del trattore.

Solitamente in piante di piccola taglia si usa il flusso d'aria per contrastare il vento che disturba l'irrorazione, impostando basse portate ad alta velocità; in piante di grossa taglia, il flusso d'aria deve aiutare le gocce a penetrare nella pianta, per cui si utilizzano basse velocità (per evitare i problemi menzionati sopra) ma grandi portate viste le dimensioni in gioco.

In letteratura esistono formule teoriche per calcolare la quantità di aria da impiegare nelle irrorazioni, ma bisogna anche tenere conto delle condizioni climatiche (serve più aria per contrastare il vento), dello stato attuale della vegetazione e della geometria dell'impianto del vigneto, per cui anche in questo caso serve molta esperienza da parte degli operatori.

I valori tipici del flusso d'aria in vigneto sono i seguenti: nelle prime fasi vegetative la portata dovrebbe essere di $3000 \div 6000 \text{ m}^3/\text{h}$, con velocità sulla parete fogliare dell'ordine di $3 \div 4 \text{ m/s}$; in piena vegetazione, la portata dovrebbe attestarsi su $7000 \div 12\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ e in ogni caso non superare $18\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, con una velocità sulle foglie di $6 \div 8 \text{ m/s}$ [7].

3.3 Ugelli irroratori

Gli ugelli irroratori sono dei componenti fondamentali in una macchina irroratrice perché sono i responsabili più diretti della produzione di gocce. Gli ugelli non sono altro che semplici orifizi calibrati, frutto di studi e sviluppi notevoli: in questi componenti la fluidodinamica dell'espulsione di liquido e della polverizzazione è analizzata in modo molto profondo e si arrivano a costruire ugelli in apparenza molto simili ma che si comportano in maniera molto diversa, per via di differenti sagomature microscopiche o sfruttamento di altri principi fisico-chimici.

Per la realizzazione del circuito irroratore per il drone e il banco prova, la scelta progettuale più semplice e robusta è quella di costruire un sistema a polverizzazione meccanica, che consente di ottenere facilmente buoni risultati di irrorazione con basse potenze e dimensioni ridotte, tipiche di un'applicazione su UAV. A tal proposito, qui di seguito sono analizzati i tipi di ugelli idraulici per agricoltura normalmente impiegati.

Gli ugelli idraulici, o meccanici, seguono generalmente la legge di efflusso espressa nella seguente formula [7]:

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

dove Q è la portata che attraversa l'ugello, k è un coefficiente che dipende dall'ugello stesso, in particolare dalla sezione di efflusso e dalle proprietà del liquido, mentre Δp è la differenza di pressione tra monte e valle dell'orifizio (in realtà si usa direttamente la p relativa).

Per effettuare la scelta del modello di ugello da utilizzare, occorre innanzitutto valutare il tipo di getto che si desidera ottenere, controllando la forma dell'efflusso, la distribuzione della portata e della velocità sull'area di impatto o la dimensione delle gocce; in secondo luogo, dopo aver individuato una famiglia di ugelli adatti, si determina il modello con il coefficiente k più opportuno. Negli ugelli esistono comunque delle non linearità sulla legge di portata o ad esempio legate all'angolo di spruzzo, che non si mantiene oltre a una certa distanza dall'orifizio; i costruttori stessi forniscono ampi dati sperimentali e tabelle per caratterizzare al meglio gli ugelli. Solitamente vengono impiegati i seguenti tipi di ugelli, distinti in base alla forma solida del getto o dell'orifizio [8]:

- ugelli a *cono*, caratterizzati da un getto a forma conica, *piena* (fig. 24b) o *vuota* (fig. 24a, se il liquido occupa solo la superficie laterale del cono e non il volume): la loro impronta è un cerchio nel caso pieno e una circonferenza nel caso vuoto; il cono vuoto è il tipo di ugello più diffuso nelle colture arboree e nella viticoltura perché il suo getto si amalgama bene con il flusso d'aria proveniente dal ventilatore, originando una nebbiolina omogenea; il cono pieno è meno adatto a questo scopo ma possiede una capacità penetrante leggermente maggiore; l'orifizio degli ugelli a cono vuoto è preceduto da una piccola camera dove il liquido si trova in condizioni turbolente, create dal passaggio attraverso vorticatori elicoidali, e tende ad aspirare aria dall'ambiente esterno di efflusso, creando così il vuoto all'interno del cono (è anche conosciuto come *ugello a turbolenza*); gli angoli di apertura dei coni sono compresi tra 40° e 90° , e il valore tipico è 80° ; i modelli di ugello a cono vuoto più vecchi sono costituiti da *piastrine* montate in serie per realizzare i passaggi vorticatori e la camera di turbolenza, quelli più moderni sono pezzi unici integrati, hanno caratteristiche migliori e sono in grado di produrre una popolazione di gocce dimensionalmente più omogenea, operando anche a pressioni minori; anche gli ugelli a cono pieno possono sfruttare meccanismi di turbolenza;
- ugelli a *ventaglio* o a *fessura* (Fig. 24c), dotati di un orifizio di forma ellittica che produce un getto triangolare contenuto in un piano; l'impronta di impatto è tipicamente un rettangolo sottile; solitamente sono utilizzati sulle barre irroratrici per colture erbacee ma può essere impiegato anche sugli atomizzatori per le colture arboree; l'angolo di apertura del getto varia tra 80° e 120° ;
- ugelli a *specchio* (Fig. 24d), nei quali le gocce sono generate da impatti e rimbalzi contro una superficie deflettente; questo meccanismo permette di generare gocce con una bassa energia cinetica di uscita, ridotta dai vari urti, e li rende particolarmente adatti ad applicazioni su terreno nudo e polveroso, in colture erbacee; le gocce prodotte sono generalmente grandi, con impronta rettangolare e distribuzione di portata omogenea lungo l'impronta.



Fig. 24. Ugelli: a) cono vuoto, b) cono pieno (a piastrine), c) ventaglio, d) specchio

Negli ultimi tempi sono stati realizzati ugelli detti *antideriva* (o ad *induzione d'aria*), i quali consentono di miscelare aria alla miscela fitoiatrice, aumentando la massa (e la dimensione) delle gocce con bolle d'aria, rendendole più insensibili alle correnti d'aria di disturbo e quindi al rischio di deriva ma guadagnando lievemente in omogeneità delle gocce e penetrazione della pianta. Questa tecnica può essere impiegata trasversalmente in quasi tutti i tipi di ugello e consiste brevemente nel realizzare un foro che metta in comunicazione l'ambiente esterno con la vena fluida che attraversa l'ugello, ottenendo una miscelazione per effetto Venturi. Per il loro utilizzo occorrono pressioni di lavoro minime leggermente più alte e, vista la dimensione delle gocce, non sono molto adatti per irrorazioni altamente coprenti.

I costruttori realizzano più taglie di orifici per uno stesso tipo di ugello: per distinguere i vari modelli della stessa famiglia, sono stampigliati dei codici (relativi a una portata di riferimento, all'angolo di apertura del getto e al tipo materiale) e sono colorati in maniera diversa. Dal 2005 è presente un'apposita norma ISO (10625) che armonizza il panorama degli ugelli in commercio, stabilendo che ugelli diversi, di vari costruttori, ma con stesso colore, debbano erogare sempre la stessa portata se alimentati dalla medesima pressione; con la norma, quindi, i colori sono stati resi univoci e non più particolari per ogni costruttore. I costruttori, tuttavia, commercializzano sempre parallelamente ugelli con colori propri: bisogna prestare perciò molta attenzione nell'identificare gli ugelli che si trattano.

Gli ugelli sono costruiti con diversi materiali: si usano materie plastiche o ottone, molto economici ma entrambi scarsamente durevoli; si usa l'acciaio inox che presenta buone caratteristiche di finitura e resistenza ma costi più alti; si possono infine utilizzare materiali ceramici, i migliori in assoluto ma molto costosi, usati anche solo per realizzare l'orifizio in un inserto contenuto dentro un supporto plastico. L'orifizio degli ugelli subisce una profonda abrasione durante il passaggio della miscela: bisogna perciò controllare periodicamente la funzionalità di questi componenti e prevedere delle sostituzioni se troppo consumati, altrimenti si verificano disomogeneità nel getto irrorato, determinando scarse coperture di alcune zone o eccessivi sovradosaggi, comunque pericolosi, per altre.

Gli ugelli vengono installati in appositi porta-ugelli collegati alla barra di alimentazione e bloccati tramite una ghiera o un collarino. I porta-ugelli sono dotati singolarmente di un *dispositivo antigoccia* (fig. 25), che è in pratica una valvola di sequenza che chiude il passaggio di comunicazione tra barra e ugello, quando la pressione nella barra scende al di sotto di una certa soglia. In questo modo, quando l'irrorazione è conclusa e la pompa viene fermata, gli ugelli vengono prontamente isolati e non si verificano gocciolamenti a terra di miscela fitoiatrice.

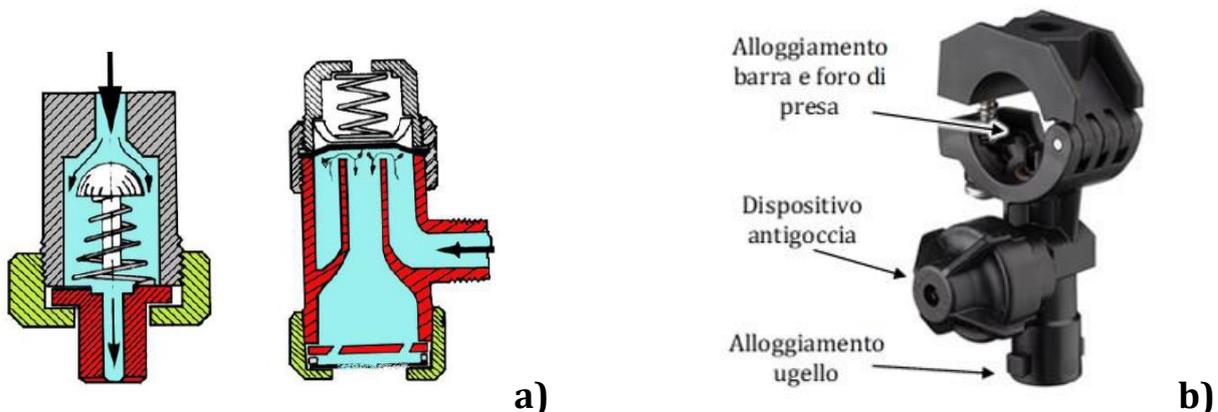


Fig. 25. Dispositivi antigoccia: a) sezioni [8](sx otturatore, dx membrana), b) porta-ugello completo TeeJet [10]

3.3.1 Ugelli per il progetto del banco prova

Per la progettazione del circuito irroratore del banco prova sono stati selezionati alcuni ugelli sulla base delle indicazioni ricevute dal dott. Minuto e da due aziende costruttrici: *Salvarani*, che commercializza prodotti *TeeJet*, e *Abbà-ASJ* del gruppo *ARAG*. Tutti gli attori hanno ritenuto che gli ugelli a cono vuoto fossero quelli indicati per il progetto, esattamente quelli che si usano tuttora nelle irroratrici destinate alla viticoltura.

Il dott. Minuto ha consigliato l'impiego di ugelli a cono, selezionando un angolo di apertura che non si allarghi oltre al flusso d'aria dell'aeroconvezione e rimandando a un successivo confronto sperimentale la scelta tra cono vuoto, maggiormente turbolento, e cono pieno, più penetrante e di solito usati senza flusso d'aria di trasporto; inoltre ha suggerito di valutare l'impiego di ugelli antideriva e ha sconsigliato l'impiego di ugelli a ventaglio, ritenendoli poco adatti a questa applicazione.

Abbà ha proposto il modello *ASJ HCl80*, che si tratta di un ugello a cono vuoto con angolo di 80° e inserto ceramico, e la versione omologa antideriva *HCA80*; sono stati anche consigliati i modelli *HCl60* e *HCA60* che hanno angolo di spruzzo di 60°.

Salvarani ha consigliato di utilizzare ugelli *TeeJet* a cono vuoto *TXA* (o *TXB*, analoghi ma con diverso accoppiamento al porta-ugello), realizzati in materiale plastico con inserto ceramico, hanno angolo di apertura di 80° (misurato a 7 bar) e sono colorati secondo la norma ISO. La fig. 26 rappresenta un estratto del catalogo *TeeJet* con le caratteristiche al variare della pressione, a seconda delle diverse taglie.



		l/min																		
		2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	8 bar	9 bar	10 bar	11 bar	12 bar	13 bar	14 bar	15 bar	16 bar	17 bar	18 bar	19 bar	20 bar
TXA800050VK TXB800050VK (100)	100	0,164	0,196	0,223	0,245	0,266	0,284	0,301	0,317	0,332	0,346	0,359	0,372	0,384	0,396	0,407	0,418	0,429	0,439	0,449
		F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF							
TXA800067VK TXB800067VK (50)	50	0,218	0,262	0,299	0,331	0,360	0,386	0,410	0,433	0,454	0,474	0,493	0,512	0,529	0,546	0,562	0,578	0,594	0,608	0,623
		F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF							
TXA8001VK TXB8001VK (50)	50	0,327	0,393	0,448	0,496	0,539	0,579	0,615	0,649	0,681	0,711	0,740	0,767	0,794	0,819	0,844	0,867	0,890	0,912	0,934
		F	F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF						
TXA80015VK TXB80015VK (50)	50	0,487	0,591	0,678	0,754	0,823	0,886	0,944	0,999	1,05	1,10	1,15	1,19	1,23	1,28	1,32	1,35	1,39	1,43	1,46
		F	F	F	F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF
TXA8002VK TXB8002VK (50)	50	0,649	0,788	0,904	1,01	1,10	1,18	1,26	1,33	1,40	1,47	1,53	1,59	1,65	1,70	1,75	1,81	1,86	1,90	1,95
		F	F	F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF
TXA8003VK TXB8003VK (50)	50	0,968	1,18	1,37	1,53	1,67	1,80	1,93	2,04	2,15	2,25	2,35	2,45	2,54	2,63	2,72	2,80	2,88	2,96	3,03
		F	F	F	F	F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF
TXA8004VK TXB8004VK (50)	50	1,29	1,58	1,82	2,03	2,23	2,40	2,57	2,72	2,87	3,01	3,14	3,27	3,39	3,51	3,62	3,73	3,84	3,94	4,04
		F	F	F	F	F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF

Nota: controllare sempre con attenzione i volumi di distribuzione. Le tabelle sono basate sull'erogazione di acqua a 21 °C (70 °F).

Fig. 26. Caratteristiche degli ugelli *TeeJet* *TXA/TXB*; F gocce fini e VF molto fini. È stato evidenziato in blu il modello di ugello scelto nel progetto [10]

Basandosi sull'architettura del circuito di irrorazione del drone di riferimento DJI MG-1, dotato di quattro ugelli singoli disposti in quattro diversi punti, è stato selezionato un modello specifico di ugello per il presente progetto: come anticipato nella fig. 26, si tratta dell'ugello

TXA8002VK (o TXB8002VK, a seconda del porta-ugello impiegato). La ragione di questa scelta è chiarita dalla fig. 27 che rappresenta il diagramma caratteristico pressione-portata relativo alla pompa selezionata (vedi paragrafo 4.1) e al circuito irroratore, formato da quattro ugelli in parallelo (con stesse pressioni a monte e a valle, quindi la portata totale smaltita è quattro volte quella di un singolo ugello), schematizzato in fig. 32 con n ugelli.

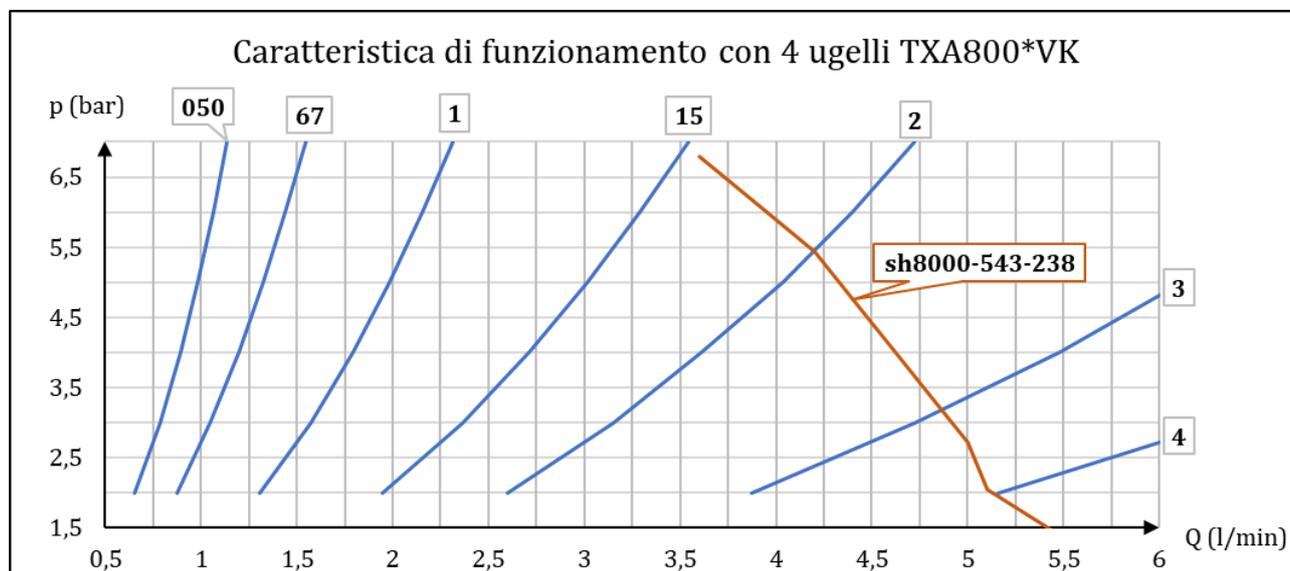


Fig. 27. Diagramma caratteristico del circuito di irrorazione progettato con un parallelo di quattro ugelli irroratori TXA. Per brevità, le curve di possibili circuiti configurati con taglie diverse sono identificate solo dal numero del modello, corrispondente all'asterisco nel nome completo dell'ugello (titolo grafico); la pompa è indicata per esteso

Il diagramma di fig. 27 permette di individuare i punti di funzionamento del circuito irroratore, ovvero le intersezioni tra la caratteristica della pompa scelta, in condizioni nominali, e della caratteristica di quattro ugelli della stessa taglia in parallelo. Dal grafico emerge chiaramente che gli ugelli di taglia inferiore al modello TXA80015VK sono da scartare perché potrebbero ipoteticamente intersecare la caratteristica della pompa solo per basse portate e pressioni molto alte, ma questo è impedito dal sistema di limitazione di pressione della pompa che impedisce il funzionamento oltre una certa soglia; inoltre è stato suggerito di fare attenzione alla scelta di ugelli con orifizi troppo piccoli perché potrebbero risentire di problemi di intasamento, in quanto non è detto che tutto il fitofarmaco (se solido) si riesca a sciogliere perfettamente nella soluzione.

