

Progetto e sperimentazione di un robot irroratore per fitofarmaci in ambiente confinato

I. INTRODUZIONE

La robotica copre ormai svariati settori, compreso quello agricolo e florovivaistico, in cui i sistemi robotizzati si stanno diffondendo ampiamente, anche con applicazioni innovative e originali. La serra rappresenta un ecosistema particolare, dove la robotizzazione è richiesta su varie operazioni, quali la disinfezione del suolo, la semina, il trapianto, l'innesto, la difesa fitosanitaria, l'irrigazione, la fertirrigazione, la raccolta.

La meccanizzazione delle serre (Paice et al., 1995; Ade et al., 2000) è fortemente condizionata dalla singola coltura e dalla tipologia di serra usata. In particolare la distribuzione di fitofarmaco richiede un'automazione sicura ed ecocompatibile, al fine di preservare sia la salute dell'operatore sia l'ambiente esterno (Nuyttens et al., 2004; Paul et al., 1997). La tendenza verso la riduzione dei prodotti da impiegare nella difesa contro i parassiti e la contemporanea ricerca per assicurare comunque l'efficacia dei trattamenti, ha determinato importanti modifiche e nuove acquisizioni strumentali per la distribuzione di sostanze antiparassitarie.

Emerge, dunque, la necessità di utilizzare sistemi robotizzati in grado di ridurre le dosi impiegate, mantenendo inalterata l'efficacia della protezione antiparassitaria, consentendo una distribuzione precisa e sicura. Ciò significa non tanto ridurre la dose unitaria sulle parti da proteggere, bensì minimizzare le perdite e le dispersioni che si hanno nei trattamenti in ambiente aperto e su bersagli così complessi come la vegetazione (Bouse, 1994; Tian et al., 1999). In particolare occorre fare una netta distinzione tra l'irrorazione in campo e

* Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino

quella in serra. Infatti, nel primo caso, vi sono problematiche che sono assenti nel secondo, quali l'esigenza di coprire notevoli distanze e la presenza del vento che può disperdere il prodotto.

La determinazione delle specifiche di deposizione è indispensabile per avere uno specifico riferimento per le condizioni del trattamento. Il deposito rappresenta la dose unitaria (espressa in milligrammi/cm²) interagente con coltura e patogeni e che può anche influire sulla quantità dei residui ritrovabili nei prodotti (Matthews, 2000). Fra gli elementi determinanti nella efficacia del deposito i più importanti riguardano: la concentrazione; la densità di copertura; la dimensione delle gocce; l'uniformità di copertura.

L'attuale stato dell'arte garantisce in modo sommario la distribuzione dei fitofarmaci, utilizzando dei quantitativi elevati e presentando problemi di sicurezza e di inquinamento ambientale. Per migliorare il processo è in corso di sviluppo un nuovo sistema automatico per la distribuzione dei fitofarmaci, che consente di mettere a disposizione dei florovivaisti uno strumento per ridurre l'utilizzo dei prodotti fitosanitari e per accrescere la competitività nel rispetto dell'ambiente e della sicurezza degli operatori (Ebert et al., 2003; Gil et al., 2005; Maertens et al., 2005; Nuyttens et al., 2003; Belforte et al., 2009). Molti studi sono stati condotti su robot mobili utilizzabili in serra e in campo aperto, tutti dotati di bracci articolati per vari tipi di operazioni colturali e di sistemi di visione per la guida e per la manipolazione dei prodotti (Naoki et al., 1995; Piccarolo, 2008; Christensen et al., 2008; Singh et al., 2005; Mandow et al., 1996; Sammons et al., 2005; Kondo et al., 1996; Acaccia et al., 1998; Austerweil et al., 1997; Moltò et al., 2001).

In generale tutti questi studi hanno condotto alla realizzazione di robot dotati di sistemi di visione e di manipolatori per attuare varie operazioni in modo automatico.

L'efficacia di un trattamento è legata naturalmente sia alla tecnica di robotizzazione del sistema, sia alla scelta degli ugelli irroratori. In particolare la polverizzazione con ugelli a pressione ha evidenziato che gli ugelli più adatti sono quelli a fessura, distanziati di 30-35 cm sulla barra e con un angolo di 80° (Piccarolo, 2008). Questa soluzione si presta bene anche nel caso della polverizzazione centrifuga, che permette una notevole riduzione delle dosi di fitofarmaco.

Il presente lavoro si prefigge di presentare le prove sperimentali e la simulazione numerica che hanno permesso di affinare la generazione di gocce di miscela di acqua con fitofarmaco con diametro minore di 50 μ m. Tale nebbia, racchiusa in un opportuno volume confinato, raggiunge ogni punto della chioma della coltura interessata, in particolare piante e fiori, senza eccessive perdite di prodotto a terra e in aria (Belforte et al., in press).

Nel caso in esame si è voluto ovviare ad alcune problematiche legate, ad esempio, all'uso di irroratrici commerciali, quali la forte perdita di prodotto a terra e nell'ambiente circostante e l'esigenza da parte dell'operatore di vestire tuta e occhiali-guanti di protezione, pensando a una macchina automatica che in un ambiente confinato irrori i vasi di fiori. Sono quindi stati testati sperimentalmente vari modelli commerciali di ugelli atomizzatori, fino a individuare la configurazione e il modello più idoneo a creare una nebbia fine e uniforme, in grado di penetrare dentro la chioma delle piante.

La macchina è stata denominata DeVoPeS (Defined Volume Pesticide Sprayer), in quanto effettua velocemente un trattamento completo su fiori disposti a terra o su bancali, utilizzando una nebbia molto fine di fitofarmaco distribuito in un ambiente confinato.

2. GENERAZIONE DELLE GOCCE E LORO MISURA

Un ugello atomizzatore pneumatico è un componente adatto a produrre goccioline di liquido trascinato da una corrente d'aria, dotato di due ingressi, uno per l'aria compressa e l'altro per un liquido. Ne esistono varie tipologie, in funzione delle diverse applicazioni. Gli ugelli atomizzatori esaminati hanno al loro interno una camera di turbolenza che permette la frantumazione del liquido in gocce molto fini. La caratterizzazione di un ugello atomizzatore è importante per conoscere la distribuzione delle gocce della miscela e per applicarlo nel modo più corretto su vari campi di impiego. Le dimensioni sono, infatti, diverse a seconda della geometria e dei parametri di portata e di pressione imposti sui due fluidi in ingresso al componente. Tale caratterizzazione si effettua sempre per via sperimentale. I modelli numerici che simulano i getti prodotti dall'ugello atomizzatore sono invece utili per conoscere il volume irrorato, le traiettorie e le velocità delle gocce, ma non le loro dimensioni.

Nel campo dell'agricoltura, come si è detto, le dimensioni delle gocce sono molto importanti per una distribuzione efficiente di fitofarmaci che massimizzi la penetrazione nel bersaglio, minimizzi la contaminazione dell'ambiente e realizzi un efficace deposito (Matthews, 2000).

In generale gocce di maggiori dimensioni sono più adatte a utilizzi in campo aperto anziché in serra, in quanto sono meno disperse dal vento. Nel caso in esame, l'ugello atomizzatore viene studiato come generatore di gocce comprese tra 10 μm e 100 μm , utilizzando aria compressa come gas e acqua come liquido, senza aggiunta di nessun agente secondario in miscela. Questa scelta è stata fatta per effettuare le prove in modo semplice, tenendo conto del

fatto che la soluzione acquosa del fitofarmaco ha caratteristiche molto vicine a quelle dell'acqua.

Si ricorda anche che i principali fattori che influiscono sul movimento e sul comportamento delle gocce sono: la gravità, la resistenza aerodinamica, l'evaporazione.

3. METODI DI VALUTAZIONE

Per il controllo dell'efficienza dei dispositivi degli antiparassitari sono attualmente utilizzati diversi metodi, sostanzialmente classificabili come metodi quantitativi (analisi chimica del deposito su bersagli artificiali o naturali con traccianti di varia natura) e metodi indiretti (ad esempio l'analisi di immagini su cartine idrosensibili). Le cartine idrosensibili sono il metodo di misura delle gocce più diffuso, sono facili da utilizzare e forniscono una discreta base di verifica. Esse, per reazione chimica, cambiano il colore della superficie bagnata rispetto a quella asciutta, virando dal giallo al blu. Dalla semplice comparazione visiva della cartina che ha catturato lo spruzzo e di cartine di riferimento è possibile dare una valutazione veloce e semplice della distribuzione nelle diverse zone della vegetazione dove queste sono state poste. È importante ricordare che sulla cartina si rilevano gli impatti e di conseguenza il disco corrispondente alla goccia è ampliato dalla diffusione del liquido sul supporto: i diametri delle impronte (considerando queste di norma circolari) sono quindi superiori alle dimensioni reali delle gocce "libere".

4. ATTIVITÀ SPERIMENTALE

Dal punto di vista sperimentale, l'attività in laboratorio si è svolta effettuando ripetute prove di irrorazione su un apposito banco prova.

