

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**



Tesi di Laurea Magistrale

***Studio di sistemi di irrorazione di vitigni mediante  
droni con particolare riferimento al circuito  
idraulico/pneumatico utilizzato per la spruzzatura  
di prodotti fitosanitari.***

**Relatori:**

Prof. Terenziano Raparelli

Prof.ssa Gabriella Eula

Ing. Giuseppe Pepe

Dr. Alexandre Ivanov

**Candidato:**

Nicolò Filippi

Aprile 2021



# INDICE

---

<b>Introduzione.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1: L'utilizzo dei droni in agricoltura .....</b>	<b>2</b>
1.1 L'utilizzo dei droni nell'agricoltura di precisione.....	2
1.2 L'utilizzo dei droni per la spruzzatura di fitofarmaci.....	4
1.3 Panorama legislativo .....	6
1.4 Consultazione degli esperti in materia di agricoltura e vite.....	9
1.4.1 Marcello Travenzoli dell'azienda agricola Corte Raffetta .....	9
1.4.2 Eugenio Pastoris di Agricola Pastoris .....	12
1.4.3 Fabrizio Lebole .....	15
<b>CAPITOLO 2: Il processo di atomizzazione .....</b>	<b>18</b>
2.1 La formazione del droplet.....	18
2.1.1 Introduzione.....	18
2.1.2 Rottura primaria.....	20
2.1.3 Effetto della velocità sull'efflusso .....	26
2.1.4 Rottura secondaria.....	27
2.2 Parametri per la misurazione del droplet.....	32
2.2.1 Introduzione alla rappresentazione .....	32
2.2.2 Il mean diameter.....	33
2.2.3 I diametri rappresentativi.....	35
<b>CAPITOLO 3: Gli ugelli irroratori .....</b>	<b>37</b>
3.1 Caratterizzazione degli ugelli.....	37
3.1.1 Approccio teorico al calcolo del coefficiente $CD$ .....	38
3.1.2 Calcolo sperimentale del coefficiente $CD$ .....	43
3.1.3 Normativa ISO 10625 .....	45
3.1.4 Standard ASABE S-572.1 .....	46
3.2 Scelta degli ugelli.....	48
3.2.1 Teejet TXA .....	48

3.2.2 Ugelli AITX.....	52
3.2.3 Ugelli XR.....	54
<b>CAPITOLO 4: Il fenomeno della deriva.....</b>	<b>56</b>
4.1 Introduzione al fenomeno della deriva .....	56
4.2 Il fenomeno della deriva negli UAV .....	58
4.2.1 Effetto delle dimensioni del droplet.....	58
4.2.2 Ipotesi sull'assetto di volo .....	61
4.2.3 Il downwash nel volo statico. ....	63
4.2.4 Influenza del downwash sulla deposizione del droplet.....	66
4.2.5 Possibili soluzioni per la mitigazione della deriva.....	70
4.2.6 Orientazione degli ugelli nel processo di spruzzatura.....	76
<b>CAPITOLO 5: Circuito idraulico.....</b>	<b>80</b>
5.1 Introduzione .....	80
5.2 Componentistica.....	82
5.2.1 Serbatoio.....	82
5.2.2 Raccordi utilizzati .....	84
5.2.3 Portaugelli.....	87
5.2.4 Flussimetro Sea YF-S401 .....	89
5.2.5 Pompe .....	90
5.2.6 Valvole .....	96
<b>CAPITOLO 6: Simulazioni.....</b>	<b>102</b>
6.1 Simulazioni sul circuito idraulico con Simcenter Amesim .....	102
6.1.1 Il Software .....	102
6.1.2 Simulazione su ugelli semplici e scelta del sottomodello .....	102
6.1.3 Verifica delle prestazioni garantite dalle pompe scelte.....	105
6.1.4 Circuito con pompe in configurazione multipla .....	112
6.1.5 Test preliminari su valvole di regolazione .....	115
6.1.6 Valvole di regolazione nel circuito idraulico.....	121
6.1.7 Possibile avaria: intasamento di un ugello .....	128

6.1.8 Controllore PID.....	132
6.1.9 Regolazione a pressione costante.....	143
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>145</b>
<b>APPENDICE A.....</b>	<b>147</b>
A.1 Caratteristica di funzionamento dell'ugello.....	147
A.2 Caratteristica di funzionamento della pompa.....	148
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA .....</b>	<b>150</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>152</b>

# Introduzione

---

Il presente lavoro di tesi è incentrato sulla progettazione di un circuito idraulico per la spruzzatura di pesticidi, adatto ad essere montato su un drone agricolo utilizzato per i trattamenti in vigneti coltivati seguendo la tecnica detta a: “Spalliera”.