L'ugello TXA8004VK, quello di taglia maggiore, presenta il problema opposto: il punto di intersezione ipotetico verrebbe a trovarsi in una zona di pressione bassa vanificando la funzione dell'ugello, il quale sarebbe incapace di nebulizzare la miscela fitoiatrica.

Gli ugelli più idonei al progetto sono dunque i modelli TXA8002VK e TXA8003VK: il secondo presenta un punto di funzionamento sulla caratteristica nominale pompa molto interessante, tuttavia, in fase di regolazione, la curva caratteristica della pompa tende a spostarsi a sinistra e il nuovo punto di funzionamento potrebbe facilmente trovarsi sotto la soglia dei 2,5 bar, indicata da Salvarani come minimo accettabile per una buona nebulizzazione (vedi par. 4.1); a scopo cautelativo si è scelto il modello di taglia inferiore, ma che emette anche portate inferiori.

Occorre tenere presente che questa scelta si basa sui dati tecnici forniti dai costruttori e non considera le perdite di carico presenti nel circuito: in fase di costruzione e sperimentazione potrebbe rivelarsi più idoneo utilizzare taglie di ugelli contigue a quella scelta in fase di progettazione.

4 Progetto del sistema d'irrorazione del banco prova

Il sistema di irrorazione utilizzato nel banco prova deve essere una riproduzione il più fedele possibile a quello che si monta sul vero drone irroratore: il banco prova deve essere al servizio del drone e deve consentire di utilizzare facilmente le informazioni ottenute da prove sperimentali in laboratorio, per previsioni sul comportamento del drone reale sul campo. A tal proposito, la progettazione è stata condotta sotto l'ipotesi di usare per il banco prova gli stessi esatti componenti che si dovrebbero impiegare a bordo del drone, quindi le scelte tecniche sono state effettuate dando priorità a pesi e dimensioni adatte all'applicazione su drone, poi successivamente sono stati trasferiti al banco di simulazione.

Il sistema di irrorazione è stato pensato in modo originale sulla base dei consigli forniti da persone esperte nel settore della viticoltura, quali il dott. Minuto del CERSAA di Albenga (SV) e l'azienda *Salvarani*, produttrice di macchinari agricoli.

L'equipaggiamento trasportabile a bordo del drone è chiaramente soggetto a stringenti limiti di peso e dimensioni, quindi conseguentemente anche di energia e potenza, in quanto la fonte primaria di energia per questo apparato è rappresentata da batterie elettriche aggiuntive. È stata fatta la scelta di realizzare un circuito di irrorazione a polverizzazione meccanica perché può funzionare agevolmente senza ricorrere a componenti di grossa taglia (ad esempio, la polverizzazione pneumatica richiede alte velocità, difficili da realizzare con macchine che devono rispettare i limiti esposti in precedenza); essa è una tecnologia robusta ed esistono molti componenti commerciali che si prestano agevolmente alla sua realizzazione, inoltre, è il tipo di polverizzazione più semplice e gestibile.

Per soddisfare le necessità emerse nei capitoli precedenti, la sola presenza del circuito irroratore non è sufficiente a garantire un'adeguata irrorazione del vigneto, soprattutto dal punto di vista della copertura e del raggiungimento dei punti interni poco esposti; occorre perciò utilizzare una forma di aeroassistenza per trasportare le gocce sul bersaglio-pianta, sia sfruttando semplicemente il flusso d'aria proveniente dai rotori del drone che servendosi di ventole addizionali, montate appositamente per dirigere e trasportare il flusso di gocce. Nel paragrafo 2.4 è stato dato conto della possibilità di progettare un'irrorazione dall'alto approfittando del *downwash* dei rotori, strada supportata anche dal dott. Minuto che ha sconsigliato di irrorare in direzione laterale. Utilizzando ventole aggiuntive, potrebbe in teoria aprirsi la possibilità di compiere irrorazioni laterali, direzionando ugelli irroratori e flussi d'aria orizzontalmente: per seguire questa strada è però necessario capire che tipo di interferenza viene a crearsi con il *downwash* dei rotori, che non può certo essere eliminato ma, a sufficiente distanza dalle eliche, potrebbe essere poco impattante.

La fase più importante della progettazione del sistema d'irrorazione, composto quindi da un circuito idraulico e da ventilatori per l'aeroconvezione, è la scelta dei componenti adatti: gli ugelli e la pompa, per il circuito idraulico, e le ventole, per l'aeroassistenza. Il vero drone irroratore è certamente già dotato di ventole (gli stessi suoi rotori) e, a meno di montare ventole aggiuntive per l'irrorazione, non bisogna certo selezionare altri componenti di questo genere; per contro, nel banco prova bisogna in ogni caso scegliere e installare delle ventole aggiuntive per consentire almeno la simulazione del *downwash* dei rotori, condizione necessaria per riprodurre il più realisticamente possibile l'irrorazione con drone.

La progettazione del sistema di irrorazione deve tenere conto di vari fattori, sia legati ai limiti tecnologici sia dovuti alle caratteristiche dell'operazione di irrorazione: ad esempio, per

quanto visto nel capitolo 3, sarebbe importante riuscire a formare gocce con diametri piccoli per effettuare trattamenti altamente coprenti (la maggior parte dei prodotti fitosanitari applicati in vigneto agisce per contatto) e risparmiare peso imbarcato sul drone, perché è possibile utilizzare volumi minori di acqua per coprire la stessa superficie rispetto a un'irrorazione fatta con gocce grandi; la produzione di gocce piccole richiede però un livello alto di pressione a monte degli ugelli, per cui è necessario dotarsi di una pompa capace di sviluppare quella certa pressione e contemporaneamente elaborare la portata richiesta, in questo caso la pompa assorbirebbe una potenza alta e sarebbe un componente piuttosto grosso e pesante e dovrebbe essere alimentata da una batteria sufficientemente capace, anch'essa grossa e pesante, incorrendo facilmente in limiti di peso e dimensioni sul carico trasportabile dal drone.

In questo esempio si nota benissimo come cercare di ottimizzare un fattore possa renderne critici degli altri: per inquadrare meglio queste considerazioni è stato realizzato un ampio schema, visibile in fig. 28 e illustrato qui di seguito, che sintetizza il ruolo dei vari fattori e ne evidenzia le relazioni di causa-effetto, in modo da enucleare i compromessi sottesi alla progettazione del sistema irroratore.

Lo schema muove dai dati di partenza imposti dall'attività stessa di viticoltura:

- l'estensione superficiale S del vigneto;
- il tipo di prodotto fitosanitario da distribuire.

Questi dati chiaramente non dipendono dalla macchina irroratrice che si utilizza, sia essa un mezzo terrestre o un drone. A questo punto vengono ipotizzate due condizioni di lavoro tipiche:

- che il trattamento di irrorazione sia coprente, quindi che le gocce siano piccole e si abbia a disposizione tanto flusso d'aria penetrante;
- che il tempo delle operazioni sia il più basso possibile, in modo che la produttività possa essere alta e divenga economico utilizzare un drone irroratore al posto dei metodi tradizionali (manodopera o mezzi terrestri).

Quest'ultimo punto, insieme alla succitata superficie S , non è da leggere in termini estensivi, in quanto più la superficie è grande più le operazioni saranno ripetute fino alla copertura totale del vigneto, ma è da interpretare in modo intensivo come velocità a coprire un'unità di superficie (ha/h). Successivamente sono stati individuate le ricadute più o meno dirette di queste scelte:

- un'irrorazione coprente richiede un grande flusso d'aria, eventualmente realizzabile attraverso un maggior numero di ventole aggiuntive o adottando modelli più prestazionali; richiede anche una dimensione contenuta delle gocce e quindi una maggior pressione di irrorazione;
- un basso tempo di trattamento richiede un'alta velocità di avanzamento del drone e un bassa durata complessiva delle fermate, legate ai rifornimenti di miscela fitosanitaria e alla sostituzione o ricarica delle batterie.

Su quest'ultimo punto è stata fatta l'implicita assunzione che per diminuire il tempo totale di fermata, occorra diminuire il numero delle soste stesse, dotando semplicemente gli elementi di consumo di maggior autonomia di durata. Questo potrebbe non essere l'unico modo per abbreviare il tempo totale di sosta: si potrebbero progettare parti per sostituzioni rapidissime (come per il drone DJI T16, nel quale si può sostituire l'intero serbatoio con uno rifornito in precedenza), con le quali non sarebbe impattante un alto numero di soste, oppure si potrebbero dimensionare gli elementi di consumo in modo da accordare le loro durate temporali, effettuando in parallelo tutti i rifornimenti in un'unica sosta (quindi poche soste strategiche

totali) e non dovendo fermare il drone di volta in volta per il rifornimento di un solo elemento. Queste strade alternative non implicano obbligatoriamente di sfruttare al più possibile la capacità di carico del drone per diminuire i tempi di sosta, mentre lo richiede la filosofia più semplice, seguita nel presente schema.

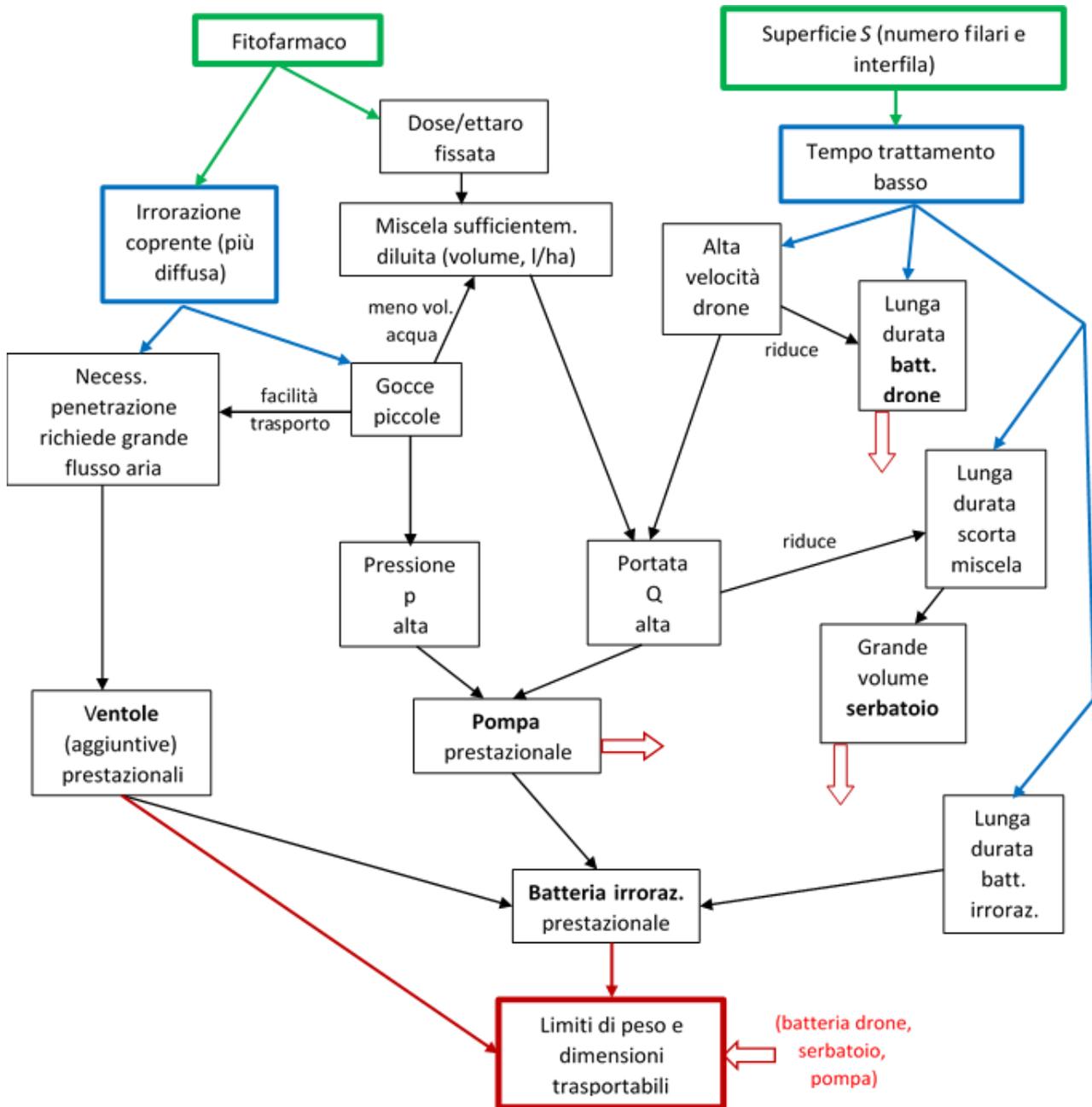


Fig. 28. Mappa delle relazioni tra i fattori della progettazione del sistema di irrorazione: in verde i dati di partenza relativi al vigneto, in blu le ipotesi sul trattamento eseguito, in neretto i componenti interessati e in rosso i limiti dominano l'intero sistema.

Come si può vedere nella figura, alcuni fattori sono in conflitto tra di loro, come il voler aumentare contemporaneamente la portata del circuito irroratore e la durata del serbatoio di miscela, ma in generale si nota che il vero limite tecnologico di tutto il progetto è quello sulle dimensioni e sulle masse dei componenti, che devono sottostare alla capacità di carico e agli ingombri connessi nel drone stesso.

Nello schema sono presenti implicitamente alcune semplicissime relazioni comunemente impiegate nei calcoli per applicazioni di fitofarmaci (vedi anche [10]). Esse sono esplicitate qui di seguito (tra parentesi, l'unità di misura preferita in ambito agricolo):

$$S \text{ (ha)} = n_{\text{filari}} \cdot w \cdot L \quad (2)$$

$$t = \frac{L \cdot n_{\text{filari}}}{v} \quad (3)$$

$$\text{Vol (l)} = Q \text{ (l/s)} \cdot t \quad (4)$$

$$\text{dose}_{\text{miscela}} \text{ (l/ha)} = \frac{\text{Vol}}{S} = \frac{Q}{v \cdot w} \quad (5)$$

Queste formule si riferiscono a un semplice vigneto rettangolare di superficie S , che contiene un numero di filari pari a n_{filari} (inteso proprio come numero di spalliere) di lunghezza L , la cui interfila (larghezza dell'andana) è w ; il drone irroratore compie il trattamento avanzando a una velocità v e impiegando un certo tempo t per percorrere una certa distanza che dipende dal numero di filari che sorvola; il serbatoio ha capacità pari a Vol e viene svuotato dalla portata irrorata costante pari a Q , per il tempo t di irrorazione. La relazione (5) è ampiamente riportata in letteratura e nei documenti tecnici delle irroratrici [10]; formalmente la dose all'ettaro sembra dipendere dalla geometria del vigneto (interfila w) ma contestualizzandola correttamente si può eliminare w con una moltiplicazione ed ottenere la dose per unità di lunghezza, che è più significativa in quanto il volume irrorato non può certo dipendere dalla larghezza tra i filari (l'andana non deve essere assolutamente irrorata) perché il bersaglio del trattamento sono solo le piante; in ogni modo nel mondo agricolo si preferisce utilizzare il dato per unità di superficie e anche le etichette dei fitofarmaci seguono questa convenzione. Queste relazioni sono perfettamente valide se durante il trattamento la velocità e la portata rimangono costanti, in caso contrario sono da considerare indicative; a livello di calcolo di volumi e dosi non c'è differenza tra le possibili strategie di irrorazione illustrate nel paragrafo 2.4.

In fase di progettazione è stata fatta la scelta di fornire energia al sistema irroratore tramite un'apposita batteria. Questa scelta ha sicuramente lo svantaggio di aggiungere carico e consumare spazio pagante ma ha notevoli vantaggi: i livelli di tensione dell'apparato motore e irroratore possono essere disaccoppiati senza l'uso di ulteriori componenti elettrici; i consumi sono anch'essi disaccoppiati e prevedibilmente la batteria del sistema di irrorazione avrà una durata maggiore avendo un assorbimento di potenza inferiore rispetto all'apparato motore (0,5 kW stimati contro 6,4 kW dell'MG-1), ma questo dipende ovviamente dalle capacità delle batterie installate; potrebbe comunque essere difficile trovare una batteria adeguata per le due esigenze perché solitamente i droni utilizzano delle batterie litio-ione-polimero, ottimizzate per quest'applicazione particolare insieme a tutta la parte elettronica del drone.

Di seguito sono analizzati i modelli di pompa e di ventole scelti per la progettazione del banco prova. Questi componenti, insieme agli ugelli selezionati in precedenza, non sono chiaramente sufficienti a realizzare l'intero sistema di irrorazione ma devono essere supportati da componenti ausiliari, quali intelaiature di supporto, tubi e raccordi, serbatoio con filtri e valvole, collegamenti e controlli elettrici, tuttavia, quelli analizzati sono gli elementi essenziali dell'intero sistema; i componenti ausiliari vanno semplicemente scelti in base alle specifiche dei componenti fondamentali.