4.1 *Descrizione del Banco Prova*

Le prove sperimentali sono state condotte con il banco prova di figura 1. In esso un ugello atomizzatore pneumatico emette un getto di finissime gocce di acqua e irrori una o più foglie sospese a una certa distanza opportuna, analoga a quella che realmente intercorre tra ugello e pianta. A valle della foglia uno schermo di fondo simula il terreno.

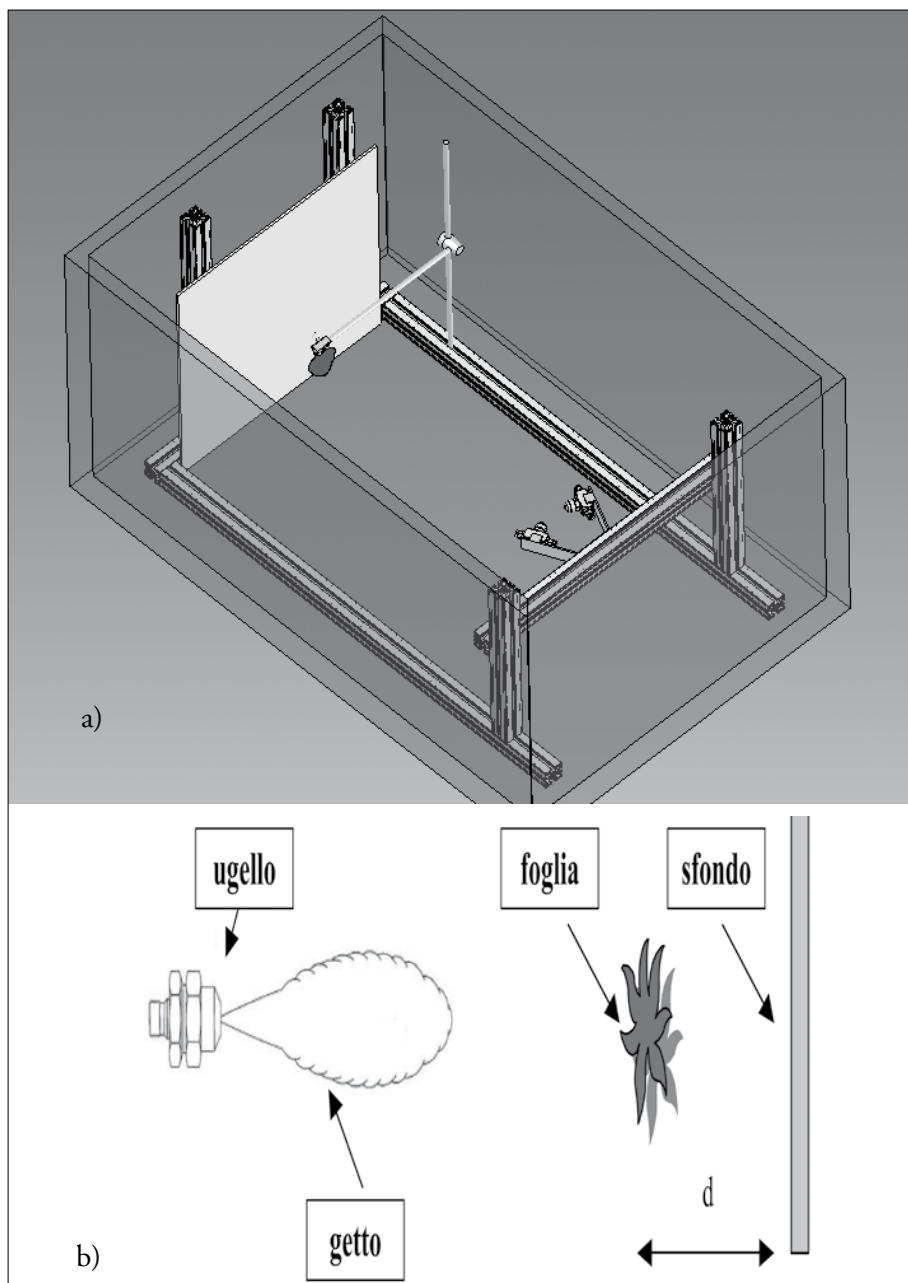


Fig. 1a e b Banco prova per la caratterizzazione degli ugelli atomizzatori

Le dimensioni del banco sono 1000 x 600 x 600 mm.

Utilizzando tale attrezzatura, è stato possibile effettuare prove variando i seguenti parametri: tipo di foglia (ciclamino, geranio, violetta); pressioni di alimentazione dell'ugello atomizzatore (0.5 bar acqua, 1.6 bar aria); tempi di esposizione della foglia al getto (5 – 10 s); materiale dello sfondo ricevente (metallo, linoleum, carta da pacchi, terriccio); distanza tra foglia e sfondo (12 – 18 – 24 mm); posizione del banco (orizzontale o verticale); presenza/assenza di getti di aria ausiliaria per trasportare le gocce alla foglia.

Gli ugelli atomizzatori esaminati sono illustrati in figura 2.

Essi comprendono due ingressi, l'uno per l'aria, l'altro per l'acqua, e un'uscita per la miscela. Lo scontro tra i due getti in pressione produce una polverizzazione del liquido creando all'uscita del componente una nebbia di particelle compresa tra 50 e 100 μ m. All'interno del componente tre fori a 120° emettono il gas, mentre un foro centrale ai precedenti tre emette il liquido (fig. 3).

Per ridurre ulteriormente le dimensioni delle gocce, sono stati montati due ugelli atomizzatori contrapposti, in modo da formare un angolo di 130° e favorire lo scontro tra i getti, producendo una polverizzazione ulteriore, fino a gocce di 10 μ m.

In particolare per evidenziare il prodotto irrorato sulla foglia è stato utilizzato anche un colorante solubile in acqua e in grado di diventare fluorescente sotto i raggi UV. La procedura di prova prevede: il settaggio e/o controllo delle pressioni di alimentazione degli ugelli atomizzatori; il posizionamento della foglia su un'asta di sostegno predisposta all'interno dell'ambiente confinato e alla distanza opportuna; l'apertura sincrona delle valvole di alimentazione di colorante e aria agli ugelli atomizzatori; il mantenimento del getto sulla foglia per il tempo di esposizione previsto; la chiusura della valvola di alimentazione dell'acqua e dell'aria; l'esposizione della foglia all'azione della nebbia; il prelievo della foglia; la rilevazione fotografica del deposito sulle due pagine della foglia esposta ai raggi UV; l'analisi e il confronto dei dati elaborati. In ogni prova, una singola foglia è stata introdotta nell'ambiente confinato, sospesa per il picciolo all'estremità di un'asta, in modo da risultare parallela alla superficie di rimbalzo e quindi sottoposta al getto degli ugelli atomizzatori.

Per l'analisi sulla foglia dopo il trattamento, la stessa è stata esposta all'azione dei raggi di una lampada UV che rende visibile la superficie raggiunta dal prodotto irrorato con una colorazione verde a fronte della colorazione viola delle zone non investite. Il risultato è stato acquisito con una fotografia in formato digitale per il successivo raffronto delle prove in relazione alle diverse condizioni operative.

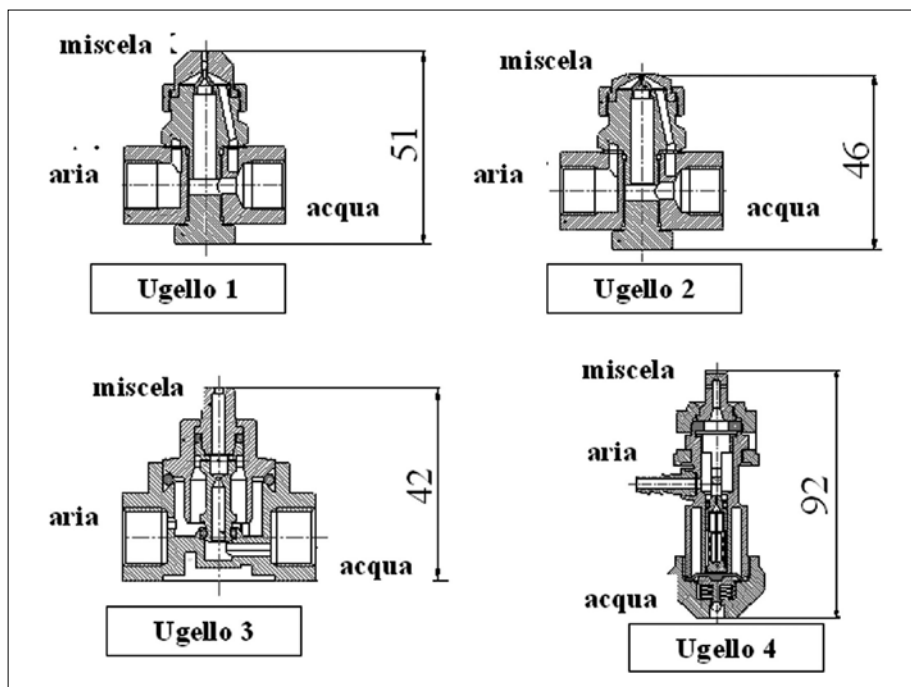


Fig. 2 Sezioni di vari ugelli atomizzatori con relativi passaggi aria-acqua-miscela