Il sistema irroratore è stato progettato per funzionare a 12 V in corrente continua: questa scelta, permessa dal poter usare un proprio livello di tensione indipendente, è basata sul fatto

che esiste un vasto campionario di componenti commerciali costruiti per questa tensione di alimentazione, che è quella usata in ambito automobilistico; a partire dalle diffusissime batterie fino a pompe di piccola taglia (usate su camper, barche e impianti domestici, oltreché in piccole irroratrici manuali) e ventole (per impianti domestici o per raffreddamento di auto), si è potuto operare delle scelte di componenti robusti e affidabili e anche abbastanza economici.

4.1 Pompa

Nelle macchine irroratrici terrestri si utilizzano principalmente tre tipi di pompe: le pompe a membrana e le pompe a pistoni, che sono volumetriche alternative, e le pompe centrifughe, o raramente assiali, che appartengono alla categoria delle turbopompe. Queste ultime sono impiegate prevalentemente in macchinari che elaborano una grande portata (fino a 900 l/min) ma con pressioni piuttosto contenute, tra i 6 e i 10 bar al massimo; garantiscono un flusso altamente costante e non necessitano di valvole limitatrici di pressione perché in caso di circuito a valle chiuso, od ostruito, la pompa non genererebbe una sovrappressione; non sono facili da regolare, soprattutto se alimentate direttamente dalla presa di potenza del trattore.

Le pompe a pistoni sono generalmente utilizzate in macchinari che lavorano con livelli di pressione molto alti, anche 50÷60 bar, ed erogano portate medio-basse se confrontate con altre pompe di pari caratteristiche. Le pompe a membrana, molto resistenti all'abrasione, in cui un diaframma di materiale plastico-gommoso si comporta da pistone, sono le più diffuse negli atomizzatori ad aeroconvezione; sono capaci di erogare al massimo circa 50÷150 l/min, anche se in vigneto si utilizzano più nell'intervallo 10÷30 l/min; sono capaci di raggiungere livelli di pressione fino a circa 20÷25 bar ma vengono usate solitamente attorno ai 10 bar. Entrambi questi tipi di pompe alternative sono caratterizzate da portate instabili e pulsanti dovute proprio al funzionamento stesso della pompa; in irroratrici di grandi dimensioni e operanti a basse velocità di rotazione dell'albero della pompa, si utilizzano delle campane compensatrici, costituite da una camera comunicante con il circuito idraulico e un'altra riempita di aria e separata dalla prima con un diaframma, capaci di agire come un ammortizzatore idropneumatico in grado di limitare le pulsazioni del flusso. Le pompe a membrana e a pistoni sono facilmente regolabili agendo sulla velocità di rotazione che è direttamente proporzionale alla portata elaborata; la pressione sviluppata dipende la circuito di valle e necessitano quindi di valvole limitatrici di pressione per evitare danni alla pompa e al circuito, che va facilmente in sovrappressione nel caso di ostruzioni a valle.

I circuiti idraulici delle irroratrici si assomigliano abbastanza: la differenza principale sta nella presenza della valvola limitatrice di pressione; generalmente sono tutti dotati di una linea di bypass che mette in comunicazione il serbatoio con il circuito a valle della pompa, utilizzata per effettuare regolazioni sul flusso e soprattutto sulla pressione verso l'utenza-ugelli; nel serbatoio dell'irroratrice è sempre presente un agitatore per mescolare la miscela fitoiatrica contenuta; questo può essere di tipo meccanico, se si tratta di un albero con palette che ruota, o idraulico, se si tratta di un eiettore alimentato dalla pompa che fa ricircolare il fluido in cui è immerso.

Per tutti i tipi di pompa, il punto di funzionamento è quello caratterizzato dall'intersezione tra caratteristica interna (della pompa) e caratteristica esterna (del circuito): questo è soprattutto valido per le turbopompe, mentre le pompe volumetriche possono operare con portata poco dipendente dalla pressione del circuito esterno ma controllata dalla velocità di rotazione, fino ad arrivare al limite di pressione stabilito dalla valvola di sicurezza; in questi casi l'aumento di pressione si traduce in ulteriore coppia da vincere per far funzionare la pompa, la quale deve perciò essere accoppiata a un motore sufficientemente potente.

Per il progetto del circuito di irrorazione è stata scelta la pompa SH-8000-543-238 prodotta da *Shurflo* e commercializzata da *Salvarani*: si tratta di una motopompa a membrana con tre camere separate e motore in corrente continua a magneti permanenti; è alimentata a 12 Vdc e può assorbire da 3 a 8,7 A (quindi la potenza è dell'ordine $40 \div 100$ W); il motore ha un regime di rotazione compreso tra circa 1900 e 2600 giri/min. In fig. 29 è rappresentato il diagramma caratteristico della pompa, mentre in fig. 30 i disegni con gli ingombri quotati e in fig. 31 un'immagine del componente.

Questa pompa è autoadescante fino a circa 3 m di altezza, è dotata di valvola di non-ritorno per evitare reflussi e ha una massa di 2,13 kg; può funzionare fino a 6,9 bar, con 3,6 l/min di portata, che è la soglia di intervento della valvola di sicurezza. Questa pompa è pensata per un'applicazione manuale, abbinata ad esempio a una lancia spruzzatrice, dove chiudendo la valvola di comando manuale la pressione supera una certa soglia (regolabile) e la pompa si spegne, mentre riaprendo la valvola manuale, la pompa si riaccende quando la pressione scende sotto 5,8 bar, in modo che l'operatore non debba agire in continuazione sulla macchina per controllare il flusso. Le pompe di questa piccola taglia non hanno camere di compensazione.

Secondo quanto riferito da *Salvarani*, il campo di funzionamento ottimale degli ugelli inizia ad un livello di pressione di almeno $2,5 \div 3$ bar; se si rimane sotto questa soglia il circuito idraulico funziona male, è instabile, produce qualche spruzzo irregolare ma gli ugelli non riescono a lavorare e a nebulizzare il liquido. A tal proposito è stato scelto un punto di funzionamento di progetto con 5,4 bar di pressione e 4,2 l/min di portata (paragrafo 3.3.1), con prestazioni anche migliori rispetto ai droni DJI di riferimento (vedi tab. 1).

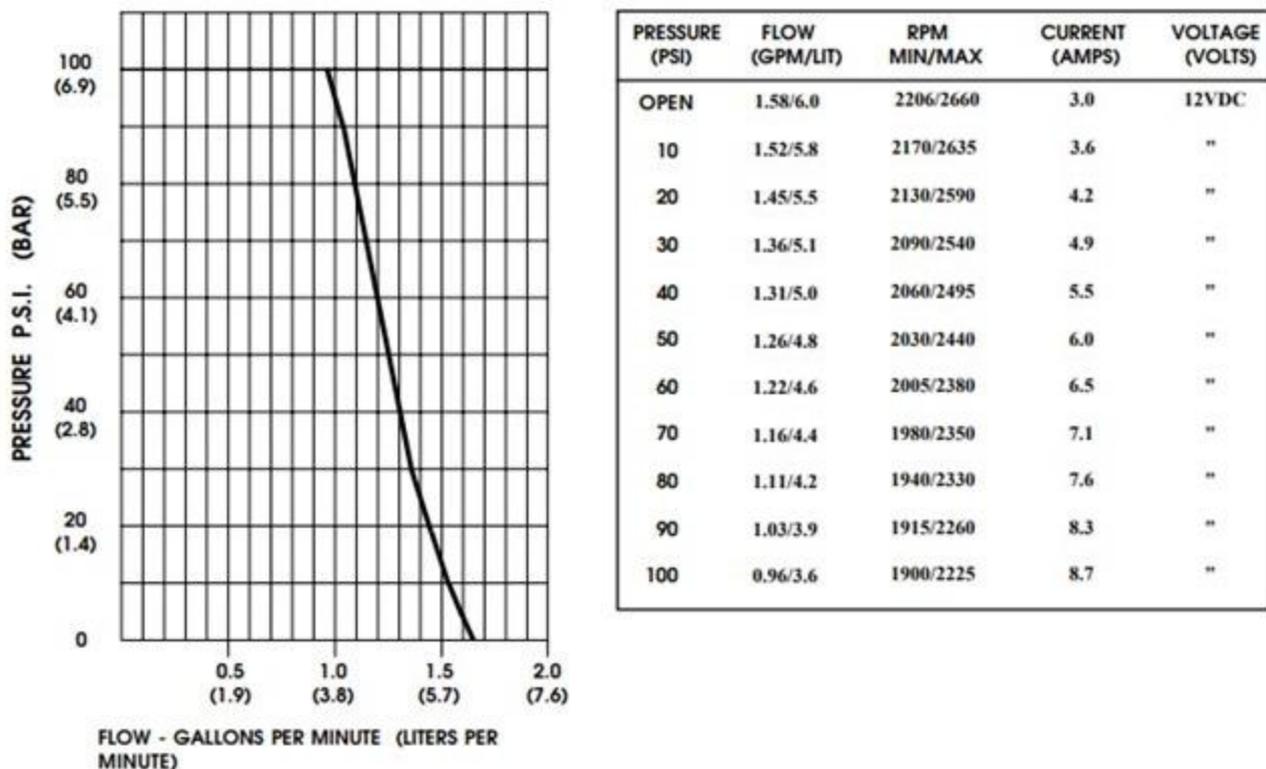


Fig. 29. Diagramma e tabella caratteristici della pompa SH-8000-543-238 in regime nominale

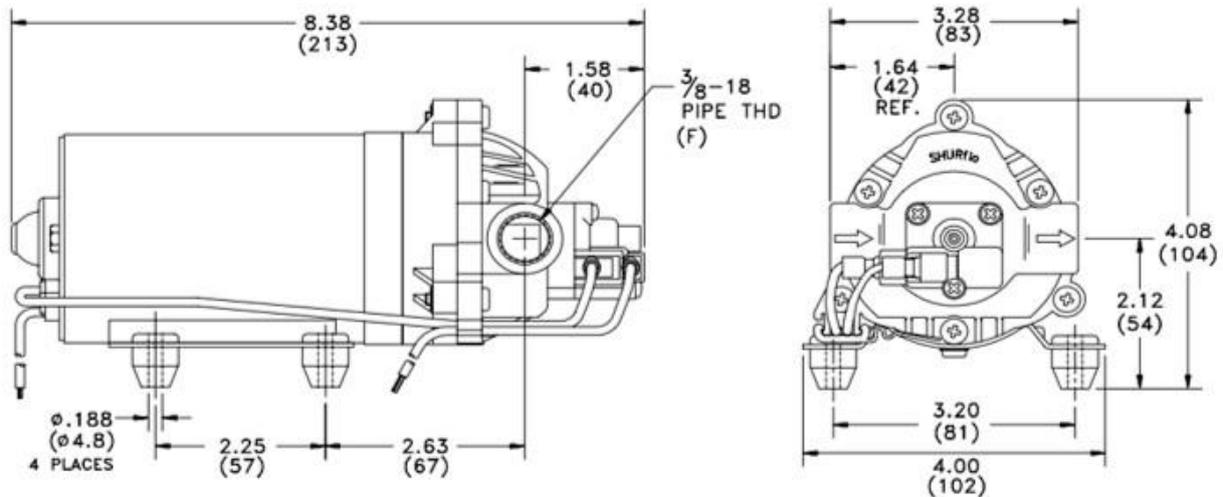


Fig. 30. Disegni quotati della pompa SH-8000-543-23. Tra parentesi le dimensioni in mm



Fig. 31. Immagine pompa SH-8000-543-23 tratta da [11]

La pompa è regolabile tramite potenziometro o tecniche analoghe fino a circa 6 V: questo fatto è molto importante perché, come si è visto in precedenza, la portata è molto legata alla velocità di avanzamento del drone (e alla dose di miscela per ettaro), ed è bene che entrambi questi parametri siano regolabili facilmente.

Come illustrato nel paragrafo 3.3.1 bisogna gestire opportunamente la combinazione di numero e tipo di ugelli irroratori per cercare di lavorare in un punto adeguato della caratteristica della pompa (con pressione superiore a 2,5 bar): prevedendo di regolare e parzializzare la pompa, quindi di spostare verso sinistra la sua curva caratteristica.

In fig. 32 è rappresentato uno schema molto semplificato del circuito idraulico di irrorazione; è stato aggiunto un filtro che in ogni caso dovrà essere presente per preservare la pompa da impurità che potrebbero danneggiarla o intasare gli ugelli; allo stesso modo si dovrebbe prevedere una valvola di intercettazione appena a valle del serbatoio.

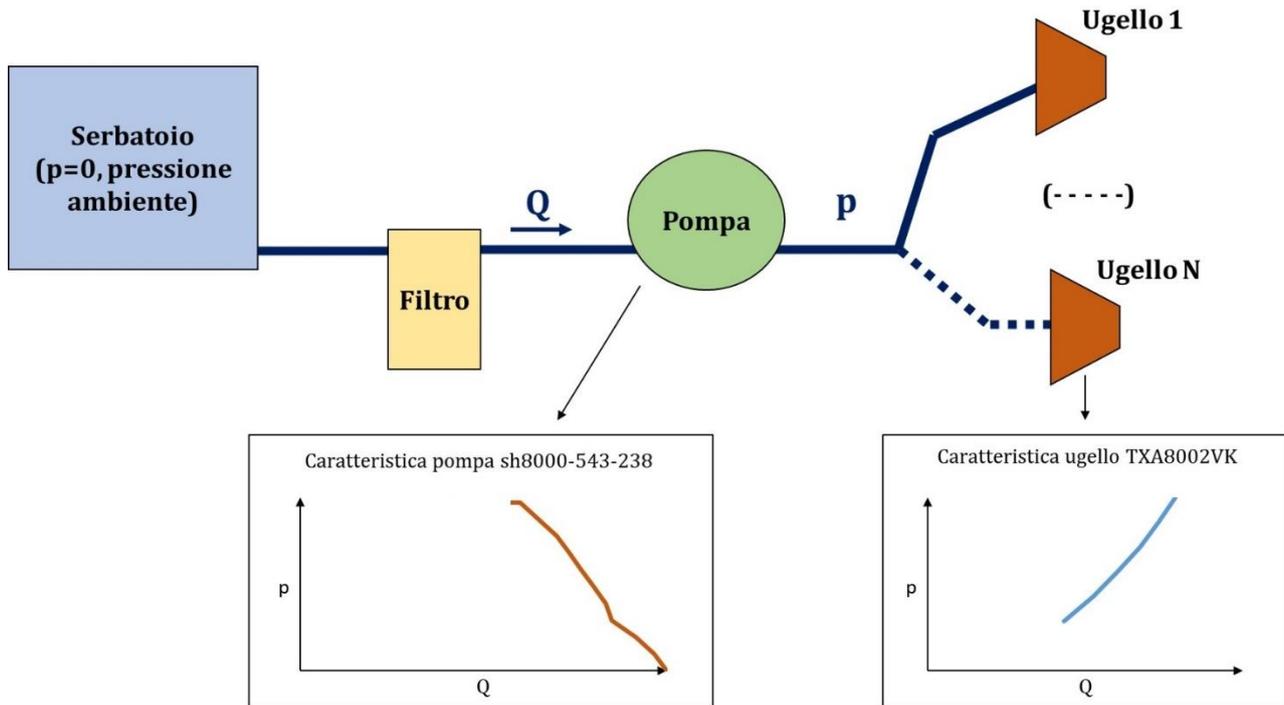


Fig. 32. Schema semplificato del circuito di irrorazione. I diagrammi caratteristici hanno solo scopo indicativo

4.2 Ventole

Come accennato in precedenza, il banco prova deve essere dotato di ventole che simulino i rotori del drone, non potendo usare direttamente l'aeromobile stesso per le prove in laboratorio. I rotori del drone di riferimento DJI MG-1 hanno un diametro considerevole (533 mm) e possono ruotare fino a velocità molto alte, nell'ordine dei 5500 giri/min; è difficile reperire ventole commerciali di queste dimensioni e prestazioni.

Per simulare la corrente d'aria di *downwash*, si potrebbero seguire due strade: la prima sarebbe quella di cercare di utilizzare direttamente motori ed eliche che equipaggiano il drone, mentre la seconda strategia potrebbe essere quella di impiegare ventole commerciali che si comportano alla stessa maniera dei rotori del drone pur essendo diversi in dimensioni e prestazioni. Nel primo caso si dovrebbero utilizzare dei componenti "scomodi" progettati per quell'applicazione specifica e sarebbero da adattare al banco prova con difficoltà; nel secondo caso il problema sui componenti sarebbe minimo, perché in commercio esistono tantissimi tipi di ventole da scegliere, ma sorgerebbe il problema di provocare gli stessi effetti con due ventole diverse.

Il secondo caso potrebbe essere risolvibile se si considera che nel drone irroratore esiste una distanza fisica non trascurabile tra le eliche, poste alla sommità dell'aeromobile e gli ugelli, posizionati certamente nel punto più basso possibile: il flusso d'aria che parte dalle eliche arriva nella zona degli ugelli dopo aver subito sicuramente e un rallentamento dovuto a varie dissipazioni e magari anche aver cambiato forma della sezione, essersi quindi allargato; sfruttando questo aspetto, nel banco prova si potrebbero installare delle ventole commerciali a poca distanza dagli ugelli irroratori, cosa che del resto si accorda bene con l'esigenza di costruire una struttura compatta e razionale nel banco, per sortire lo stesso effetto, o il più simile possibile, di quanto farebbero i veri rotori posti alla vera distanza.

Bisogna inoltre considerare la possibilità di impiegare delle ventole addizionali, montate assieme agli ugelli irroratori, non solo per potenziare l'effetto della corrente d'aria dei rotori

del drone, ma anche per dare al flusso d'aria una direzione vettorialmente diversa, che lo porti a essere più incidente verso il lato della pianta, dove la parte fogliare è esposta in tutta la sua altezza. Riuscire a compiere una penetrazione dall'alto della chioma fino alla fascia produttiva dei grappoli potrebbe essere un'impresa molto ardua, mentre ricorrere a un'ulteriore portata d'aria di trasporto, indirizzata con la giusta direzione, pensando eventualmente a una strategia di irrorazione con drone in asse con l'andana o accostato al filare, in modo che ci sia più spazio per lavorare sulla direzione laterale dell'irrorazione, potrebbe portare a ottimi risultati. Non è comunque possibile capire in anticipo questi aspetti se non si conducono delle simulazioni accurate o delle prove sperimentali.

Poiché il progetto del banco prova e del sistema di irrorazione del drone è completamente originale, è stata anche considerata la strada di utilizzare un sistema ad aria compressa per assistere l'irrorazione, soprattutto per la direzione laterale e la penetrazione della chioma: facendo alcune considerazioni esso è risultato non essere una buona scelta tecnica; l'aria compressa ha il problema di essere prodotta (anche a terra) e stoccata a bordo del drone, mentre presenta anche valori di consumo elevati rispetto alla resa, si è optato quindi di utilizzare delle ventole aggiuntive se necessario.

Per questa parte di progettazione sono state selezionati più modelli di ventole commerciali che potrebbero essere utili, sia per la simulazione dei rotori sul banco prova che per la simulazione e, magari, utilizzo sul campo di aria per irrorazione laterale.

In tab. 2 sono presenti i modelli selezionati, tutti alimentati nominalmente a 12 V in corrente continua; questa selezione serve per avere un'indicazione su quali prestazioni abbiano ventole con questa tensione nominale.

Produttore	Modello	Massa (kg)	Diametro (mm)	Portata (m ³ /h)	Corrente max (A)
SANYO DENKI	9WL1412P5G001	0,9	140	540	5,2
SANYO DENKI	9GV1512H501	0,45	150	510	2,9
COMAIR ROTRON	CDD12U3	1,5	250	1350	5,4
COMAIR ROTRON	MT12B3	0,8	150	510	3,3
SPAL AUTOMOTIVE	VA18-AP10/C-41S	1,3	385	1870	7

Tab. 2. Ventole commerciali di 12 Vdc. Dati arrotondati

Il produttore SPAL ha in catalogo ventole con diametro compreso tra i 300 e i 385 mm, i più grandi tra quelli commercialmente diffusi, con masse dell'ordine 2,5÷3,5 kg, portate collocate circa nell'intervallo 2000÷3000 m³/h e assorbimenti di corrente di circa 15÷30 A; il modello in tabella è stato selezionato per il basso assorbimento di corrente.

Dalla fig. 33 alla fig. 35 sono rappresentate le ventole classificate nella tabella precedente.

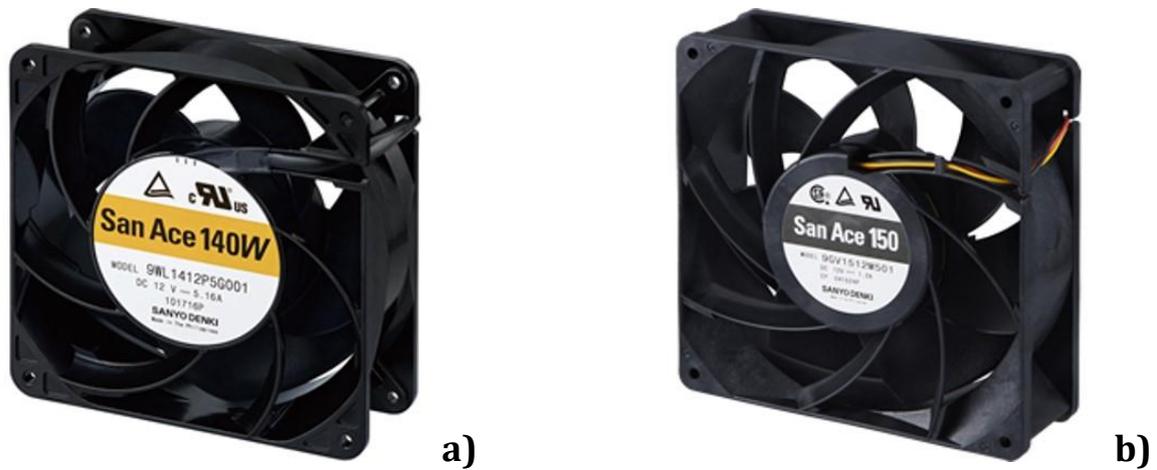


Fig. 33. Ventole SANYO DENKI: a) 9WL1412P5G001, b) 9GV1512H501

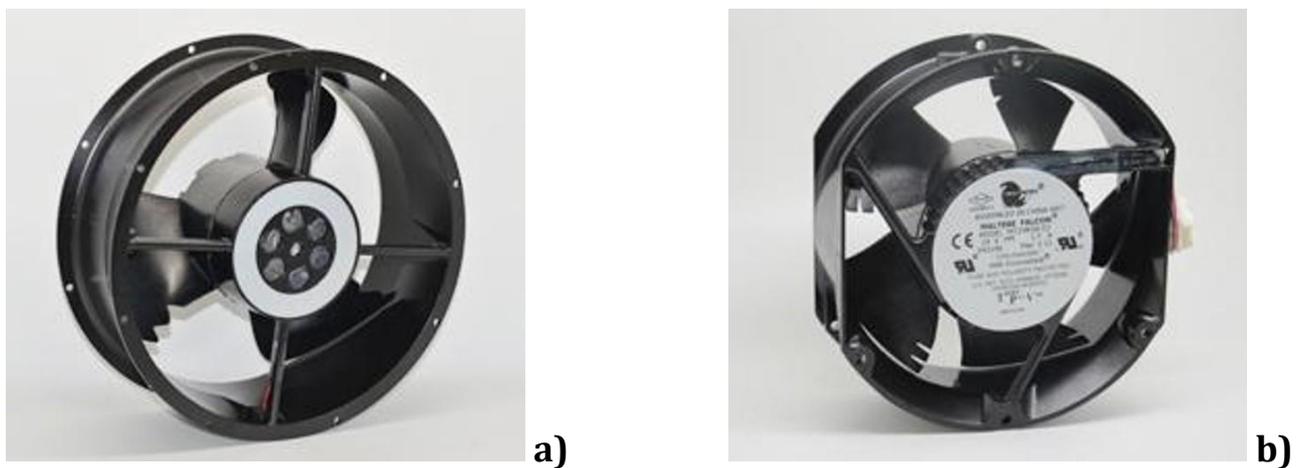


Fig. 34. Ventole COMAIR ROTRON: a) CDD12U3, b) MT12B3



Fig. 35. Ventola SPAL AUTOMOTIVE modello VA18-AP10/C-41S

È interessante confrontare questi componenti con le irroratrici attuali, in special modo gli atomizzatori che funzionano con lo stesso principio del sistema irroratore del drone. Nella tab. 3 seguente sono riassunte le caratteristiche salienti degli atomizzatori e dei trattamenti in vigneto, già presentate nel paragrafo 3.2.2, accompagnate dai corrispondenti valori tipici di una ventola applicabile al drone.

	Ventola commerciale	Atomizzatore	Consigliato in vigneto [7]
Diametro (mm)	140÷380	500÷900	x
Portata media (m³/h)	500÷1 800	10 000÷40 000	3000÷12 000
Portata massima (m³/h)	fino 3000	fino 80 000	18 000
Potenza assorbita (kW)	0,1÷0,5	5÷50	x

Tab. 3. Confronto tra ventola per drone e atomizzatore. I valori devono ritenersi estremamente indicativi

Si può notare che queste ventole non sono certamente in grado di produrre lo stessa portata di un normale atomizzatore da vigneto, tuttavia i valori consigliati per i trattamenti sono spesso inferiori a quanto si usi abitualmente e sono più vicini alle prestazioni delle ventole per drone.

Chiaramente, l'obiettivo della progettazione non deve essere l'inseguimento impossibile delle prestazioni di un atomizzatore, ma deve essere quello di sfruttare quanto più possibile i punti di forza del drone, ossia la maggior vicinanza e l'ampia possibilità di posizionamento rispetto al bersaglio, utilizzando sapientemente i flussi d'aria intrinseci al volo del drone o provenienti dalle ventole aggiuntive; il flusso d'aria prodotto da un atomizzatore è molto ampio e disperso, mentre attraverso una (o più) ventole commerciali si produce una portata meno consistente ma più mirata. Nella progettazione e nell'utilizzo del sistema di ventilazione del drone, questo aspetto deve essere governato adeguatamente per ottenere effetti di trattamento simili a quelli prodotti da un atomizzatore tradizionale.

5 Progettazione e costruzione del banco prova

Il progetto del banco prova nasce da un'idea completamente originale e non integra altri progetti pregressi o non sviluppa banchi già esistenti. Lo scopo della progettazione risiede nel riprodurre in laboratorio l'irrorazione di un drone in vigneto: il banco deve quindi essere composto da una parte che simuli i filari e le viti, il *simulatore-vigneto*, e un'altra che simuli il drone, chiaramente equipaggiato con il proprio circuito irroratore, detta *simulatore-drone*. Il banco prova deve sopperire all'impossibilità di condurre prove sperimentali, in laboratorio, direttamente con il drone stesso, in quanto molto complicato da gestire in ambienti chiusi e limitati.

Il banco prova è progettato con lo scopo di riprodurre una situazione di regime del trattamento di irrorazione, precisamente quando il drone irroratore transita lungo un filare spruzzando il fitofarmaco; il banco non deve simulare alcuna manovra, inversione di marcia, aggiramento di ostacoli, ecc. ma deve semplicemente rappresentare il volo del drone a quota costante rispetto al terreno (e verosimilmente anche rispetto alle piante del filare, dato che queste forme di allevamento delle viti hanno chiome di altezza molto regolare). Questa strategia di volo, appositamente realizzata per questo tipo di applicazione, è praticata tramite l'utilizzo di sensori molto sofisticati, in grado di misurare la distanza da terra con grande precisione.

Il simulatore-vigneto è una parte statica del banco che deve essenzialmente fungere da bersaglio per le irrorazioni di prova: il simulatore-drone, dotato di velocità orizzontale, spruzzerà del liquido durante il suo passaggio, che si depositerà a sua volta su questa parte di banco e verrà rilevato con opportuni metodi. Il simulatore-vigneto non è un banale bersaglio strumentato, è una parte molto importante che deve riprodurre il più fedelmente possibile il comportamento del vigneto durante il trattamento: bisogna che riesca a ostacolare la penetrazione delle gocce allo stesso modo di quanto fa una chioma di vite e deve essere costruito in modo accorto, senza modifiche lineari della geometria che abbiano il solo scopo di contenere le dimensioni del banco; questo elemento svolge un ruolo altrettanto importante di quello del simulatore-drone: se lo strumento di valutazione delle irrorazioni è poco coerente con il vero vigneto, non si può capire se il sistema irroratore del drone funziona adeguatamente, perché le prove daranno risultati inutilizzabili.

Il simulatore-drone è l'elemento del banco prova che compie fisicamente l'irrorazione: esso è dotato dello stesso sistema di irrorazione che si intende utilizzare nel drone irroratore vero e proprio; ciò non significa che il sistema è immediatamente trasferibile tra banco prova e drone, ma che i componenti utilizzati sono gli stessi, soprattutto quelli più essenziali quali pompa, ugelli e ventole aggiuntive. Il simulatore-drone deve essere posizionato sul piano frontale del banco prova (normale all'asse del simulatore-vigneto) con molta accuratezza poiché le irrorazioni dipendono molto dalla quota di volo del drone e dalla posizione rispetto all'asse del vigneto: il banco deve essere progettato in modo da garantire la possibilità di regolare queste posizioni. Non meno importante è l'aspetto della movimentazione del simulatore-drone: questo elemento deve essere in grado di traslare orizzontalmente con le stesse velocità operative del drone irroratore, in qualunque posizione scelta sul piano frontale del banco prova. A tal proposito è stata progettata una struttura che permette di posizionare il simulatore-drone, sostenendolo ad una precisa altezza da terra, e di poterlo muovere con una certa velocità rispetto al simulatore-vigneto.

Il banco prova è interamente progettato sulle dimensioni reali del vigneto di riferimento: non è stata modificata o accorciata la geometria originaria e le misure non sono state scalate, il banco prova è dunque in scala 1:1 e occupa uno spazio rilevante.

5.1 Progetto del banco prova

In questo paragrafo sono esposte le considerazioni e le ipotesi che portano alla definizione del progetto del banco prova.

Per semplicità di funzionamento e costruzione, si è ritenuto di posizionare il simulatore-drone nel piano frontale del banco in modo completamente manuale: questa scelta è giustificata dal fatto che non vi è necessità di cambiare traiettoria o quota di volo durante l'irrorazione, in quanto il banco deve rappresentare una situazione di regime. In sede sperimentale verranno sicuramente effettuate più prove, anche in tempi lunghi, con il medesimo posizionamento del simulatore-drone, soprattutto per quanto riguarda la collocazione orizzontale che è legata alle strategie di irrorazione possibili, descritte al paragrafo 2.4: effettuare una sporadica modifica della traiettoria in direzione orizzontale (o una regolazione di altezza) con metodi manuali non appare perciò limitante dal punto di vista del funzionamento del banco, fatto salvo il rispetto dei requisiti di sicurezza e di comodità delle operazioni; non è altresì richiesta un'altissima precisione di posizionamento, rendendo ancor più naturale l'adozione di un sistema manuale.

Sulla scorta di queste considerazioni, in fig. 36 è rappresentato uno schema laterale molto semplificato del banco prova, con la struttura ideata per sorreggere il simulatore-drone: questo elemento deve poter traslare orizzontalmente, sotto la spinta di una trasmissione motorizzata, lungo la corsa L ; la posizione verticale può invece essere fissata spostando manualmente l'asse motorizzato lungo delle guide verticali. A livello progettuale è stato previsto che il simulatore-drone assuma inizialmente una quota compresa tra 1,5 e 3 m da terra: il limite inferiore rispecchia la quota minima raggiungibile dai droni DJI di ultima generazione (vedi tab. 1), che costituiscono il riferimento per l'intero progetto; il limite superiore è dovuto alla massima distanza dalla sommità del simulatore-vigneto, che molto probabilmente si osserverà in fase di funzionamento, stimata in 1 m circa. Come si potrà vedere in seguito, è molto facile modificare questi limiti ed è doveroso farlo in fase di costruzione, quando la geometria del simulatore-drone è completamente definita e la posizione degli ugelli è nota.

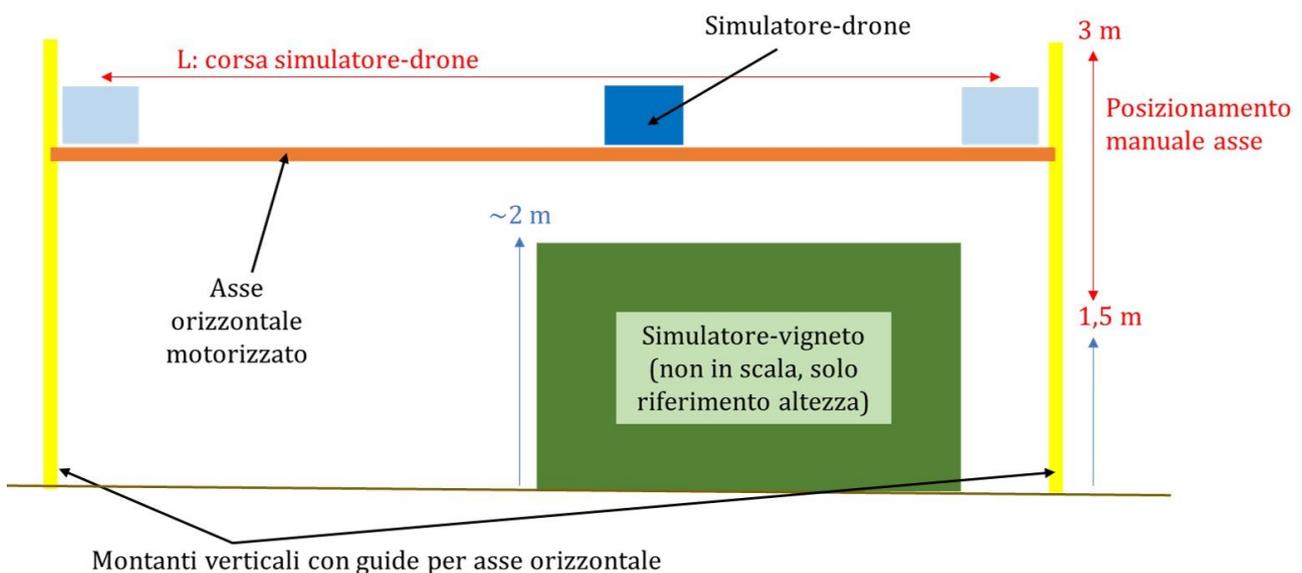


Fig. 36. Schema laterale del banco prova

Il posizionamento alla quota inferiore è possibile solo adottando facendo volare il drone in asse con l'andana o affiancato al filare, purché il suo ingombro trasversale sia sufficientemente contenuto: nel funzionamento sul campo, non è consigliabile volare all'interno del corridoio tra i filari visto che aumenterebbero le difficoltà di controllo e i rischi di danneggiamento della macchina; in laboratorio questa possibilità dev'essere lasciata aperta, in quanto potrebbe simulare un sistema irroratore che utilizza delle prolunghe in grado di calarsi sotto la quota sommitale delle piante.

Questa concezione del banco prova suppone che il posizionamento orizzontale della struttura del simulatore-drone sia effettuato spostando di peso l'intera struttura, che rappresenta un corpo a sé stante rispetto al simulatore-vigneto.

Le scelte tecniche e le considerazioni sul posizionamento del simulatore-drone non esauriscono certamente la progettazione di questa parte di banco: è altrettanto fondamentale esaminare a fondo la cinematica della traslazione del simulatore-drone e la dinamica dell'irrorazione, ovverosia il funzionamento del processo di spruzzatura e deposizione delle gocce in relazione alla traslazione del circuito irroratore (simulatore-drone). Nello schema di fig. 37 sono riassunte graficamente queste questioni.