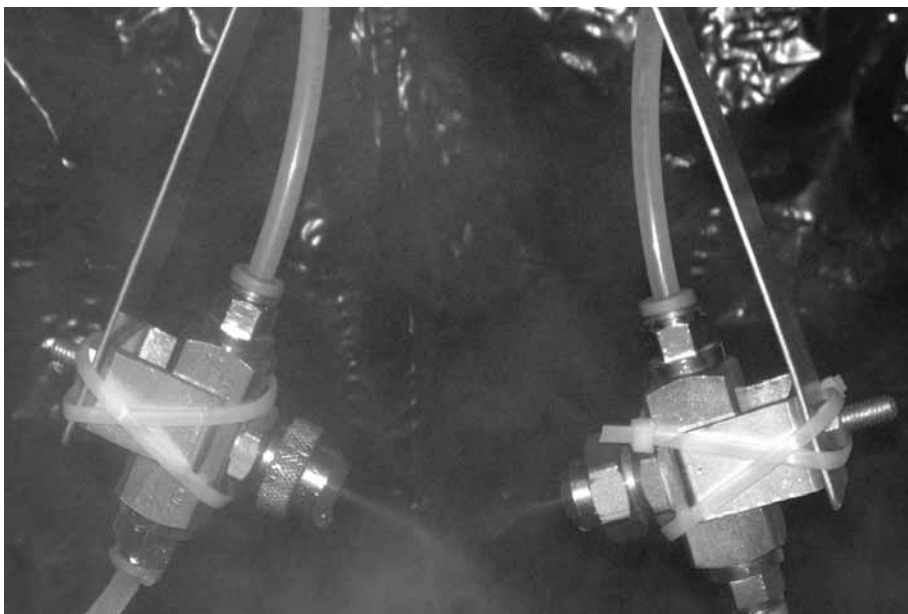


Fig. 3 Ugelli atomizzatori montati contrapposti (130°)

4.2 Foglie analizzate

La scelta delle piante è stata fatta in relazione a conformazione e consistenza della superficie fogliare: *foglia di superficie piana e oleosa* (cyclamen africano – ciclaminio); *foglia di superficie irregolare e liscia* (pelargonium domesticum – geranio); *foglia di superficie piana e vellutata* (saintpaulia jonantha – violetta). In figura 4 sono illustrati alcuni dei risultati ottenuti.

4.3 Natura del suolo

Si sono esaminati quattro tipologie di materiali che potrebbero trovare impiego come rivestimento dei bancali su cui sono appoggiati i vasi delle piante e che quindi influenzano il rimbalzo della nebbia: metallo (acciaio inox); lino-leum; carta da pacchi; terra.

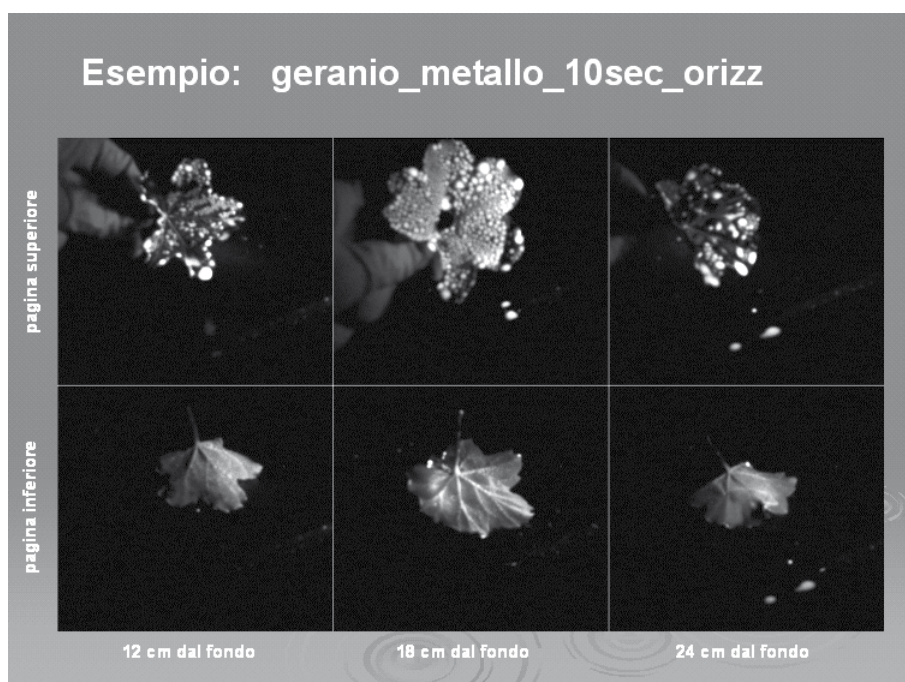


Fig. 4 Esempi di irrorazione con vari sfondi e diverse distanze (foglie di geranio, sfondo metallico, tempo di esposizione 10 s)

4.4 *Distanza dal suolo*

Si è fatta variare la distanza della foglia dalla superficie di rimbalzo, mantenendo costanti le posizioni degli ugelli atomizzatori e del suolo, per simulare le condizioni reali in cui può trovarsi una foglia sulla chioma della pianta: $h = 12 - 18 - 24$ cm.

4.5 *Tempo di esposizione*

Poiché una quantità eccessiva di fitofarmaco che resti a contatto con le foglie, ha effetti negativi sulla salute e sull'estetica della pianta (presenza di macchie, essiccamento), risulta necessario contenere l'irrorazione in un tempo adeguato a evitare ristagni e gocciolamento.

I tempi impostati sono stati: $t = 5 - 10$ s.

4.6 *Direzione del getto*

Le prove sono state eseguite con il getto dell'ugello atomizzatore in posizione: orizzontale; verticale, fornendo aria a 1.6 bar e acqua a 0.5 bar.

4.7 *Metodologie di prova*

L'obiettivo principale è quello di ottenere una deposizione omogenea e uniforme sulla pianta, in modo da massimizzare l'efficacia del trattamento fitosanitario e ridurre le perdite. La prima fase delle prove sperimentali è stata quella di valutare qualitativamente la deposizione tridimensionale della nebbia di fitofarmaco prodotta all'interno dell'ambiente confinato. A tal scopo sono state utilizzate cinque strutture ad albero, che hanno il compito di sorreggere delle cartine idrosensibili. Per rendere confrontabili le diverse prove, è stata assegnata una numerazione univoca sia agli alberi metallici sia alle cartine collocate su ciascuno di essi.

4.8 *Risultati sperimentali sull'analisi delle gocce*

Le prove sperimentali condotte con il banco sopra descritto sono state effettuate utilizzando sia le cartine idrosensibili sia del colorante per evidenziare l'irrorazione avvenuta sulle piante.

In figura 5 sono illustrati alcuni dei risultati ottimali ottenuti con gli ugelli atomizzatori in verticale all'interno del volume confinato pari a mezzo bancale.

Per una migliore analisi dei risultati è poi stato condotto inoltre uno studio statistico volto a evidenziare e analizzare le condizioni ottimali di prova. Il primo passo compiuto è stato quello di valutare qualitativamente e quantitativamente tutte le cartine idrosensibili a disposizione. È stata stabilita una scala di giudizi a ciascuno dei quali è stato, a sua volta, associato un numero e un colore. L'operazione consente, non solo di rendere semplici e immediati i confronti tra i risultati ottenuti, ma anche di realizzare una serie di istogrammi facilmente interpretabili con una semplice chiave cromatica.

La condizione migliore si ha con quattro ugelli atomizzatori l'ambiente si satura più velocemente e si riduce il numero di passate e il tempo necessario per il trattamento. Aumentano d'altro canto i consumi di aria e acqua data la presenza di un numero maggiore di ugelli atomizzatori.

Passando poi dalle strutture ad albero a piante vere, si complica notevolmente la geometria da trattare, con conseguente parziale riduzione dell'efficacia del trattamento eseguito. Con piante vere, infatti, due ugelli atomiz-

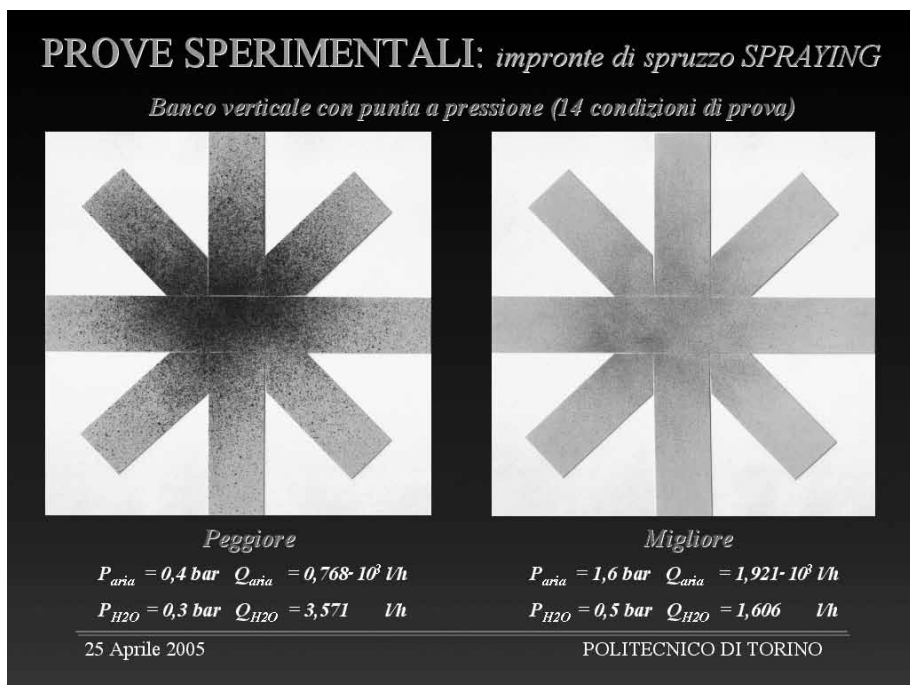


Fig. 5 Impronta di spruzzo di un ugello atomizzatore con banco verticale

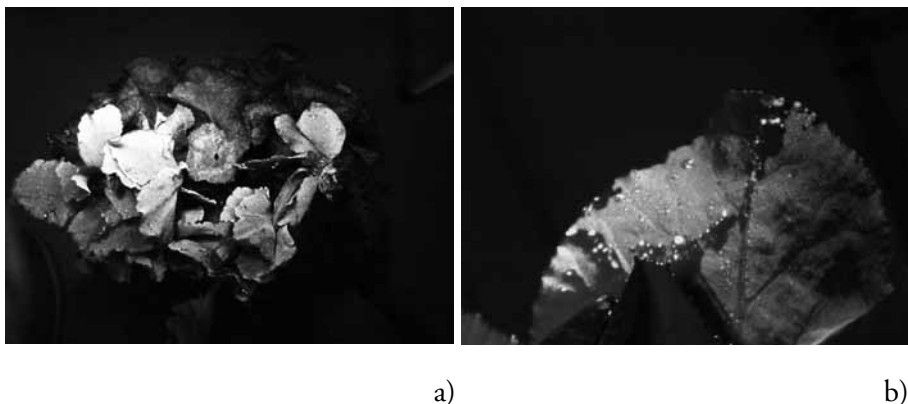


Fig. 6 a) Prova con colorante irrorato b) Particolare del sotto foglia

zatori non sono più sufficienti a garantire una buona deposizione in tutto l'ambiente. Con quattro ugelli atomizzatori, invece, anche nel caso di piante vere si ottengono risultati ottimali e tutte le piante mostrano una deposizione omogenea sia sul sopra sia sul sotto-foglia (fig. 6a e 6b).

5. SIMULAZIONE NUMERICA DELL'IRRORAZIONE DI UNA FOGLIA

Al fine di valutare l'efficacia dell'irrorazione sulle piante degli ugelli atomizzatori è stata anche effettuata una simulazione numerica che permettesse lo studio delle traiettorie delle gocce in prossimità di una singola foglia, tenendo conto della forza di gravità.

Si è costruita, dunque, una geometria assialsimmetrica (fig. 7) che riproduce in scala l'ugello atomizzatore, una foglia e un volume confinato circostante che rappresenta il volume della camera in cui effettuare il trattamento.

In tal modo è stato possibile sfruttare la simmetria del sistema per generare un modello equivalente che rappresenti solo metà struttura, riducendo i tempi di calcolo.

Quest'ultima è simulata con un disco rigido di raggio 20 mm, posto frontalmente al getto, a una distanza di 280 mm. Le simulazioni sono state condotte impostando all'ingresso del sistema i valori di portata in massa e di pressione ricavati sperimentalmente dallo studio dell'ugello atomizzatore.

Tali valori sono rispettivamente 0.00018 kg/s e 1.6 bar per l'aria, 0.00066 kg/s e 0.5 bar per l'acqua, temperatura 300 K, flusso stazionario.

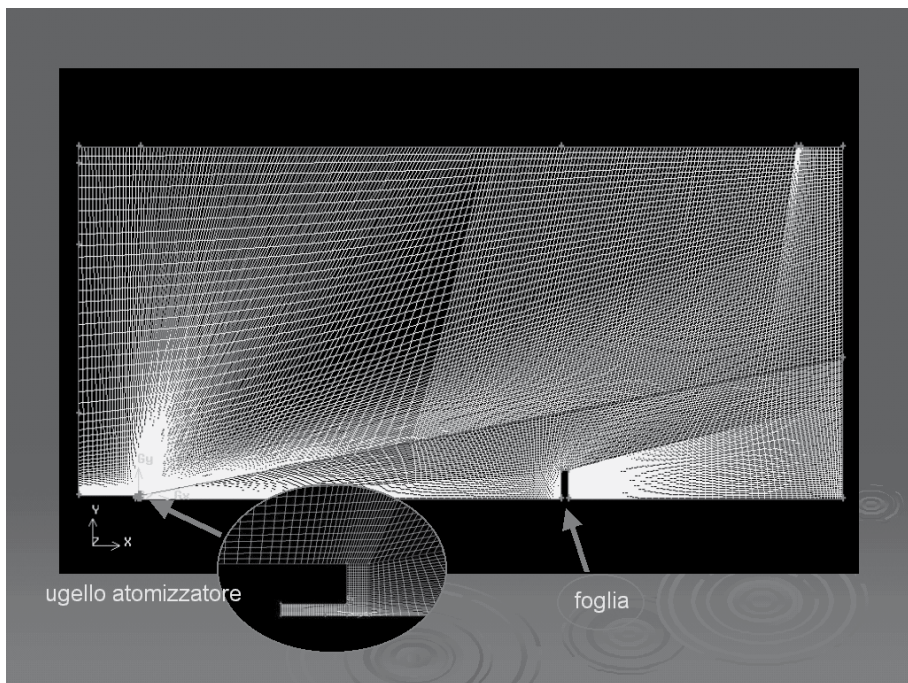


Fig. 7 Mesh per la simulazione numerica dell'irrorazione di una foglia

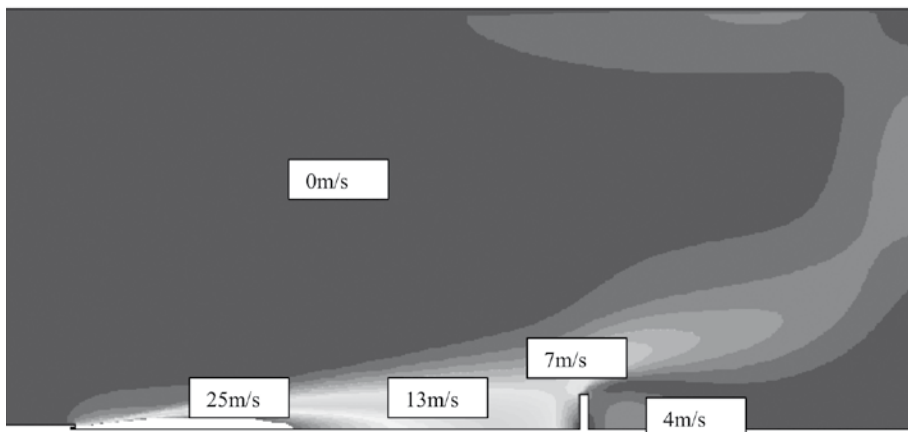


Fig. 8 Velocità delle gocce in prossimità di una foglia, con miscela bifasica (acqua-aria)

Il sistema può essere movimentato sopra i bancali tramite un robot cartesiano.

Il volume confinato ha dimensioni in pianta di 0.9 x 0.9 m, per coprire un'area di poco inferiore al mezzo bancale (1.5 x 1.5 m) (fig. 9a).

Il peso del prototipo non supera i 120 N. La collocazione di DeVPeS (isolatore) nell'area di lavoro del robot è illustrata in figura 9b.

DeVPeS è perfettamente isolato rispetto all'esterno, per evitare fughe di fitofarmaci, grazie a un attento studio sul tessuto di copertura. Si prevede, infatti, la presenza di operatori non protetti nella serra durante i trattamenti.

6.2 Descrizione di DeVPeS

Nel disegno schematico riportato in figura 10a sono visibili: il robot cartesiano a portale (1); l'asse di traslazione verticale (2); il bancale per le colture (3); DeVPeS (4); i tubi corrugati (5), utilizzati per la movimentazione delle pareti laterali della tenda; le tenute inferiori (6).

Come visibile più in dettaglio in figura 10b, DeVPeS è costituito dai seguenti elementi.