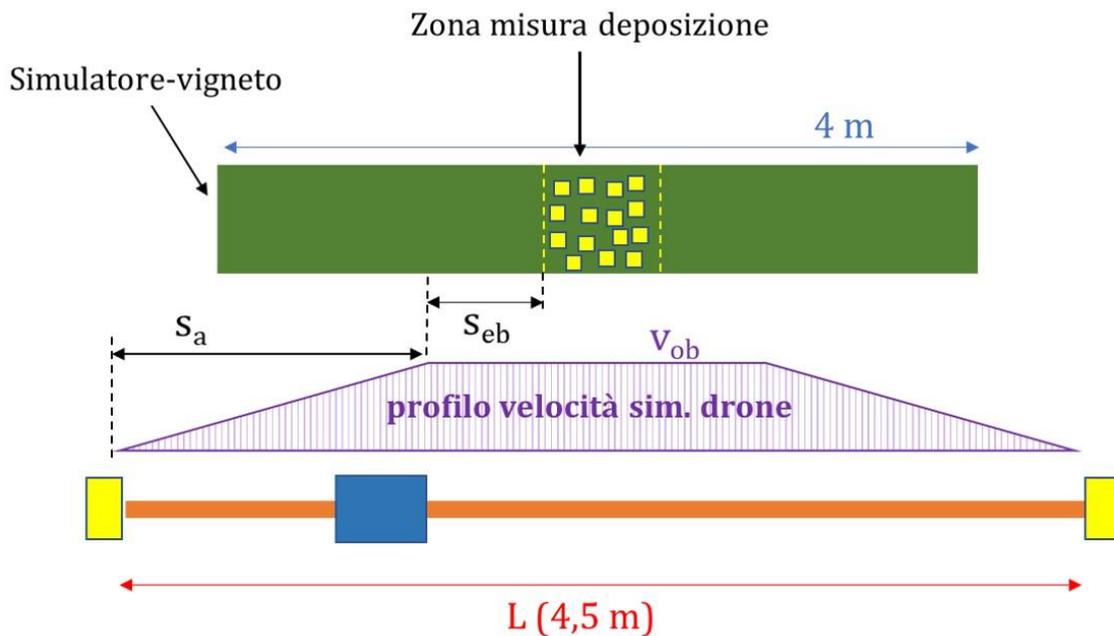


Fig. 37. Schema dall'alto del banco prova, con simulatore-vigneto a un filare solo

Dal punto di vista cinematico, il simulatore-drone parte da un estremità dell'asse orizzontale motorizzato con velocità nulla e deve raggiungere una velocità obbiettivo costante e ben precisa, v_{ob} , per riprodurre al meglio le condizioni di funzionamento di regime del vero drone irroratore in vigneto; chiaramente questa variazione di velocità sottende un'accelerazione non infinita che perdura per un certo tempo, necessario al raggiungimento di v_{ob} , durante il quale viene coperto lo spazio s_a . La situazione si ripresenta in maniera simmetrica quando il simulatore-drone deve decelerare ed arrestarsi, essendo giunto a fine corsa; per semplicità si è ipotizzata un'accelerazione costante, con accelerazione e frenata identiche in modulo.

Per essere certi che i risultati delle prove rispecchino veramente la condizione di regime del trattamento, con velocità di volo e portata irrorata costanti, bisogna collocare gli strumenti di misura (cartine idrosensibili) in una zona del simulatore-vigneto in corrispondenza della

quale il simulatore-drone abbia già raggiunto la velocità obbiettivo; per evitare ulteriori alterazioni dei risultati, sarebbe meglio se la spruzzatura cominciasse a essere effettuata da prima della zona di misura e smessa solo oltre la sua fine, in modo tale da simulare alla perfezione una condizione di regime, escludendo effetti di bordo ed effetti dovuti ai transitori. Per soddisfare queste condizioni, sarebbe quindi opportuno mantenere un margine tra la zona di misura e il punto di raggiungimento della velocità obbiettivo costante (supponendo per semplicità che la spruzzatura venga anch'essa almeno attivata in quel punto e disattivata in quello simmetrico di inizio frenata): la distanza s_{eb} .

La lunghezza del simulatore-vigneto è di circa 4 m ed è analoga alla dimensione di due campate del vigneto di riferimento (vedi fig. 1); per tenere un margine di sicurezza rispetto alle problematiche analizzate in precedenza e per poter effettuare le prove in configurazione di drone in asse con il filare (dovendo sovrapporre le due strutture, occorre un franco sufficientemente largo), è stato previsto che la corsa totale del simulatore-drone sia più lunga di 50 cm rispetto al simulatore-vigneto.

Sotto l'ipotesi che l'accelerazione sia costante (cosa in realtà impossibile), si può calcolare la distanza s_a in funzione dell'accelerazione a e della velocità finale obbiettivo, v_{ob} , con le equazioni del moto uniformemente accelerato. Si dimostra che:

$$s_a = \frac{v_{ob}^2}{2 \cdot a} \quad (6)$$

In tab. 4 sono riportati i valori ottenuti da alcune combinazioni di a e v_{ob} . Questi sono valori puramente teorici ma possono dare un'indicazione nella definizione della geometria del banco prova. Non è possibile stimare dei valori teorici per la minima distanza s_{eb} e si può conoscere solo attraverso l'esperienza delle prove.

s_a (cm)		v_{ob} (m/s)			
		2	4	6	8
a (m/s^2)	5	40	160	360	640
	10	20	80	180	320
	20	10	40	90	160
	30	7	27	60	107
	40	5	20	45	80

Tab. 4. Calcolo della distanza s_a con accelerazione costante

Il campo delle velocità obbiettivo utilizzate in tab. 4 fa riferimento alla velocità massima operativa espressa dal drone di riferimento DJI MG-1, mentre i valori di accelerazioni rispecchiano i massimi possibili emersi dall'esame di diversi attuatori per la traslazione orizzontale. Per contenere le dimensioni del banco prova, il quale a parità di grandezza della zona di misura avrebbe bisogno di corse e lunghezze maggiori per funzionare con basse accelerazioni, è preferibile impiegare attuatori molto prestanti, tuttavia questa scelta ha un risvolto negativo perché implicherebbe di utilizzare attuatori molto pesanti, ingombranti e costosi, occorre perciò trovare un buon compromesso.

5.1.1 Disegni del banco prova progettato

Sulla base delle considerazioni espresse in precedenza è stato possibile definire un disegno del banco prova. Questo è stato concepito come un insieme organico di tre corpi indipendenti, due simulatori di filari che costituiscono il simulatore-vigneto e una struttura aerea che sorregge il simulatore-drone e ne permette i suoi movimenti.

In fig. 38 è raffigurata un'immagine dell'intero banco prova. Il simulatore-vigneto ha le stesse dimensioni del vigneto reale, ma per compattare le dimensioni sono state eliminate le parti dei pali di sostegno che sporgono rispetto alla sommità delle chiome (vedi fig. 2); nel successivo paragrafo 5.4 è presente un'ipotesi di come potrebbe essere costruita questa parte.

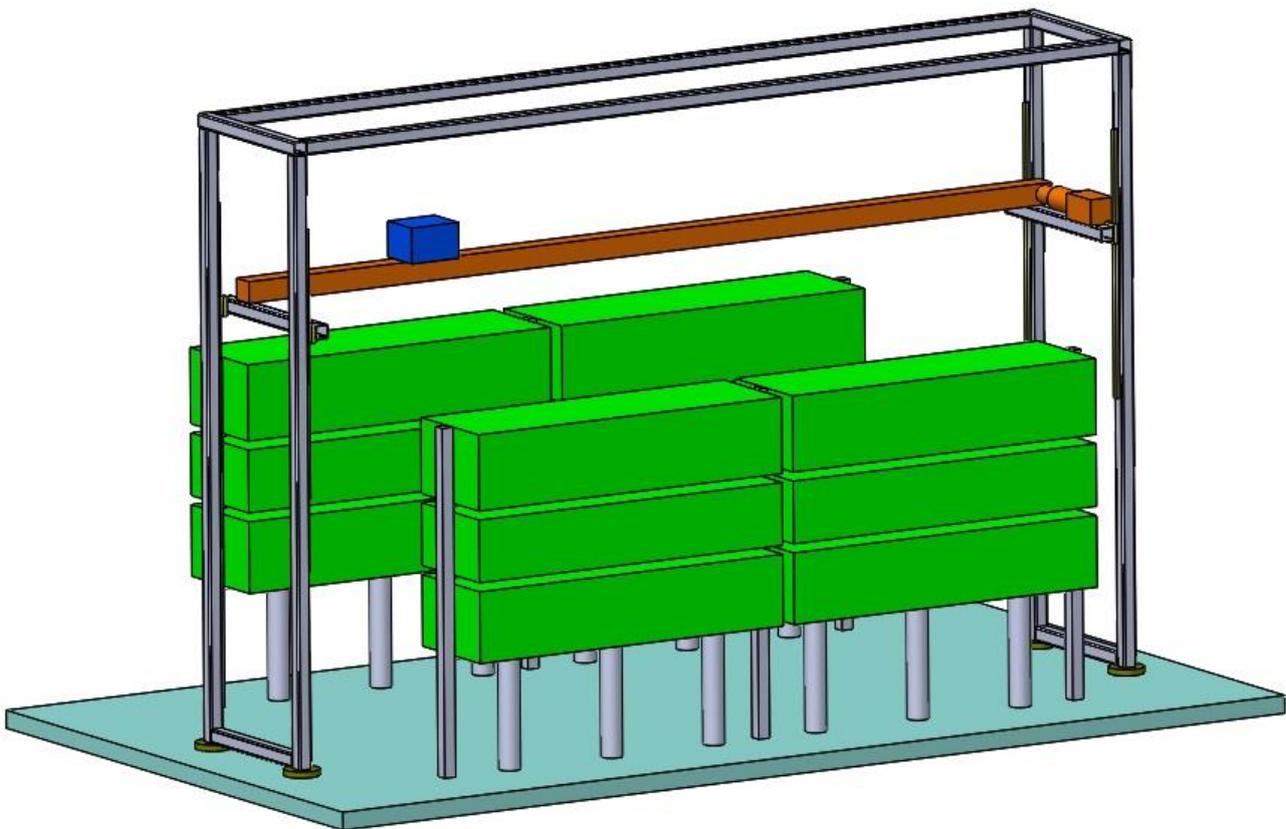


Fig. 38. Disegno del banco prova complessivo su pavimento

Nelle rappresentazioni, il posizionamento verticale del simulatore-drone è casuale, ma è chiaramente contenuto nel campo di possibilità schematizzato in fig. 36. La fig. 42 rappresenta il portale di supporto del simulatore-drone, i cui ingombri sono quotati in fig. 43; la struttura è più lunga del valore di corsa ipotizzato di 4500 mm per il semplice fatto che l'attuatore scelto, un modulo lineare (descritto nel paragrafo 5.3), ha un ingombro fisico maggiore della corsa di traslazione che permette di realizzare.

Il simulatore-drone è schematizzato come un piccolo cubo (corpo di colore blu) solo perché non è nota più in dettaglio la sua geometria; questa rappresentazione vuole quindi essere solo simbolica. Anche gli altri componenti sono più che altro simbolici, ma i loro ingombri sono realistici. Le viste raffigurate in fig. 39 e fig. 40 permettono di cogliere la dimensione degli ingombri dell'intero banco. Nelle rappresentazioni dall'alto (fig. 40 e fig. 41) si è colta l'occasione per mostrare le configurazioni corrispondenti alle strategie estreme di irrorazione del vigneto (drone completamente sopra il filare o sopra l'andana).

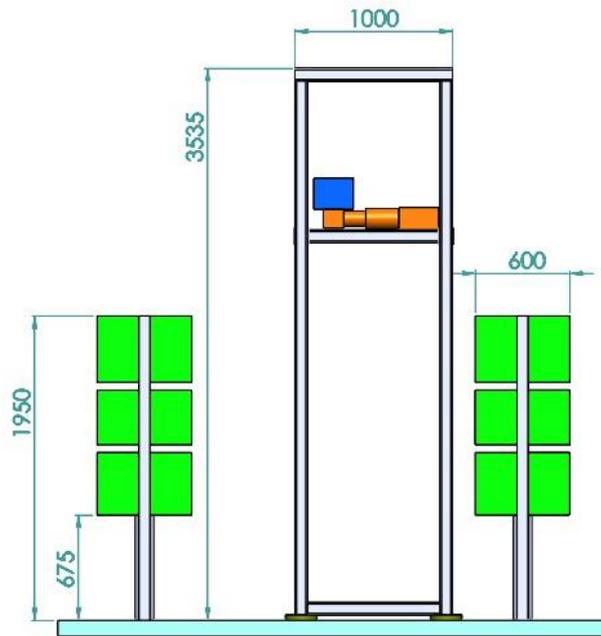


Fig. 39. Vista frontale del banco prova. Quote in mm

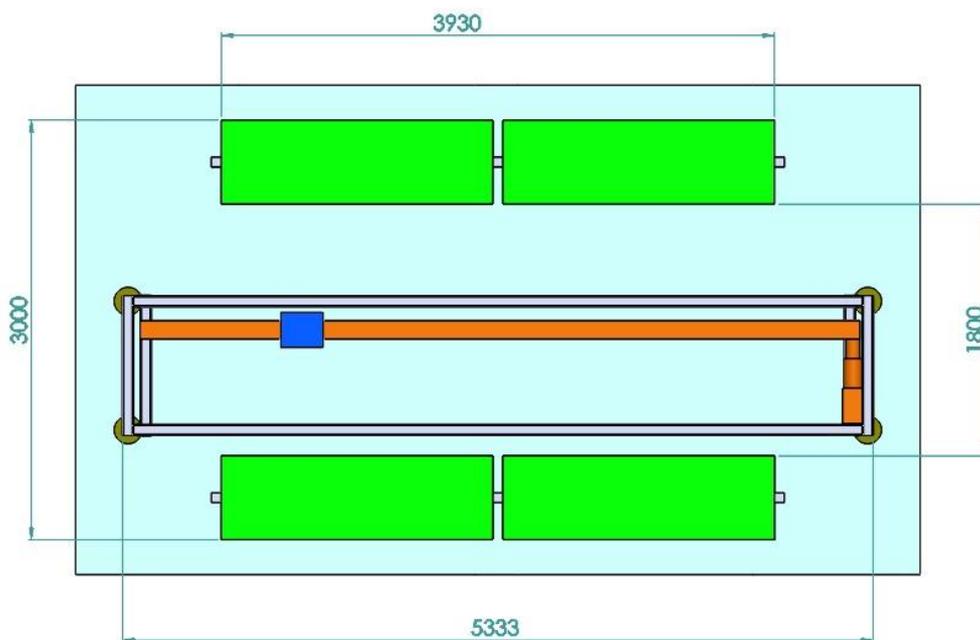


Fig. 40, Vista superiore del banco prova. Configurazione con drone irroratore sulla mezzeria tra i due filari. Quote in mm

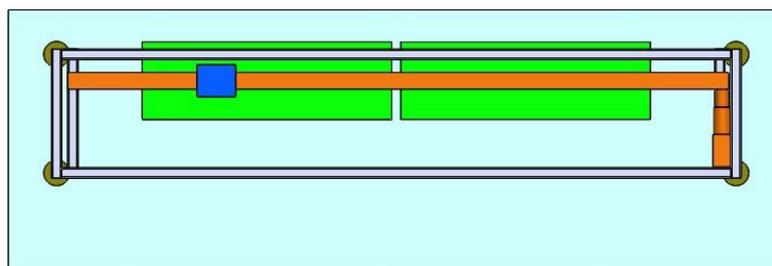


Fig. 41. Vista superiore del banco prova. Configurazione con drone irroratore sull'asse di un filare

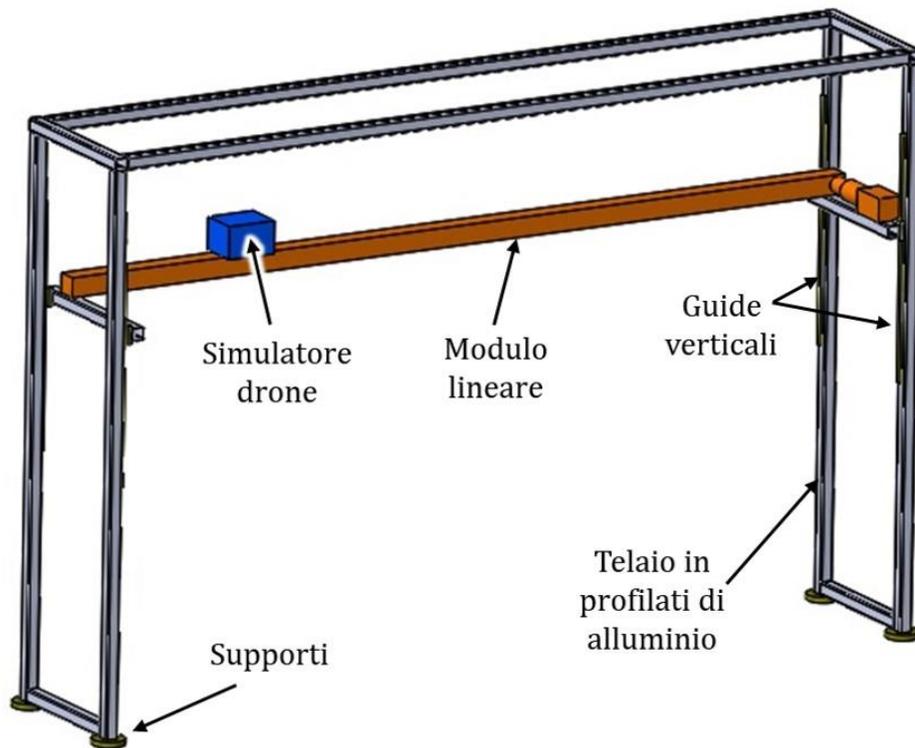


Fig. 42. Struttura di supporto del simulatore-drone con indicazione dei componenti