- Un codolo (1) per l'aggancio alla pinza pneumatica montata sull'asse di movimentazione verticale del robot.
- Una struttura a dimensione variabile per delimitare l'ambiente da trattare coi fitofarmaci. Tale struttura comprende: un telo di copertura (non rappresentato in figura), con camere gonfiabili e tubi corrugati per la movimentazione pneumatica delle pareti laterali; un sistema a pantografo (2) per la movimentazione pneumatica del telo di copertura; una piastra fissa (3), una piastra mobile (4) e un cilindro pneumatico doppio effetto (5) per la movimentazione automatica del pantografo; delle protezioni (8) per evitare che il telo represso si impigli negli ugelli atomizzatori.
- Un sistema di irrorazione che comprende due coppie di ugelli atomizzatori a cono pieno (6), montati a 130° gli uni rispetto gli altri (fig. 3), su una barra che li muove orizzontalmente grazie a un cilindro pneumatico senza stelo (7).
- Un sistema del vuoto per aspirare e recuperare il fitofarmaco non depositato sulle piante a seguito del trattamento (non visibile in figura).

In figura 11a e b sono illustrate due viste del prototipo in esame, con relative quote di ingombro.

Lungo i bordi orizzontali inferiori sono presenti camere pneumatiche gonfiabili, usate per fare una tenuta sul limite inferiore del volume confinato. Sono

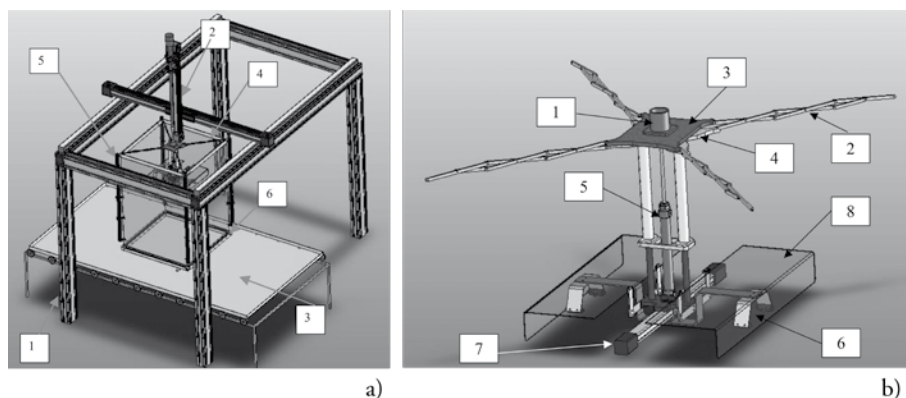


Fig. 10 a) DeVoPeS montato su un manipolatore cartesiano b) Particolari costruttivi di DeVoPeS

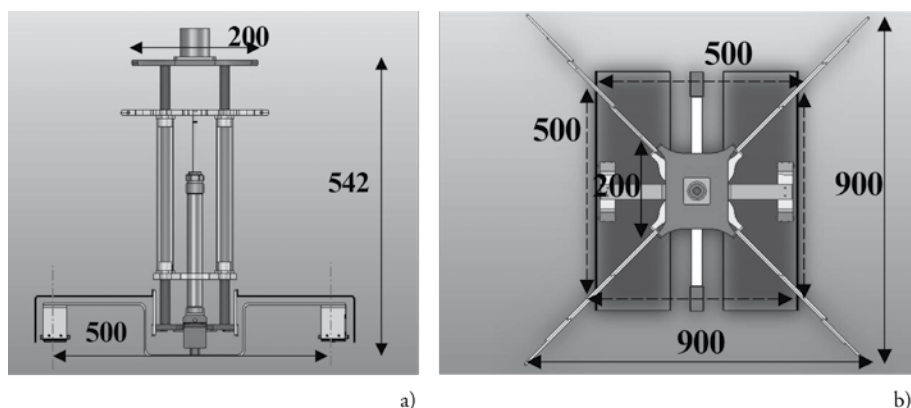


Fig. 11 Particolari e alcune quote di DeVoPeS

anche stati usati dei tubi corrugati sugli spigoli verticali della camera, che vengono collegati a una sorgente di vuoto per richiudere la camera, quando il robot di movimentazione la sposta da una posizione di lavoro alla successiva. Le varie parti di DeVoPeS sono quindi: *un sistema retraibile di copertura; un sistema di spruzzo e irrorazione del fitofarmaco; un sistema di recupero del fitofarmaco; un sistema di tenute inferiori per garantire l'ermeticità del sistema.*

a) Sistema di copertura

Per realizzare la tenda di copertura di DeVoPeS è stata usata una stoffa del tipo poliestere trilaminato, confezionata tramite cuciture nastrate impermeabili all'acqua e all'aria.

b) Sistema di spruzzo

Sono state fatte varie analisi e numerose prove sperimentali in base a quanto descritto in precedenza, per valutare in modo completo le condizioni di irrorazione del fitofarmaco. Nelle figure 12-13-14 sono riportati sia la percentuale dimensionale delle gocce generate, sia alcuni dei risultati ottenuti con DeVoPeS con cartine idrosensibili e con colorante.

c) Sistema di recupero del fitofarmaco

Per separare l'aria aspirata dal fitofarmaco, è stato necessario studiare vari tipi di separatori aria-liquido e vari eiettori. In particolare sono stati valutati tre tipi di separatori aria-liquido: *separatori di condensa che basano il loro funzionamento sulla forza centrifuga*; *separatori di gocce a lamelle*; *filtri a coalescenza*. Per prima cosa si è dovuto ricreare l'ambiente confinato: per fare questo è stato utilizzato un cassone in plastica, al cui all'interno sono stati montati gli ugelli atomizzatori. La struttura del cassone ci permette anche di contenere l'acqua reflua dal trattamento. Infatti, per evidenti motivi di costo e praticità, verrà utilizzata acqua e non fitofarmaco per eseguire le prove.

Il bersaglio in questo caso è una lastra di alluminio su cui vengono incollate le cartine idrosensibili, con cui si valuterà, in base alla tonalità di colore assunta dalla carta, se il filtro lavora bene oppure se non vi è stato recupero di liquido.

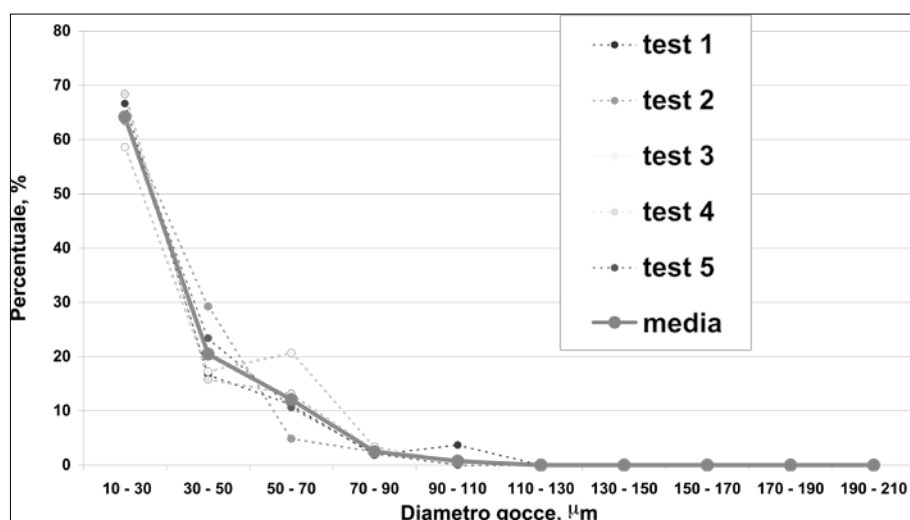


Fig. 12 Dimensioni percentuali delle gocce in DeVoPeS



Fig. 13 Prove sperimentali di spruzzo con cartine idrosensibili ($h=0.8$ m; $p_A = 1.9$ bar; $p_W = 0.7$ bar; $t_1 = 14.8$ s; $t_2 = 18$ s; numero di passate = 2)

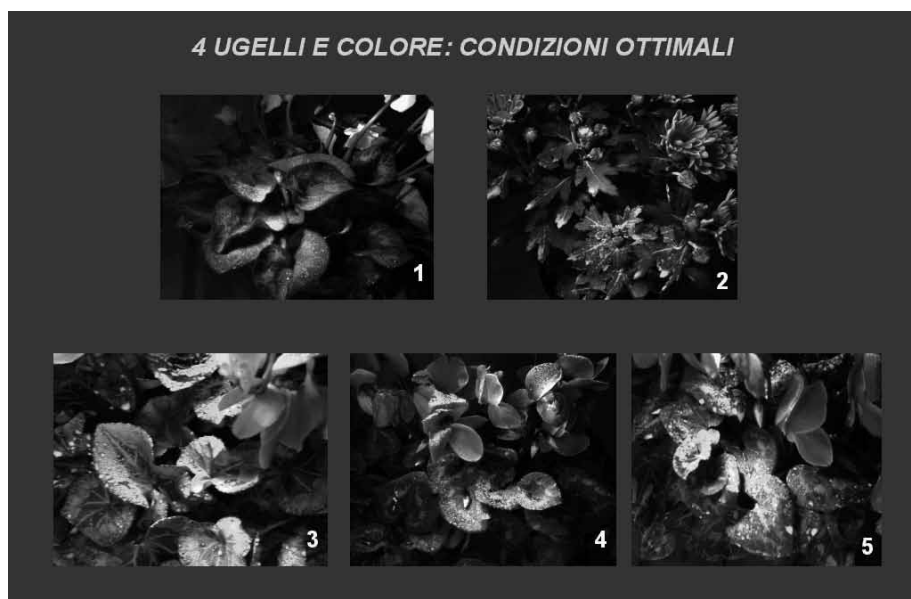


Fig. 14 Prove sperimentali di spruzzo con colorante fluorescente ($h=0.8$ m; $p_A = 1.9$ bar; $p_W = 0.7$ bar; $t_1 = 14.8$ s; $t_2 = 18$ s; numero di passate = 2)

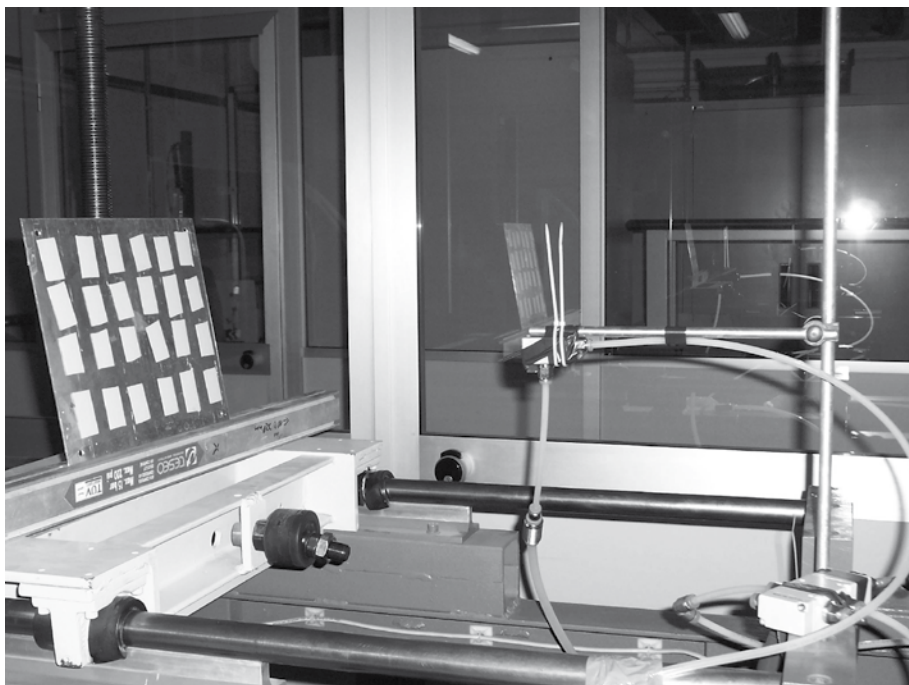


Fig. 15 Montaggio dell'eiettore e del bersaglio per prove sul recupero del fitofarmaco

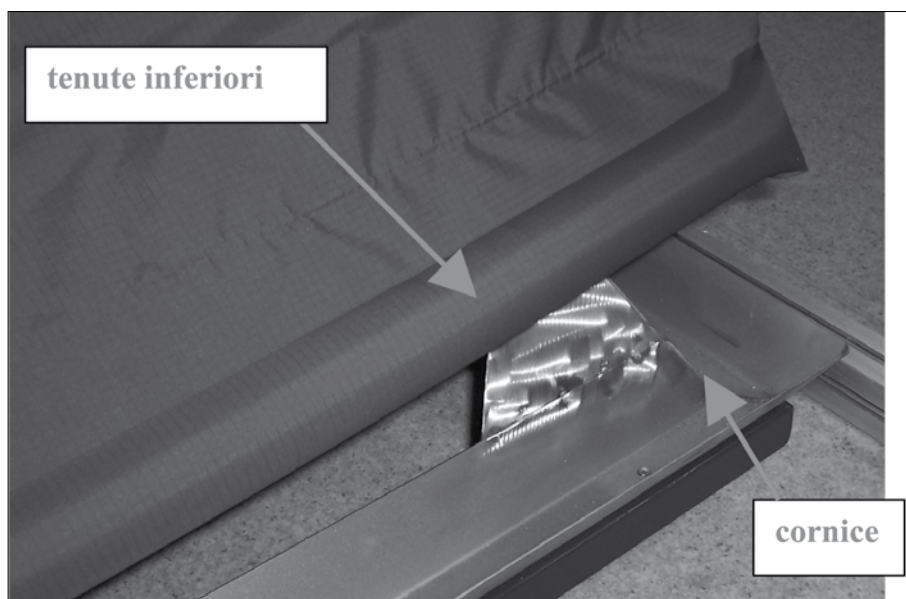


Fig. 16 Sistema di tenuta inferiore in DeVPeS

La figura 15 seguente mostra come vengono montati eiettore e relativo bersaglio. La distanza tra i due componenti è di 420 mm, scelta come ottimale dopo alcune prove preliminari. Sono inoltre stati provati vari tipi di eiettori con caratteristiche equivalenti di aspirazione ($Q_{asp}=700 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ a $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ di alimentazione).

d) Sistema di tenute inferiori per garantire l'ermeticità del sistema

Nell'attuale fase di sviluppo, la tenuta ermetica inferiore è realizzata tramite camere d'aria che si gonfiano all'interno di una cornice rigida collocata intorno ai fiori o, direttamente, in corrispondenza delle pareti dei pallet o dei bancali su cui sono posizionate le piante (fig. 16).

6.3 Ciclo di lavoro

Il ciclo di lavoro di DeVoPeS previsto è il seguente:

- posizionamento di DeVoPeS in corrispondenza della zona prevista per il trattamento;
- azionamento del cilindro del pantografo per estendere il telo di copertura;
- estensione dei tubi corrugati per l'abbassamento delle pareti laterali;
- messa in pressione delle camere pneumatiche gonfiabili superiori, per irrigidire, e inferiori, per irrigidire e per effettuare la tenuta;
- azionamento dell'aria e del fitofarmaco per alimentare gli ugelli atomizzatori;
- movimentazione degli ugelli atomizzatori tramite il cilindro senza stelo, per distribuire uniformemente il fitofarmaco sulle piante;
- chiusura degli ugelli atomizzatori al termine di un certo numero di passate sulle piante;
- arresto del cilindro senza stelo;
- azionamento del sistema di aspirazione della nebbia di fitofarmaco non depositata, con svuotamento delle camere di tenuta inferiori;
- contrazione dei tubi corrugati, per ritrarre le pareti laterali;
- chiusura del pantografo con conseguente messa a riposo del sistema o sua predisposizione per un altro ciclo su altre colture.

In figura 17 è illustrato il circuito pneumatico di comando che realizza quanto descritto e in figura 18 il flow-chart delle varie operazioni.

L'intero ciclo di lavoro è compiuto in meno di 1.5 minuti. La figura 19 illustra l'andamento dei consumi di aria in DeVoPeS all'interno di un ciclo di lavoro. Si nota che il consumo maggiore si ha a causa degli eiettori, che però