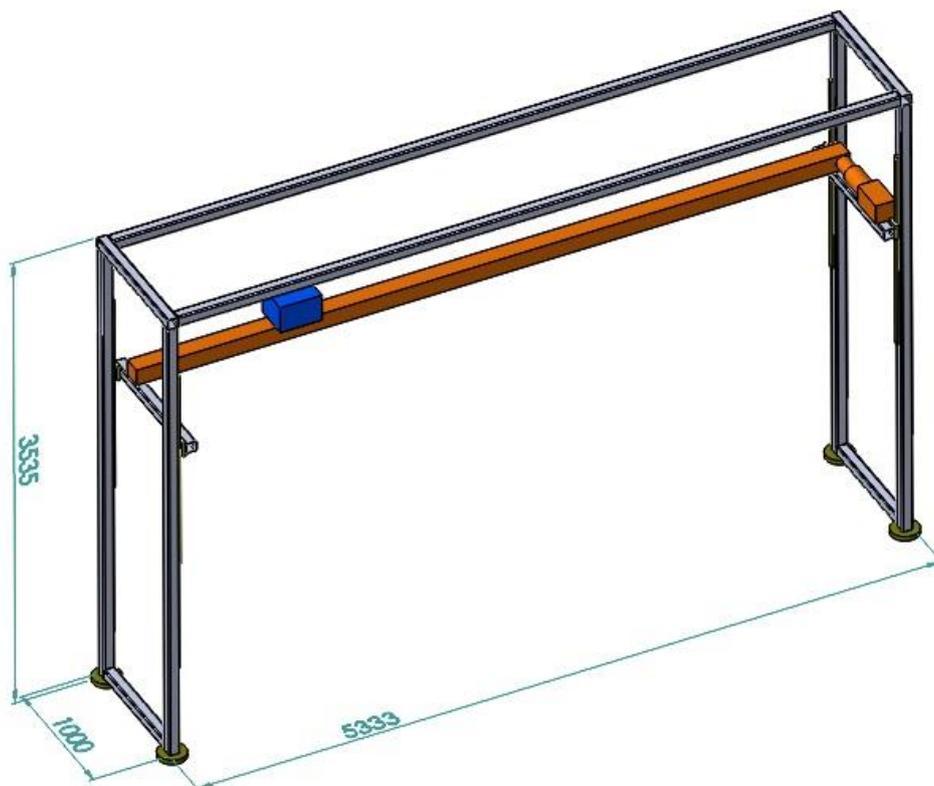


Fig. 43. Ingombri della struttura di supporto del simulatore-drone. Quote in mm

Per via degli ingombri del gruppo motore-trasmissione del modulo lineare, quest'ultimo appare eccentrico rispetto alla sua struttura di sostegno: questo fatto non comporta alcun

problema. La struttura appoggia su quattro supporti ben posizionati ed è sufficientemente stabile: durante il funzionamento si verificano dei trasferimenti di carico tra la testa e la coda della struttura dovuti alle forze e coppie di inerzia, tuttavia vista l'importante lunghezza della campata nessun appoggio si dovrebbe scaricare, originando instabilità, come dimostrato da alcuni semplici calcoli eseguiti.

Data la snellezza delle strutture, molto alte e pesanti ma con basi di appoggio strette, sarebbe comunque opportuno fissarle a terra per evitare ribaltamenti dovuti a forze e momenti non prevedibili, quali gli urti, e alla forza di inerzia orizzontale dovuta alla traslazione del macchinario-drone, che può raggiungere valori importanti.

5.2 Circuito irroratore e dimensionamento del serbatoio

Avendo progettato in modo preliminare il circuito di irrorazione del drone (paragrafo 4.1) e stimando la sua velocità operativa sulla base di quelle raggiungibili dai droni DJI, è possibile calcolare la dose di miscela fitoiatrica per ettaro che il macchinario-drone è in grado di distribuire, al di là della capacità penetrante e dell'efficacia del trattamento.

La tab. 5 riporta alcuni valori di dose all'ettaro, calcolati secondo la formula (5), avendo considerato l'interfila del vigneto di riferimento; le portate (totali sul l'insieme degli ugelli) in tabella si riferiscono a un campo di funzionamento della pompa con pressione superiore a 2,5 bar, considerata il livello minimo per effettuare la nebulizzazione. La velocità v_{ob} ha lo stesso significato di quanto visto in precedenza: si tratta di una velocità costante con la quale si imposta il trattamento di irrorazione, identica per drone e per banco prova.

dose _{miscela} (l/ha)		v_{ob} (m/s)				
		1	2	3	5	8
Q (l/min)	3,6	250	125	83	50	31
	3,9	271	135	90	54	34
	4,2	292	146	97	58	36
	4,5	313	156	104	63	39
	4,8	333	167	111	67	42
	5,1	354	177	118	71	44

Tab. 5. Dosi all'ettaro arrotondate, con velocità e portate tipiche del drone. Interfila 2,4 m

Si può notare come i valori siano in genere molto bassi rispetto alle dosi abitualmente usate in vigneto e potrebbero subentrare problemi di qualità del trattamento, dati da questa enorme differenza. Si rammenta che questo valore è legato a una specifica interfila del vigneto, ma il valore è abbastanza regolare per tutti i tipi di vigneto e si potrebbero estendere questi valori anche ad altri. Le irrorazioni condotte a bassa velocità potrebbero dare migliori risultati.

Le diverse combinazioni di portata e velocità obiettivo portano ad ottenere diversi tassi di irrorazione: da un punto di vista pratico, un'alta dose all'ettaro implica rifornimenti del serbatoio più frequenti a parità di spazio o terreno coperto.

Dal punto di vista del banco prova è opportuno dimensionare il serbatoio da montare a bordo del simulatore-drone: considerando la situazione teorica di regime, con portata e velocità

costanti, è possibile risalire alla quantità di liquido irrorata lungo una certa distanza. Sostituendo la (3) nella (4) si ottiene:

$$Vol_s = \frac{Q \cdot L_v}{v_{ob}} \quad (7)$$

dove Vol_s ha il significato di volume serbatoio consumato e L_v è la lunghezza di irrorazione, mentre gli altri simboli sono già noti.

In tab. 6 si è proceduto a calcolare il volume irrorato con varie combinazioni di portata e velocità obiettivo; la distanza di irrorazione è stata posta a 4 m, ovvero la lunghezza dell'intero simulatore-vigneto, in modo da svolgere dei calcoli cautelativi nel caso in cui il punto di inizio irrorazione corrisponda a quello di inizio della sagoma del simulatore-vigneto.

Vol _s (ml)		v _{ob} (m/s)			
		1	3	5	8
Q (l/min)	3,6	240	80	48	30
	4,3	287	96	57	36
	5,1	340	113	68	43

Tab. 6. Volume serbatoio consumato durante una sola corsa di irrorazione di lunghezza 4 m

Il banco prova dovrebbe essere utilizzato in maniera da tale compiere una sola irrorazione (e quindi una sola traslazione), accompagnata da una successiva analisi dei risultati rilevati dagli strumenti di misura (cartine idrosensibili): anche qualora si conducesse una campagna di prove in sequenza, il banco prova andrebbe riportato allo stato originario all'inizio di ogni singolo test, asciugando il simulatore vigneto oggetto della spruzzatura e sostituendo le cartine idrosensibili (vedi anche 5.4). Queste operazioni richiedono del tempo, quindi non sarebbe di intralcio alle sperimentazioni dover rifornire il serbatoio simulatore-drone molto frequentemente, in quanto il banco prova è spesso fermo e accessibile; inoltre, la qualità delle irrorazioni non dipende certo dal volume totale del serbatoio, aspetto che è solamente significativo per l'autonomia del drone realmente operante in vigneto, dove anche la quantità di miscela fitoiatrica trasportata ha importanza. Sulla scorta di queste considerazioni è stato deciso di dotare il banco prova di un serbatoio dimensionato sul caso peggiore di consumo (velocità molto bassa e portata irrorata massima) ripetuto per circa tre o quattro passate di irrorazione: il serbatoio ha quindi una capacità di circa 1÷1,4 l ed evita di sovraccaricare inutilmente il banco prova, generando magari problemi di gestione del liquido dovuti alle alte sollecitazioni dinamiche possibili. Il serbatoio del drone di riferimento DJI MG-1 ha una capacità di 10 l: se fosse stato adottato sul banco prova avrebbe comportato un aggravio di carico fino a circa 9 kg, senza una reale giustificazione.

Osservando i risultati ottenuti dai calcoli teorici (tab. 5) si nota che le migliori condizioni di irrorazione si hanno probabilmente per basse velocità del drone; combinando quest'informazione con quella di tab. 4, si potrebbe supporre che la realizzazione di un banco molto prestazionale potrebbe rivelarsi inutile e dispendiosa, soprattutto qualora ci si rendesse conto sperimentalmente che a bassa velocità le irrorazioni darebbero risultati migliori. Bisogna prestare molta attenzione a questo aspetto per costruire intelligentemente il banco prova.

5.3 Organi di movimento

Il banco prova, o più precisamente il portale aereo di supporto del simulatore-drone, è dotato di componenti che devono consentire il movimento del simulatore-drone stesso, sia del punto di vista del posizionamento verticale manuale che da quello della traslazione motorizzata, molto importante ai fini della corretta riproduzione delle dinamiche di irrorazione reali del drone sul campo.

La scelta tecnica dei componenti che realizzano queste funzioni parte dall'analisi dei carichi in gioco e delle prestazioni richieste. È noto, a livello di progetto, che si vorrebbero raggiungere velocità comparabili con quelle dei droni di riferimento DJI (tab. 1), quindi valori nell'ordine di $7\div 8$ m/s; è altrettanto chiaro che se il sistema di attuazione della traslazione non dovesse essere sufficientemente prestante, il banco prova non riuscirebbe a funzionare (come si vede in tab. 4 e con l'eq. (6), se l'accelerazione costante non raggiungesse almeno il valore di $14,2$ m/s² non ci potrebbe essere una zona a velocità obiettivo costante su 4,5 m di corsa di traslazione).

Il passo preliminare per la selezione degli organi di movimento sta nello stimare il carico che il simulatore-drone comporta: in tab. 7 sono raccolti i dati noti e stimati che consentono di definire in circa 15 kg la massa totale di questo elemento.

Componente	Massa (kg)	Origine dato
Pompa	2,13	catalogo
Serbatoio	1÷1,4	dimensionamento
Ugelli, tubi, raccordi e altri elementi del circ. irroratore	0,3÷0,5	stima
Ventole	5,2	stima (4 ventole grandi tipo SPAL da 1,3 kg)
Telaio: profilati alluminio, piastra di supporto e altro	4÷6	stima
TOTALE (arrotondato)	15	-

Tab. 7. Valutazione masse simulatore-drone

Come si può intuire, portare una massa di circa 15 kg alla velocità di 8 m/s entro uno spazio di 4,5 m non è assolutamente banale, richiede un attuatore molto prestante che sia in grado di traslare questo corpo lungo tutta la corsa disponibile anche in meno di un secondo.

Per la progettazione dell'asse orizzontale motorizzato sono state fatte diverse ipotesi che hanno comunque tutte riguardato l'adozione di una trasmissione con flessibile, sia per ragioni di semplicità e di risparmio economico, sia per il fatto che non sono richieste alte rigidità e precisione per questo movimento traslatorio.

Inizialmente si è pensato ad utilizzare una catena trasportatrice, in grado sia di traslare il simulatore-drone che di sopportarne il peso: questa strada si è rivelata tuttavia molto complicata, in quanto avrebbe richiesto una grande tensione della catena e si sarebbe dovuta realizzare una struttura capace di sopportare questa sollecitazione; inoltre, le ruote dentate, motrice e di rinvio, avrebbero chiesto grandi precisioni di allineamento in fase di montaggio e

si sarebbe dovuta comunque studiare una trasmissione, con il relativo motore, specificatamente applicati a questo caso in esame; la catena presenta nondimeno un intrinseco pericolo di proiezione di pezzi molto pesanti e pericolosi in caso di rottura, quindi anche l'installazione di un carter di sicurezza avrebbe causato un grande impiccio nell'utilizzo del banco prova.

Una seconda opzione esplorata è stata quella di utilizzare una trasmissione a cinghia dentata, in modo da conservare il vantaggio di avere una relazione cinematica esatta tra la rotazione delle pulegge e la traslazione del simulatore-drone, non essendoci strisciamenti, esattamente come poteva già essere per la catena trasportatrice; in questo caso si è potuto contare su un mezzo di trasmissione più leggero ma con lo stesso problema di dover progettare un'interna trasmissione e accoppiamento con motore, come nel caso della catena; sarebbe rimasto il pericolo della proiezione di pezzi in caso di rottura, seppur meno grave; anche la cinghia dentata avrebbe richiesto una struttura appositamente progettata per reggere la sua tensione di precarico, ma si sarebbe perso il vantaggio della portanza del carico del simulatore-drone, per cui si sarebbe dovuto prevedere una rotaia o un supporto analogo per risolvere questo aspetto.

Il sistema di attuazione scelto, che condensa efficacemente i vantaggi della trasmissione a cinghia dentata e ne limita gli svantaggi, è il *modulo lineare*: si tratta di una trave scatola autoportante alle cui estremità sono presenti le pulegge dentate, la cinghia è completamente racchiusa all'interno di questa trave e non presenta problemi di sicurezza, su una faccia di questo corpo viene ricavata una rotaia, sulla quale può scorrere un carrello dotato di rotelle e rigidamente collegato alla cinghia di trasmissione; in questo tipo di soluzione, il precarico della cinghia sollecita solo il modulo lineare stesso e non una struttura esterna alla quale viene assicurato. Questo attuatore è molto diffuso commercialmente e viene venduto con lunghezze tagliate su misura, anche di parecchi metri; solitamente i costruttori dispongono anche di trasmissione e motori idonei al funzionamento del modulo lineare, il quale deve solo essere accoppiato a queste parti accessorie per svolgere il suo lavoro.

In fig. 44 è raffigurato un disegno del modulo lineare scelto: si tratta del modello MLF-52-260-EE-ZR prodotto da *Schaeffler*: questa azienda ha collaborato alla fase di progettazione e alla scelta di questi componenti.

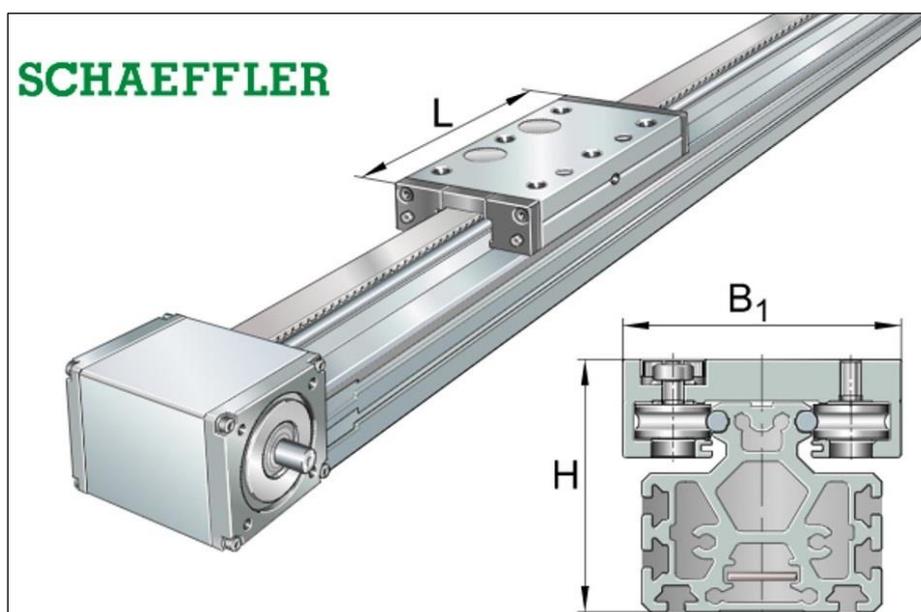


Fig. 44. Modulo lineare Schaeffler MLF-52-260-EE-ZR da [12]

Secondo i dati del catalogo [13], questo attuatore può funzionare fino a 8 m/s di velocità e con accelerazioni fino a 40 m/s²; ovviamente queste sono prestazioni dinamiche che il modulo può reggere, ma per arrivare ad ottenerle ci va un adeguato accoppiamento motore-carico. Questi dispositivi sono concepiti per applicazioni in ambiti industriali e per supporto ad altri macchinari: la capacità di carico del carrello è infatti molto alta rispetto all'impegno richiesto dal simulatore-drone, che ha una massa di soli 15 kg.

Il modulo lineare è stato dimensionato secondo le formule proposte dal catalogo [13]: per realizzare una corsa di 4500 mm il modulo deve essere lungo 5173 mm e pesare 71,3 kg; la massima deformazione elastica si verifica quando il simulatore-drone è esattamente al centro della campata, dove si crea una freccia nell'ordine dei 2,5 mm.

Il gruppo motore e trasmissione è stato selezionato con l'aiuto dell'ufficio tecnico della *Schaeffler*, la quale non produce direttamente questi componenti ma li commercializza come accessori. I componenti consigliati sono garantiti per prestazioni inferiori ai limiti di sopportazione del modulo lineare: nella fattispecie consentono di raggiungere una velocità massima di circa 5 m/s, con accelerazioni nell'ordine di 20 m/s² e con un'altezza del baricentro del carico fino a 100 mm rispetto al piano del carrello; è stato fatto presente che gli accessori commercializzati dall'azienda non possono garantire prestazioni superiori a queste, ma occorre progettare una moto-trasmissione specifica per avere dinamiche più alte, che comunque il modulo lineare può sopportare.

In fig. 45 sono rappresentati dei disegni approssimativi dei componenti scelti: si tratta del giunto a soffietto KUP560-66-20H7/25H7, del suo alloggiamento e coprigiunto KGEH52-43200-MLF-ZR, del riduttore epicicloidale GETR-PLQE120-145-4 e del servomotore brushless MOT-MH145-45-08-SINCOS. Il catalogo [13] consiglia inoltre di utilizzare il servocontrollo digitale STUNG-CPX3S075 già predisposto per gestire questo tipo di attuatore.