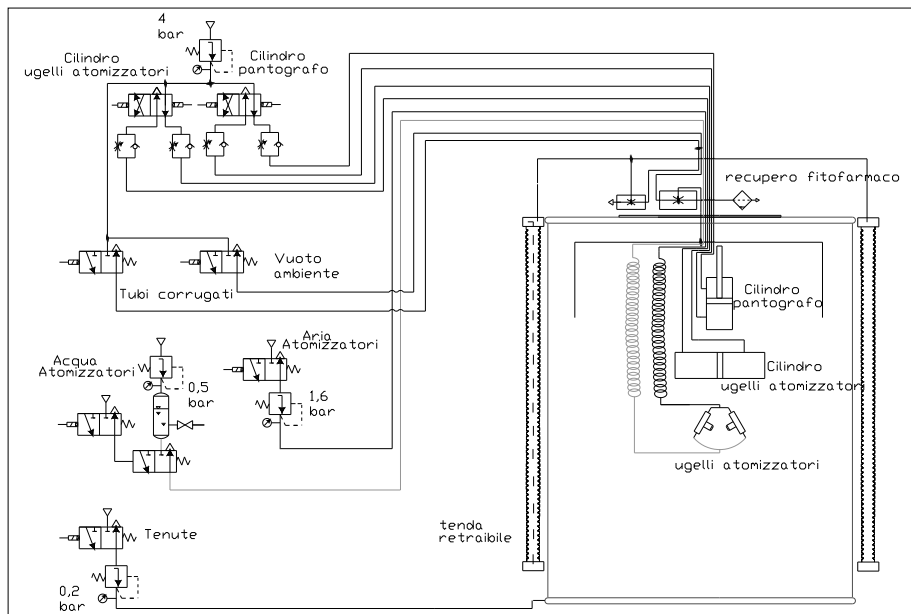


Fig. 17 Schema del circuito pneumatico di comando di DeVoPeS

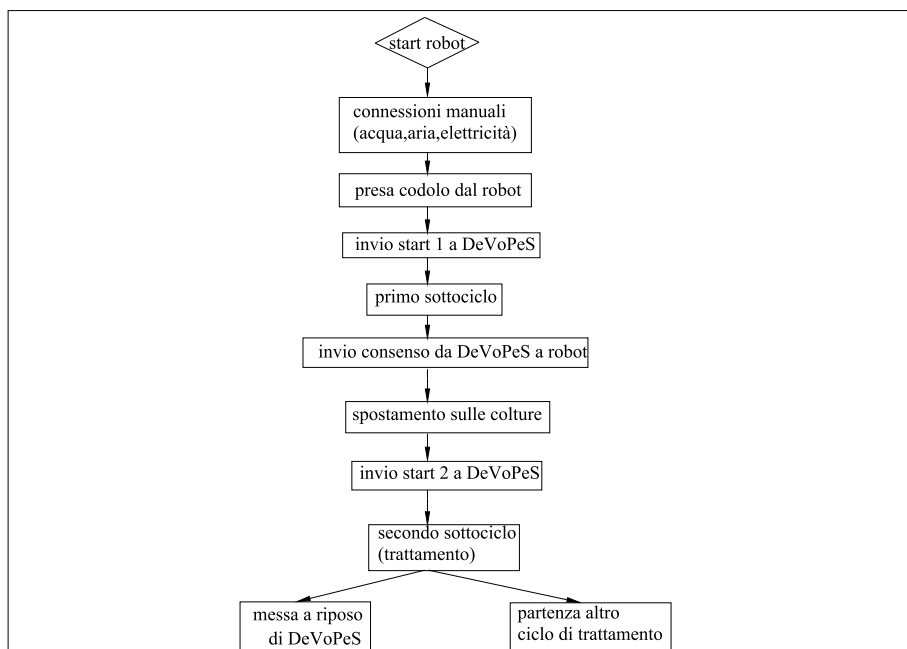


Fig. 18 Flow-chart di funzionamento di DeVoPeS connesso a un manipolatore cartesiano

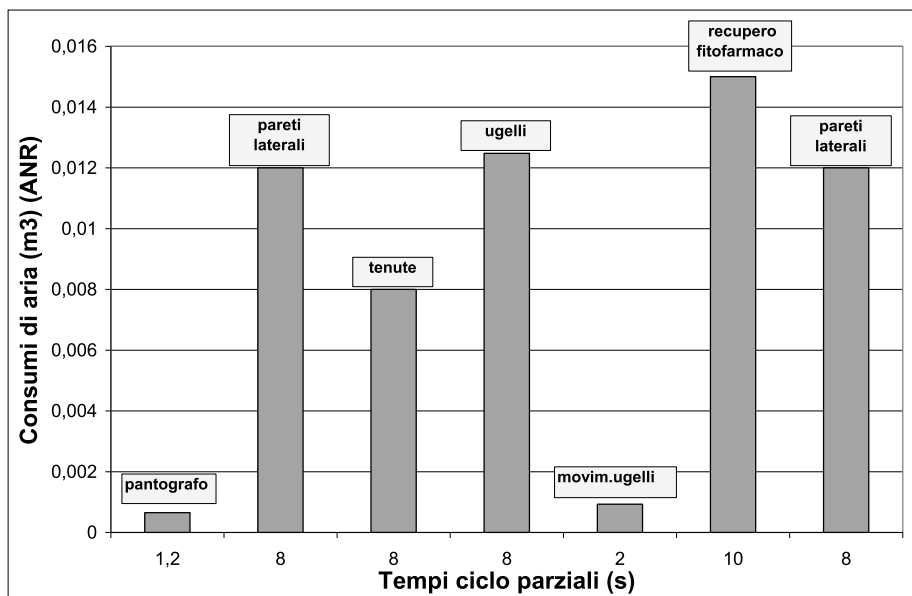


Fig. 19 Consumi totali di DeVoPeS

non funzionano mai contemporaneamente agli altri componenti. Tali eiettori generano un depressione di circa $-0.6 \cdot 10^5$ Pa quando alimentati a $4 \cdot 10^5$ Pa, nel qual caso la portata del getto primario è di circa $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ (ANR).

6.4 Dimensionamenti

DeVoPeS è stato progettato per lavorare con una pressione di ingresso di $4 \cdot 10^5$ Pa, pensando che in serra non sempre sono disponibili alte pressioni. Tutte le parti sono poi facilmente accessibili, smontabili e lavabili.

6.5 Sistema di controllo

Per il controllo e la movimentazione di DeVoPeS è stato usato un PLC a 23 ingressi e 15 uscite.

La stesura del listato è stata effettuata in linguaggio Ladder tramite l'utilizzo di quattro finecorsa magnetici montati sui cilindri del pantografo e degli ugelli atomizzatori, e di una serie di temporizzatori che hanno permesso la corretta esecuzione del ciclo.

Il robot cartesiano dal suo canto è gestito tramite un apposito software di controllo in posizione con opportune schede NI PXI e ha una accelerazione massima di movimentazione di 4 m/s^2 .

7. SPERIMENTAZIONE SU DEVOPES

7.1 *Prove iniziali*

Le prove sperimentali sono state condotte sia tramite le cartine idrosensibili sia tramite colorante direttamente spruzzato sulle piante.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con una prova effettuata in serra tramite una irroratrice pneumatica commerciale. Da essa appare evidente come gli attuali metodi di irrorazione siano disuniformi e in alcuni punti eccessivi, rispetto a quanto ottenibile con DeVPeS.

7.2 *Prove in laboratorio e in serra*

DeVoPeS è stato inizialmente testato in laboratorio e poi in serra. La sperimentazione è stata condotta per gradi: prima con comandi manuali e poi con

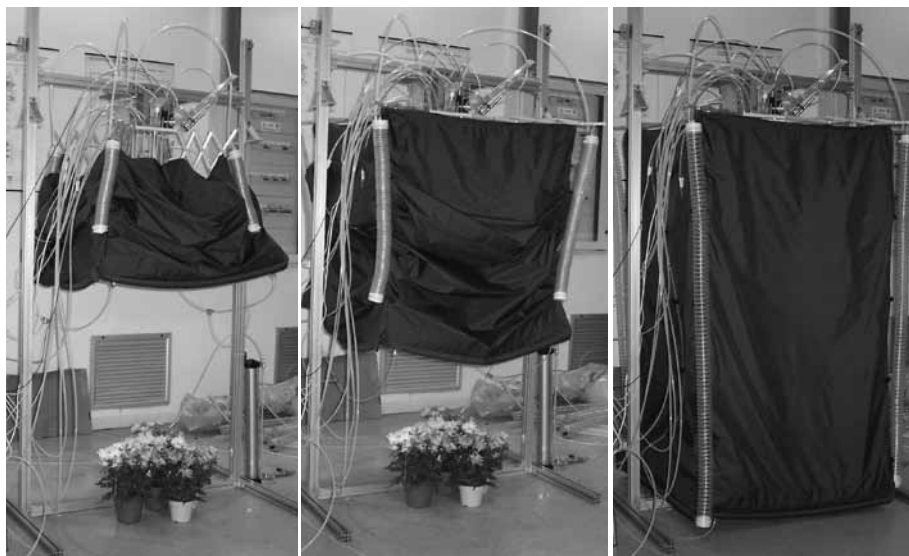


Fig. 20 *Prove di laboratorio su DeVPeS*

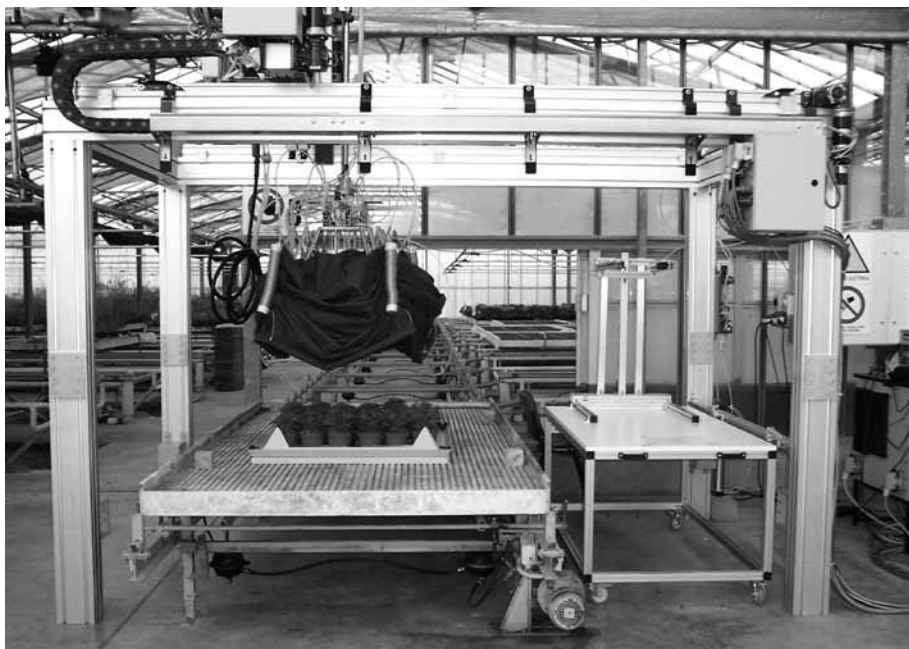


Fig. 21 *DeVoPeS pronto per il trattamento in serra (CeRSAA – Albenga - SV)*

PLC, ma senza collegamento con il robot cartesiano (fig. 20).