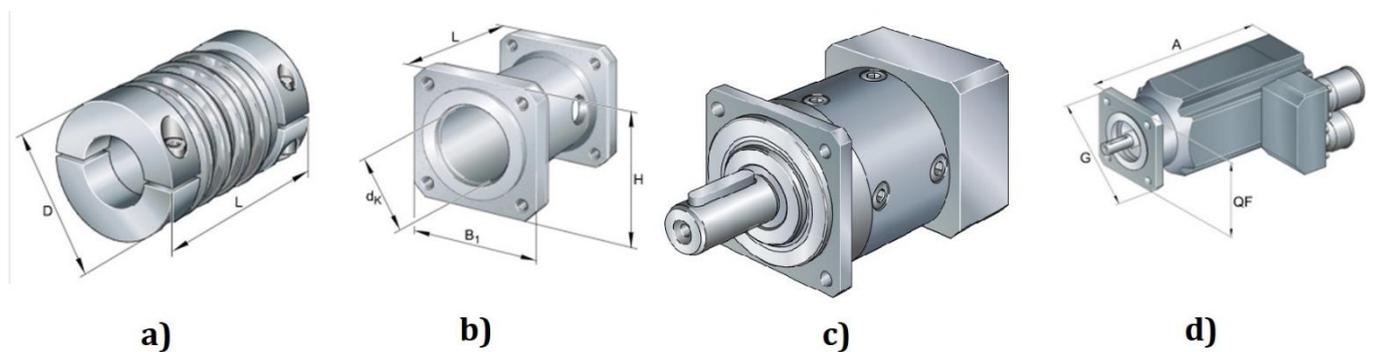


Fig. 45. Componenti accessori selezionati: a) giunto, b) alloggiamento, c) riduttore, d) servomotore. Le varie figure non hanno la stessa scala e sono rappresentate approssimativamente i componenti scelti [12]

L'intero sistema di attuazione può realizzare velocità e accelerazioni molto alte in uno spazio tutto sommato limitato: appare indispensabile poter gestire efficacemente questo dispositivo, sia per la precisione di svolgimento delle prove sperimentali sia per la stessa sicurezza di funzionamento del banco prova. A tal proposito, l'attuatore deve essere sensorizzato e controllato adeguatamente: sul servomotore è presente un encoder che assolve a questo compito e, grazie alla relazione cinematica esatta dovuta alla cinghia dentata, è possibile risalire alla posizione e alla velocità del carrello del modulo lineare.

In tab. 8 sono state riassunte le masse del sistema di attuazione che gravano sul banco prova; il modulo di controllo non è considerato nei calcoli perché può stare a terra ed essere collegato al servomotore tramite appositi cavi. Si nota che l'insieme di asse orizzontale motorizzato e simulatore-drone raggiunge una massa totale considerevole, circa 107 kg.

Modulo lineare (corsa 4,5 m)	Giunto	Alloggiamento (stimato)	Riduttore	Servomotore	Totale
71,3	0,6	1,0	7,6	12	92,5

Tab. 8. Masse in kg dei componenti dell'asse motore orizzontale

Parallelamente alla scelta dei componenti dell'asse orizzontale motorizzato, sono stati selezionati gli elementi che permettono la regolazione dell'altezza di questo asse.

Inizialmente, si è pensato che i componenti adatti per questo ruolo fossero delle guide lineari installate sui quattro montanti verticali, unite a due a due da traverse orizzontali sulle quali fissare l'asse orizzontale, come visibile nelle fig. 42 e fig. 43. Successivamente questa idea è stata confermata ed è stata selezionata una guida a ricircolo di sfere prodotta da *Schaeffler*, si tratta del modello KUV15-B, rappresentato in fig. 46.

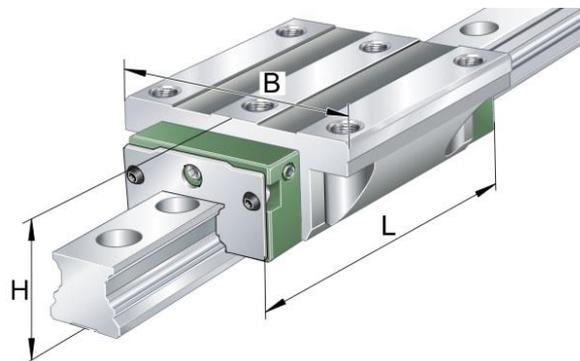


Fig. 46. Guida lineare a ricircolo di sfere Schaeffler KUV15-B [12]

Questo sistema di guida possiede un'alta capacità di carico, molta più di quanta ne venga usata nel banco prova progettato, ed è adatto a traslazioni a basse velocità, come in questo caso dove lo spostamento avviene manualmente. Sia queste guide che il modulo lineare, richiedono semplici lubrificazioni manuali periodiche in caso di utilizzo saltuario.

Per ragioni di semplicità e praticità, si è inizialmente pensato di spostare tutto il gruppo asse orizzontale motorizzato e simulatore-drone manualmente, fissandolo di volta in volta ad una quota preferita con l'utilizzo di arresti manuali; in fig. 47 è raffigurato uno di questi dispositivi, universali per tutti i tipi di rotaia di queste guide; nel banco prova bisognerebbe utilizzarne quattro, uno per ogni guida lineare.



Fig. 47. Arresti manuali universali: a sx il dispositivo, a dx un esempio di utilizzo [14]

Questi arresti mediamente possono reggere forze molto grandi, nell'ordine di circa 2 kN, ma non c'è sicurezza sulla forza di arresto che possono esprimere nel caso di guida lubrificata. Dal punto di vista teorico il banco prova potrebbe funzionare con questi dispositivi, ma non è agevole posizionare una struttura di circa un quintale, a due o tre metri da terra, in modo completamente manuale; questa operazione comporta anche grossi rischi per la sicurezza di chi opera gli spostamenti e occorre utilizzare componenti garantiti per questa situazione con carichi sospesi.

Bisognerebbe valutare l'utilizzo di un sistema attuato, con aggravio di complessità e costi economici, oppure si dovrebbe pensare a impiegare a semplici dispositivi meccanici, quali contrappesi che bilancino l'enorme carico e cavi per effettuare i posizionamenti da terra, in un luogo meno pericoloso.

Un problema emerso dal disegno del banco prova, che bisogna superare in fase di costruzione, è quello dell'installazione del modulo lineare dal lato del gruppo motore-trasmissione: in fig. 48 si possono notare le guide lineari schematizzate, la traversa orizzontale, che deve reggere l'asse orizzontale motorizzato, e il gruppo motore-trasmissione. Quest'ultimo deve essere montato geometricamente coassiale alla puleggia contenuta nell'estremità del modulo lineare, per ovvi motivi legati al perfetto funzionamento: infatti il costruttore prevede che tutto il sistema di moto-trasmissione sia autoportante, rimanendo agganciato a sbalzo sul fianco del modulo lineare, tramite l'alloggiamento del giunto. Se si installasse il gruppo appoggiando il motore (il corpo più pesante) alla traversa orizzontale, il modulo lineare verrebbe a trovarsi staccato dalla traversa e privato di appoggio; ovviamente questo non è solamente un problema di rappresentazione grafica (nei disegni i corpi sono rappresentati in maniera semplificata solo attraverso i loro ingombri), ma è un problema che emerge osservando i disegni originali del produttore. In fase di costruzione occorre perciò garantire un buon appoggio al modulo lineare per evitare problemi di stabilità e deformazioni della struttura.

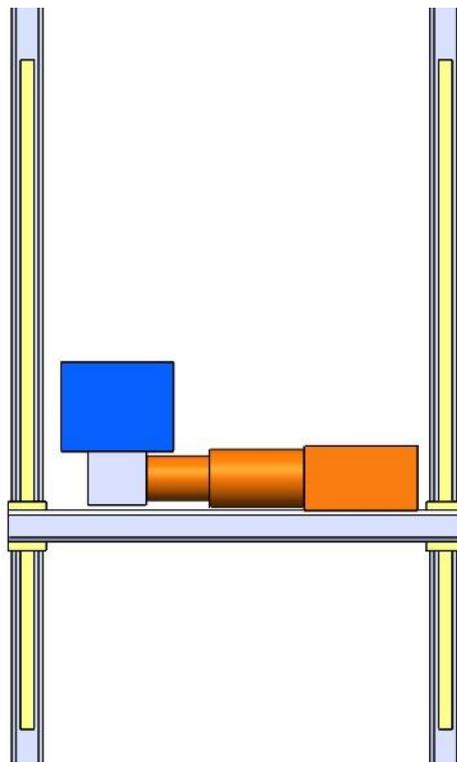


Fig. 48. Dettaglio di una sezione della struttura del simulatore-drone

5.4 Simulazione del vigneto

Come accennato all'inizio del capitolo, il simulatore-vigneto riveste un ruolo molto importante ai fini della valutazione della qualità delle irrorazioni effettuate.

Nella presente progettazione, questa parte di banco è stata concepita come due corpi indipendenti che simulano i filari, posizionati alla stessa distanza dell'interfila del vigneto di riferimento. Questi corpi mantengono le stesse dimensioni dei filari reali, concedendosi solo alcune piccole semplificazioni.

In fig. 49 è illustrato il disegno di una possibile ipotesi di costruzione del simulatore-vigneto, per quanto riguarda uno solo dei due filari: in questo caso si prevede un'unica campata di lunghezza pari alla porzione di filare originale (4 m), sorretta da due strutture a forma di T capovolta; i due sostegni sono uniti da più telaietti rettangolari che formano piani paralleli, costituenti l'ossatura della chioma. L'altezza del parallelepipedo di ingombro della chioma è circa 120÷130 cm e la sua sommità ha una quota di due metri dal terreno, esattamente come avviene nel vigneto di riferimento.

La chioma potrebbe essere costituita da tre piani distanziati di circa 40 cm o da quattro piani distanziati di circa 30 cm (come da disegno di fig. 49); questi piani possono sorreggere delle foglie di plastica (vedi anche paragrafo 1.1) con applicati gli strumenti di rilevazione dell'irrorazione, ovverosia le cartine idrosensibili.

Per ostacolare il flusso di aria e gocce di liquido, che nel caso del banco prova è semplice acqua, in modo da rendere più realistica l'irrorazione aggiungendo ostacoli artificiali, si potrebbe pensare di realizzare una copertura con pannelli di tamponamento (rappresentata parzialmente in fig. 49) con alcune aperture; oppure si potrebbe usare una griglia molto fine che funga egualmente da filtro. Questa copertura potrebbe essere anche solo installata sulle facce sensibili all'irrorazione diretta, quella superiore e quella laterale interna al corridoio nel caso di irrorazione in asse con l'andana o affiancata al filare, a cui si dovrebbe aggiungere anche la faccia laterale esterna nel caso di irrorazione in asse con il filare.

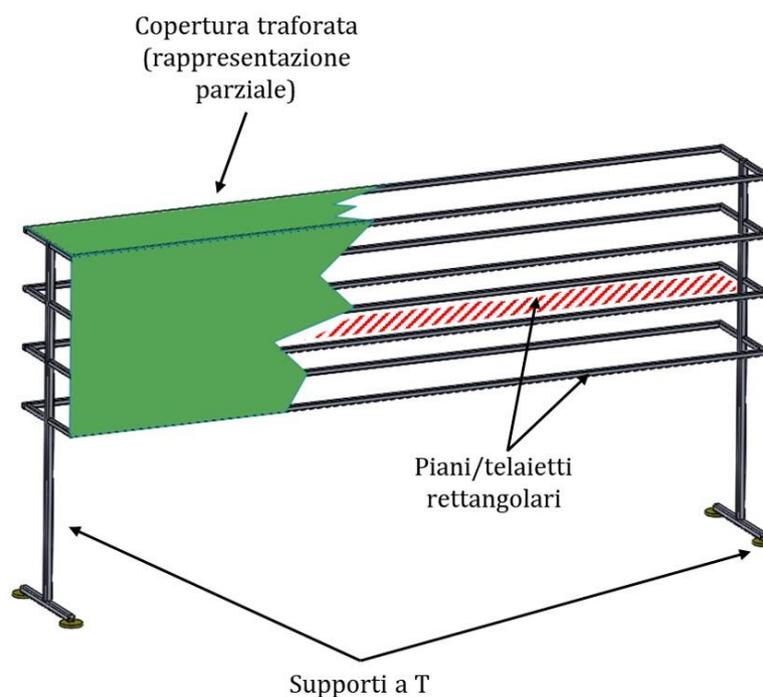


Fig. 49. *Ipotesi di costruzione di simulatore-vigneto (un filare solo)*

L'obiettivo delle prove sperimentali è misurare quantitativamente e qualitativamente la deposizione sulle foglie (ovvero le loro simulatrici) del liquido irrorato: per semplicità e per evitare rischi inutili, in laboratorio si conducono prove con acqua, in quanto si ritiene che abbia lo stesso comportamento della miscela fitoiatrica.

Attualmente vengono impiegati diversi metodi per rilevare la deposizione di spray, i più noti sono: i traccianti fluorescenti, che vengono disciolti nell'acqua e spruzzati, poi successivamente sono rivelati da apposite lampade in un contesto buio; esistono anche traccianti in polvere, sempre miscelati all'acqua e spruzzati, diventano nuovamente visibili sotto forma di polvere una volta che la superficie irrorata si asciuga; le cartine idrosensibili, che sono superfici reattive che virano di colore se raggiunte da acqua.

Quest'ultimo metodo è quello usato nel banco prova perché è molto pratico e permette di compiere irrorazioni con semplice acqua: sono molto semplici da utilizzare, vengono posizionate sul bersaglio tramite graffette o fermagli (prestando attenzione a non toccarle con oggetti umidi e deporle in zone ben asciutte); esse subiscono un viraggio dal giallo al blu quando vengono in contatto con acqua, in questo modo è facile verificare la deposizione di gocce irrorate perché sulle cartine rimane una "fotografia" delle gocce che hanno impattato su quella superficie. È possibile analizzare microscopicamente le cartine utilizzate in una prova e risalire alle dimensioni delle gocce irrorate, correlate alle dimensioni delle aree di impatto.

6 Valutazione costi di costruzione del banco prova

Il banco prova progettato (visibile in fig. 38 e seguenti) è composto essenzialmente da due parti, il simulatore vigneto, costituito da due corpi-filari indipendenti, e il simulatore-drone sostenuto e movimentato da una sua apposita struttura.

In questo capitolo viene condotta un'analisi dei costi dei singoli componenti, per ogni parte del banco prova. I costi individuati hanno valore puramente indicativo e servono a fissare un riferimento per quei tali componenti. Ove possibile, i componenti sono associati a una pagina web che è sostanzialmente la fonte dell'informazione, tuttavia molti valori sono il risultato di arrotondamenti e di stime medie, condotti in modo intuitivo all'interno di gruppi di prodotti simili. Questa analisi non considera nel dettaglio i pezzi commerciali di largo uso, quali le viti o simili.

In tab. 9 è mostrato un prospetto riassuntivo dei costi di tutto il banco prova.

Voce	Costo (€)
Simulatore-vigneto (un filare)	1 370
Portale del simulatore-drone	2 400
Organi di movimento del simulatore-drone	10 520
Simulatore-drone	600
Totale (un filare)	14 890
Totale (simulatore-vigneto completo)	16 260

Tab. 9. Prospetto dei costi totali

6.1 Portale di supporto del simulatore-drone

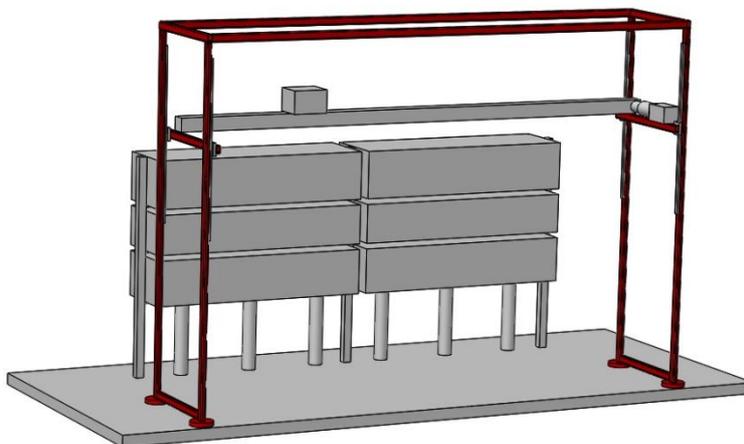


Fig. 50. Portale di supporto del simulatore-drone evidenziato

La struttura aerea che sorregge il simulatore-drone, concepita come un portale, potrebbe essere costruita con profilati di alluminio di grande sezione, dati i carichi e le dimensioni non banali.

In tab. 10 sono elencati i componenti di questa struttura, inclusi i piedini di appoggio a terra.

Componente	Costo unitario (€)	Quantità	Totale (€)	Riferimento	Note
piedini d'appoggio	20	4	80	link	-
tappi per piedini	4	4	16	link	-
profilati alluminio 80x80 mm	75	29,5 m	2 213	link	pezzi normalmente da 1 m, ma ordinabili fino a 6 m; il costo unitario è €/m
connettori e affini	6	15	90	link	quantità stimata
Totale			2 400		-

Tab. 10. Valutazione costi del portale di supporto del simulatore-drone

6.2 Organi di movimento della struttura del simulatore-drone

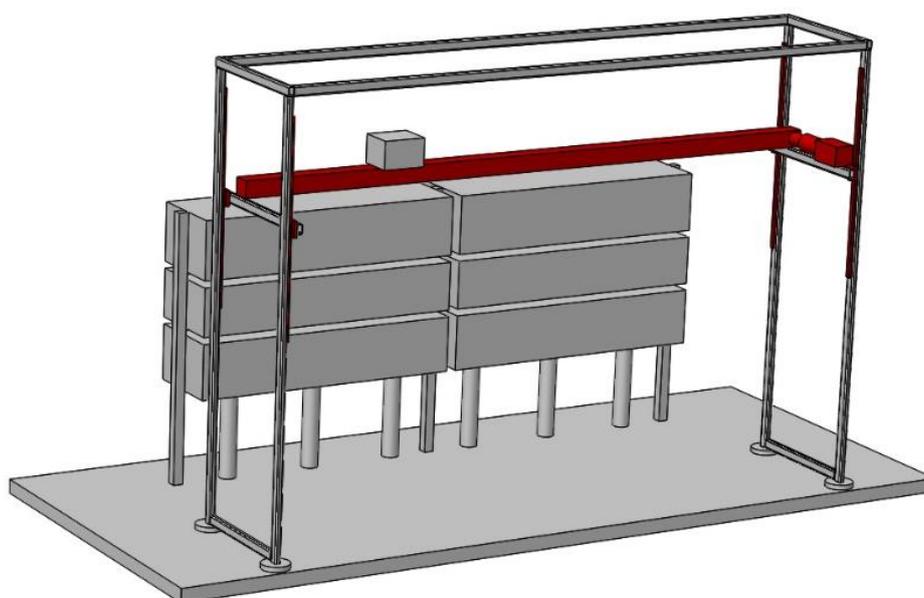


Fig. 51. Organi di movimento della struttura del simulatore-drone evidenziati

L'analisi dei costi di questa parte (tab. 11) è stata eseguita considerando le guide lineari bloccate da arresti manuali, anche se è noto che possano costituire una soluzione non

sufficientemente valida. Non è stato possibile trovare i costi dei componenti *Schaeffler* e si è contattata direttamente l'azienda, che ha fornito una stima molto generica dei costi.