Infine si è collegato DeVoPeS al robot e si è affinato l'intero ciclo.

La sperimentazione in serra (presso il CeRSAA di Albenga – Italy) ha permesso di valutare l'efficacia del trattamento automatico così realizzato, la sua velocità e l'agevole manovrabilità della macchina (fig. 21).

8. CONCLUSIONI

È stata messa a punto una metodologia sperimentale di prova che consente di valutare il grado di irrorazione di una foglia in base alle condizioni iniziali impostate.

Lo studio, condotto per via sia sperimentale sia numerica, ha portato a buoni risultati, permettendo di conoscere il fenomeno dell'interazione tra fitofarmaco e foglia e di visualizzare con chiarezza la distribuzione di fitofarmaco sulla pianta. Le prove sperimentali effettuate con gli ugelli atomizzatori contrapposti hanno messo in evidenza che è indispensabile movimentare gli ugelli atomizzatori per ottenere una buona deposizione su tutta la zona irrorata. Lo studio in esame ha portato, infine, alla progettazione, alla realizzazio-

ne e alla sperimentazione di DeVoPeS, macchina innovativa per l'irrorazione di fitofarmaco in ambiente confinato. I vantaggi del nuovo prototipo sono:

- l'isolamento totale dall'ambiente esterno, con possibilità per l'operatore di rimanere in serra contemporaneamente al trattamento, velocizzando quindi la varie operazioni sulle colture;
- la forte riduzione di perdite di fitofarmaco, con vantaggi per l'ambiente e con riscontri economici;
- la possibilità di recuperare e riutilizzare parte del fitofarmaco non depositato.

Attualmente DeVoPeS è stato costruito in scala ridotta per motivi dimostrativi, ma le sue dimensioni potrebbero tranquillamente essere tali da coprire un intero bancale.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata con fondi ministeriali MIUR sul progetto "*Sistemi meccatronici e pneumatici per una automazione sicura, ecocompatibile e competitiva nel florovivaismo*". Si ringrazia il Centro Regionale CeRSAA di Albenga (Savona, Italy) per la collaborazione prestata. Si ringraziano la Società MetalWork e la Società Rockwell per la collaborazione prestata e per il materiale fornito.

RIASSUNTO

Il presente lavoro si prefigge di presentare il progetto, la costruzione e la relativa sperimentazione, in laboratorio e in serra, di un robot a comando elettropneumatico per l'irrorazione di fitofarmaci in ambiente confinato.

Il prototipo realizzato è in grado di produrre, tramite quattro ugelli atomizzatori, una nebbia di gocce molto fini (max 50 μ m) che si deposita sulle foglie e penetra nella chioma, in modo da distribuire uniformemente l'agrofarmaco irrorato. Lo studio si è concentrato non solo sulla generazione della nebbia, ma anche sulla tipologia di copertura, in grado di trattenere le gocce di fitofarmaco. La scelta per tale costruzione è, infatti, caduta su un tessuto impermeabile all'acqua e all'aria, realizzato tramite cuciture nastrate per evitare fughe di prodotto verso l'esterno. Il tempo ciclo complessivo è di circa 1.5 min per l'intero trattamento ed è gestito in modo automatico tramite un PLC.

ABSTRACT

This research would like to illustrate the design, the construction and the experimentation, both in laboratory and in greenhouse, of a new electropneumatic robot, useful to spray pesticide in a defined volume.

The prototype is made up of four atomizers, capable of generating fine droplets (less than 50 μ m). This pesticide fog is able to penetrate into the crops canopy, giving a uniform distribution of product on leaves.

The study was also about the retractable cover of the robot. This is a textile construction, completely tightness for air and water.

The full treatment is carried on in 1.5 minute and a PLC offers a completely automatic procedure.

BIBLIOGRAFIA

- ACACCIA G.M., CALLEGARI M., MICHELINI R.C., MOLFINO R.M., RAZZOLI R.P. (1998): *Greenhouse's Automation: Produce Tillage and Phytopatologies Treatments*, Proc. of the 4th ECPD Intl. Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, Moscow, pp. 339-343.
- ADE G., FABBRI A. (2000): *Theoretical analisys on bonds between covering plants, numerosness and distribution of droplets on hydro-sensible cards* (in italian), «Riv. di Ing. Agr.», 2, pp. 104-108.
- AUSTERWEIL M., GRINSTEIN A. (1997): *Automatic pesticide application in greenhouses*, «Phytoparasitica», pp. 718-808.
- BELFORTE G., EULA G., RAPARELLI T. (2009): *Analysis of pneumatic techniques for pesticide spraying in greenhouses*, «Experimental Techniques», 33, vi, pp. 21-29.
- BELFORTE G., EULA G., RAPARELLI T. (in press): *DeVoPeS: Defined Volume Pesticide Sprayer design and testing*, «Experimental Techniques».
- BOUSE L.F. (1994): *Effect of nozzle type and operation on spray droplet size*, «Transaction of Asac», 37, pp. 1389-1400.
- CHRISTENSEN S., LUND I., JOLSEN H. (2008): *Spraying Robots*, «Aspects of Applied Biology 84 – Int. Advances in Pesticide Application», pp. 167-170.
- EBERT T.A., DERKSEN R.C., DOWNER R.A., KRAUSE C.R. (2003): *Comparing greenhouse sprayers: the dose-transfer process*, «Pest Management Science», 60, v, pp. 507-513.
- GIL Y., SINFORT C. (2005): *Emission of pesticides to the air during sprayer application: a bibliographic review*, «Atmospheric Environment», 39, pp. 5183-5193.
- KONDO N., MONTA M., FUJIURA T. (1996): *Basic constitution of a robot for agricultural use*, «Advanced Robotics», 10, iv, pp. 339-353.
- MAERTENS W., NUYTTENS D., SONCK B. (2005): *Optimisation of sequence and orientation for used nozzles based on few, full boom distribution measurements*, «Commun. Agric. Appl. Biol. Sci.», 70, iv, pp. 989-995.
- MANDOW A., GOMEZ DE GABRIEL J.M., M. RODRIGUEZ J.L., MUNOZ V.F., OLLERO A., GARCIA-CEREZO A. (1996): *The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation*, «IEEE Robotics & Automation Magazine», pp. 18-28.
- MATTHEWS G.A. (2000): *Pesticide application methods*, ed. Longman Scientific & Technical, New York.
- MOLTÒ E., MARTIN B., GUTIERREZ A. (2001): *Pesticide loss reduction by automatic adaptation of spraying on globular trees*, «J. Agric. Engng Res», 78, i, pp. 35-41.
- NAOKI S., YUKIO O., JUNICHI A., NORI H. (1995): *Fully-automatic spraying system employing spray car*, U.S. Patent 5397056.

- NUYTTENS D., WINDEY S., BRAEKMAN P., DE MORR A., SONCK B. (2003): *Optimisation of a vertical spray boom for greenhouse spraying applications*, «Comm. Agric. Appl. Biol. Sci.», 68, iv, pp. 905-921.
- NUYTTENS D., WIDEY S., SONCK B. (2004): *Comparison of operator exposure for five different greenhouse spraying applications*, «J. of Agricultural Safety and Health», 10, iii, pp. 187-195.
- PAICE M.E.R., MILLER P.C., BODLE J.D. (1995): *An experimental sprayer for the spatially selective application of herbicides*, «J. agric. Eng. Res.», 60, pp. 107-116.
- PAUL H., ILLING A. (1997): *The management of pesticide exposure in greenhouses*, «Indoor and Built Environment», 6, v, pp. 254-263.
- PICCAROLO P. (2008): *Machinery for protected crops*, «Machinery World», ed. Unacoma Service, 6, pp. 64-73.
- SAMMONS P.J., FURUKAWA T., BULGIN A. (2005): *Autonomous Pesticide Spraying Robot for use in a Greenhouse*, Australasian Conference on Robotics and Automation 2005, pp. 1-9.
- SINGH S., BURKS T.F., LEE W.S. (2005): *Autonomous robotic vehicle development for greenhouse spraying*, «Trans. of the ASAE», 48, vi, pp. 2355-2361.
- TIAN L., REID J.F., HUMMEL J.W. (1999): *Development of a precision sprayer for site-specific weed management*, «Transaction of Asae», 42, pp. 893-900.