Componente	Costo unitario (€)	Quantità	Totale (€)	Riferimento	Note
carrelli per guide	TOTALE		10 000	link	Informazione direttamente da <i>Schaeffler</i>
guide lineari (corsa 1500 mm)				link	
modulo lineare (corsa 4500 mm)				link	
giunto trasmissione				link	
alloggiamento giunto				link	
riduttore				link	
servomotore				link	
controllo motore				link	
arresti manuali	130	4	520	link	-
Totale			10 520		-

Tab. 11. Valutazione dei costi degli organi di movimento del simulatore-drone

6.3 Simulatore-drone

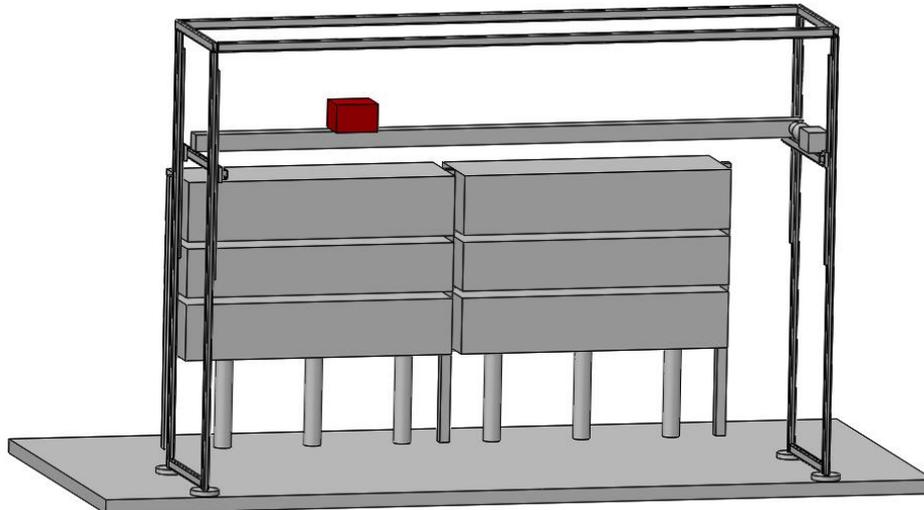


Fig. 52. Simulatore-drone evidenziato

Per la costruzione del simulatore-drone è stato ipotizzato il ricorso a profilati di alluminio, che possono realizzare un'intelaiatura per disporre i componenti nello spazio; è stato inoltre ipotizzato che la pompa e il serbatoio vengano fissati ad un'eventuale piastra (sempre in alluminio) di supporto, a sua volta collegata rigidamente con il carrello del modulo lineare.

Le ventole impiegate nella valutazione sono di dimensioni minori rispetto a quelle utilizzate nel computo del peso del simulatore-drone (tab. 7), in quanto non si disponeva dell'informazione del loro costo; sono state aggiunte due ventole per cercare di compensare questa differenza, in ogni caso queste quantità sono solo indicative, il numero di ventole andrebbe esaminato molto più accuratamente. La seguente tab. 12 riporta la stima dei costi per la realizzazione del circuito irroratore e del simulatore-drone in generale.

Componente	Costo unitario (€)	Quantità	Totale (€)	Riferimento	Note
pompa <i>Salvarani</i>	125	1	125	link	-
ugelli <i>TeeJet</i> TXA	6	4	24	link	considerando 4 ugelli (come DJI MG-1)
tubi idraulici	50	1	50	link	tubo venduto in rotolo di 25 m
serbatoio e accessori idraulica	50	1	50	link	stima
ventole simulazioni rotor e aggiuntive	40	6	240	link	modello con caratteristiche medie
profilati alluminio 30x30 mm	18	5 m	90	link	lunghezza stimata; il costo unitario è €/m
piastra di alluminio 5083 300x200x15 mm	18	1	18	link	base per assemblare componenti e attacco al modulo lineare
Totale			600		-

Tab. 12. Valutazione dei costi del simulatore-drone

6.4 Simulatore-vigneto

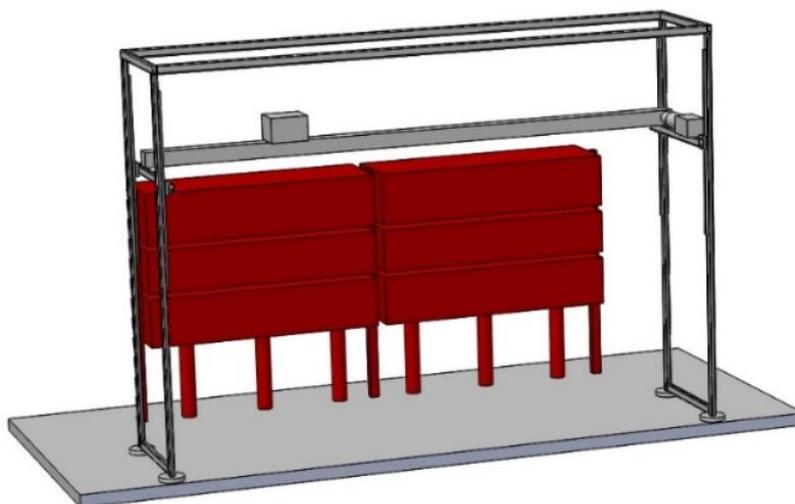


Fig. 53. Simulatore-vigneto (un filare) evidenziato

Questa valutazione dei costi si basa sull'ipotetica costruzione presentata al paragrafo 5.4. La tab. 13 riassume le voci di costo di un solo elemento-filare, esattamente come descritto nello stesso paragrafo; il secondo filare, che completa il simulatore-vigneto è semplicemente una copia del primo.

Componente	Costo unitario (€)	Quantità	Totale (€)	Riferimento	Note
profilati in alluminio 40x40 mm struttura	21	5,2 m	109,2	link	normalmente pezzi da 1 m, ma ordinabile fino a 6 m; il costo unitario è €/m
profilati in alluminio 30x30 mm piani	18	36,8 m	662,4	link	considerando quattro piani distanziati di circa 30 cm (9,2 m di perimetro per un piano); il costo unitario è €/m
pedini d'appoggio	20	4	80	link	-
tappi per pedini	4	4	16	link	-
connettori e affini	6	40	240	link	quantità stimata
pannelli tamponamento	6,9	28	193,2	link	Stima; fogli perforati, alluminio o plastica, da 500x500 mm (6÷7,5 m ² solo facce superiori e una laterale)
cartine idrosensibili 26x76 mm	40	1	40	link	confezioni da 50 pezzi
tubi di plastica Ø 4 mm, foglie e accessori	30	1	30	link	foglie di plastica stimate; tubo venduto in rotoli di 30 m
Totale			1 370		-

Tab. 13. Valutazione dei costi del simulatore-vigneto (un filare)

Conclusioni

Questa tesi ha riguardato lo studio di due ambiti importanti: gli attuali metodi di irrorazione di prodotti fitosanitari e l'utilizzo di droni agricoli: in particolare applicati nei vigneti. La ricerca effettuata è stata funzionale alla progettazione originale di un banco prova per simulare l'irrorazione di fitofarmaci in vigneto con drone.

La progettazione è stata focalizzata su due fronti: il primo, legato alla specificità dell'applicazione, ha riguardato il concepimento di un sistema di irrorazione, mantenendo come riferimento tecnico un drone irroratore commerciale (DJI MG-1) e servendosi della consulenza di figure esperte e di aziende produttrici di componenti per agricoltura; il secondo ha riguardato lo studio e il progetto di un banco prova da laboratorio, che potesse permettere di riprodurre al meglio il meccanismo di irrorazione di un drone in vigneto. L'attività di ricerca è stata conclusa con la valutazione dei costi di costruzione, legati a una particolare configurazione ipotetica del banco prova.

Il banco prova oggetto della tesi è molto importante, in quanto permette di eseguire delle prove sperimentali in laboratorio, per studiare e affinare l'uso di droni irroratori in vigneto. Questo tipo di applicazioni è oggi sempre più studiato e sviluppato, costituisce una nuova frontiera dell'agricoltura e può portare a indiscutibili vantaggi e maggior sostenibilità. Non bisogna tuttavia trascurare l'importante ruolo svolto dalle attuali macchine agricole, che sono sempre più evolute ed efficienti: gli agronomi esperti contattati hanno avvertito della possibilità che un drone irroratore, soprattutto se applicato a una coltivazione complessa come la pianta di vite, potrebbe non riuscire a coprire le necessità che si presentano nel corso di un'intera stagione vegetativa (anche le irroratrici attualmente impiegate non sempre riescono a garantire trattamenti soddisfacenti), per questo motivo è fondamentale concentrarsi sulle prove sperimentali e indagare a fondo le capacità che offre questa tecnologia.

Il progetto del banco prova è stato concepito in modo completamente originale ed è arrivato a definire le parti e la funzionalità del medesimo, pur senza arrivare a definire i minimi dettagli costruttivi. Il banco prova è stato pensato per avere grande flessibilità di utilizzo e poter imitare perfettamente le prestazioni del drone di riferimento.

Questa progettazione costituisce una fase preliminare per un futuro approfondimento e per la costruzione del banco prova. Il progetto è stato eseguito sotto l'ipotesi di mantenere le dimensioni originali del vigneto e del drone, senza operare dei cambiamenti di scala, che potrebbero compromettere la qualità dei risultati sperimentali ottenibili; si può tuttavia rimandare quest'operazione a ulteriori approfondimenti e sviluppi futuri, nell'ottica di una compattazione degli attuali ingombri, molto notevoli, e di un risparmio economico in fase di costruzione.

Il banco prova è stato progettato ricreando una porzione di vigneto, costituita da due filari, di cui sono state considerate due campate, e il corridoio che li separa: questa scelta è dovuta al fatto di isolare una possibile cella elementare del vigneto e ricreare su di essa le condizioni di irrorazione che si avrebbero con il drone irroratore, in una fase di funzionamento di regime. Si potrebbe valutare il fatto di impiegare come simulatore-vigneto solo un filare, estendendo all'altro i risultati ottenuti, grazie alla simmetria di cui gode questo sistema di coltivazione (attualmente è già previsto l'impiego di un solo simulatore di filare, nel caso di irrorazione condotta in asse con il filare stesso).

Un ultimo aspetto importante, che è stato rilevato nel corso di questa ricerca, riguarda la velocità di avanzamento della macchina irroratrice, ovvero del drone stesso: è noto da vari studi che le irrorazioni condotte con velocità alte peggiorino l'efficacia del trattamento, abbassando

la quantità di miscela fitoiatrica deposta sulle piante bersaglio o rendendo maggiormente disomogenea la deposizione tra diverse parti della pianta. Oltre a questi aspetti che andrebbero valutati in sede sperimentale, va sicuramente esaminata la prospettiva dei limiti tecnologici che accompagnano i droni in sé: a differenza dei macchinari terrestri, che dispongono di alte potenze e capacità, i droni incontrano sicuramente delle limitazioni, anche gravi, alla possibilità di distribuire una certa portata di miscela fitoiatrica e avere una sufficiente autonomia di durata del loro lavoro. A tal proposito, occorre indagare a fondo la possibilità di effettuare trattamenti a basse velocità, che potrebbero garantire rese ed efficienze molto più alte rispetto a quelli ad alta velocità. Un'analoga ricerca potrebbe essere effettuata nel progetto del banco prova: se dovessero essere giustificate prestazioni operative dei droni irroratori più modeste, si dovrebbe pensare ad adattare di conseguenza il banco prova, utilizzando tecnologie meno prestanti, più leggere e sicuramente più economiche.

Vantaggi e svantaggi dell'utilizzo di un drone irroratore

Lo studio del banco prova, sviluppato in questa tesi, discende dall'applicazione innovativa di droni irroratori nei vigneti: è perciò interessante riassumere quali aspetti positivi e negativi comporti l'adozione di queste macchine irroratrici innovative.

Tra i vantaggi di questa applicazione si possono annoverare i seguenti:

- una maggior sicurezza nelle operazioni di trattamento, in quanto gli operatori sono molto distanti dal punto di irrorazione e non utilizzano veicoli pesanti e impegnativi, che possono essere pericolosi se non si presta attenzione in certe condizioni;
- i droni possono compiere manovre in spazi molto ristretti, perciò si può pensare di sfruttare maggiormente il terreno, evitando di lasciare larghi spazi di manovra tra i filari;
- viene evitata la compattazione del suolo e tutti i problemi a essa legati, tipica dei mezzi pesanti terrestri;
- i droni, essendo aeromobili, raggiungono facilmente e rapidamente il luogo di lavoro, evitando schiacciamenti di piante e problemi legati al transito su terreni molto umidi;
- sono particolarmente adatti a vigneti su terreni difficili, ossia molto scoscesi e impervi, magari con coltivazioni a diversi livelli d'altezza;
- i droni possono condurre trattamenti mirati di alta precisione, evitando grosse dispersioni di prodotti dannosi per l'ambiente;
- se progettati e programmati adeguatamente possono compiere le operazioni in modo completamente autonomo, richiedendo l'intervento di operatori solo nelle situazioni particolari, come rifornimenti o aggiramento di ostacoli imprevisti.

D'altro canto, questi mezzi presentano anche delle caratteristiche svantaggiose rispetto alle attuali irroratrici terrestri:

- la loro capacità di carico è molto bassa, perciò, rispetto ai mezzi terrestri tradizionali, hanno scarsa autonomia di durata, sia dal punto di vista della miscela fitoiatrica trasportabile che da quello delle batterie di funzionamento del drone (nell'ipotesi che siano a motore elettrico), risultando poco efficienti nell'impiego su terreni vasti e pianeggianti;
- il loro costo è relativamente alto rispetto ai mezzi tradizionali impiegati;

- i droni, essendo effettivamente degli aeromobili, sono soggetti alle leggi riguardanti l'aviazione e devono essere maneggiati da personale adeguatamente specializzato, comportando delle spese più alte e la necessità di formazione specifica degli operatori;
- il loro stato tecnologico è piuttosto acerbo, quindi il loro utilizzo presenta comunque margini di inaffidabilità e incertezza rispetto ai sistemi tradizionali, molto maturi, largamente conosciuti e sperimentati.

Alla luce di queste considerazioni, soprattutto per l'ultimo punto, si rivela molto importante studiare a fondo e analizzare l'applicazione dei droni irroratori in vigneto, per migliorare l'affidabilità dei risultati e acquisire specifiche esperienze, esattamente lo scopo per cui viene realizzato il banco prova.

Bibliografia

- [1] M. Lazzari, A. Longoni, E. Beretta e S. Landonio, Distribuzione dei fitofarmaci: stato dell'arte e impiego di attrezzature intelligenti per il contenimento dei costi e il miglioramento della sostenibilità delle produzioni vitivinicole milanesi e lombarde, 2015.
- [2] T. J. Nieminen e M. Sampo, «Unmanned vehicle for agricultural and off-highway applications,» *SAE Transactions*, vol. 102, pp. 450-465, 1993.
- [3] B. Berner e J. Chojnacki, *Use of drones in crop protection*, 2017.
- [4] G. Capello, M. Biddoccu e S. Ferraris, «Effects of Tractor Passes on Hydrological and Soil Erosion Processes in Tilled and Grassed Vineyards,» *Water*, vol. 11, n. 2188, 2019.
- [5] S. Ahirwar, R. Swarnkar, S. Bhukya e G. Namwade, «Application of drone in agriculture,» *International journal of current microbiology and applied sciences*, vol. 8, n. 1, pp. 2500-2505, 2019.
- [6] J. Flynt, «5 best agricultural drones,» 14 Dicembre 2016. [Online]. Available: <https://3dinsider.com/agricultural-drones/>.
- [7] AGROFARMA, UNACOMA, *I componenti e i principi che regolano la polverizzazione della miscela fitoiatrica e il trasporto delle gocce verso il bersaglio*.
- [8] AA.VV., Guida per il corretto impiego dei prodotti fitosanitari, Veneto Agricoltura.
- [9] C. Ilker, D. Mehmet, A. Gurkan e K. Erdal, «Effect of air assistance on deposition distribution on spraying by tunnel-type electrostatic sprayer,» *African journal of agricultural research*, vol. 4, n. 12, pp. 1392-1397, 2009.
- [10] TeeJet Technologies, Catalogo 51A-IT, 2014.
- [11] [Online]. Available: salvarani.com.
- [12] [Online]. Available: <https://medias.schaeffler.com/medias/it>.
- [13] Schaeffler, Catalogo AL 1 - Driven linear units, agosto 2014.
- [14] [Online]. Available: norelem.com.
- [15] J. Deveau, Airblast 101 A handbook of best practices in airblast spaying.
- [16] [Online]. Available: spalautomotive.it.
- [17] [Online]. Available: <https://products.sanyodenki.com/en/sanace/>.
- [18] «MG-1 Scheda tecnica,» [Online]. Available: <https://www.dji.com/it/mg-1/info#specs>.

[19] [Online]. Available: abbadiserbo.it.

[20] [Online]. Available: asjnozzle.it.