Per riuscire ad ottimizzare la progettazione e la scelta dei componenti, preliminarmente è stata eseguita una ricerca nella letteratura scientifica che chiarisse i principi di funzionamento degli ugelli spruzzatori e quelli che portano alla formazione del droplet. Si è poi passati agli argomenti che interessano direttamente il processo di spruzzatura tramite drone come: il drift, il downwash causato dalla rotazione delle pale e la normativa vigente in materia di volo.

Il materiale reperito in letteratura è stato arricchito dalle testimonianze di alcuni esperti del settore dronistico ed agricolo, che hanno fornito le loro esperienze in materia.

Grazie alle informazioni raccolte, si è quindi potuto passare alla progettazione vera e propria del circuito, riuscendo a scegliere così i componenti commerciali più adatti allo scopo, cercando di ottimizzare il peso dello stesso.

In questa fase di progettazione ci si è serviti del software di simulazione Simcenter Amesim, grazie al quale è stato possibile valutare le prestazioni dei componenti commerciali ed il comportamento del circuito in varie situazioni, comprese le possibili regolazioni applicabili.

# CAPITOLO 1: L'utilizzo dei droni in agricoltura

---

## 1.1 L'utilizzo dei droni nell'agricoltura di precisione

Negli ultimi anni, la sinergia fra meccanizzazione e l'introduzione sempre maggiore di alta tecnologia applicata all'agricoltura come: l'utilizzo dell'informatica, i satelliti, la sensoristica, i sistemi di posizionamento ad alta precisione e l'elettronica stanno portando ad una vera e propria rivoluzione 4.0 in campo agricolo.

Si tende sempre di più verso un'agricoltura detta di *precisione*, in cui una quantità sempre maggiore di dati vengono raccolti ed elaborati per portare ad un miglioramento dell'impiego delle risorse, della qualità dei prodotti, ad un aumento della redditività e della sostenibilità della produzione agricola. Infatti viviamo in un pianeta sempre più minacciato dall'inquinamento e dalla scarsità di risorse e ciò rappresenta un vero problema visto che circa l'80% delle terre coltivabili è già utilizzato e la popolazione continua a crescere.

Considerando l'Italia, terra di grandi eccellenze, dove però la produzione non è molto elevata, è soggetta ad alcune problematiche specifiche come: l'edificazione che ha rubato in passato terreni all'agricoltura, la presenza di molti territori soggetti a vincoli che non permettono la coltivazione e il fatto che questo settore abbia sempre meno appeal per i giovani. Basti pensare che alla fine degli anni 50, metà della popolazione era impiegata in campo agricolo, mentre oggi siamo arrivati al 3%. Queste problematiche potrebbero essere in parte superate cercando di applicare i principi dell'agricoltura di *precisione*.

Bisogna infatti partire dal presupposto che i campi coltivati sono soggetti a variabilità oggettive dovute a vari fattori ed è quindi importante lavorare con l'ottica di ottimizzare i processi andando a ridurre l'utilizzo di: acqua, pesticidi e fertilizzanti; differenziando così sia spazialmente che temporalmente il modo di trattare le varie aree coltivate.

Non solo i campi coltivati posti in diverse zone possono avere caratteristiche diverse, ma ogni singolo metro quadrato dello stesso campo può differenziarsi dal resto.

E da questo punto di vista si sta già intervenendo, infatti per fare un esempio, esistono macchinari a dosaggio variabile, che permettono tramite i dati raccolti in campo, orientandosi con il GPS, di regolare la quantità di prodotti utilizzati in base alla reale necessità, evitando inutili sprechi.

I principali strumenti che vengono utilizzati per analizzare e discernere le varie zone dell'appezzamento sono:

- Analisi del terreno.
- Stazioni meteo.
- Analisi di resistività.
- Analisi sull'indice vegetativo.

Proprio questo ultimo indice può essere analizzato grazie all'utilizzo di droni dotati di fotocamere multispettrali che permettono di creare mappe di vigore, i cui dati vengono elaborati permettendo di ottenere un'ottimizzazione dei processi [1].

Tuttò ciò è reso possibile grazie al fatto che le foglie delle varie colture riflettono la luce in modo diverso in base al vigore vegetativo. Si ottengono quindi delle mappe in cui viene rappresentato il *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*, che fornisce un valore riguardo l'attività fotosintetica della pianta, grazie al quale si possono poi regolare i vari interventi a cui sottoporre la coltura.

L'indice *NDVI* può assumere valori che variano da -1 a +1, in particolare quelli sotto lo 0 non hanno significato ecologico, mentre man mano che si avvicina al +1 si avrà un maggior vigore vegetativo. Come si può vedere in Fig.1, per esempio, una pianta stressata a differenza di una in salute riflette molto di più la luce rossa e meno quella nello spettro dell'infrarosso.

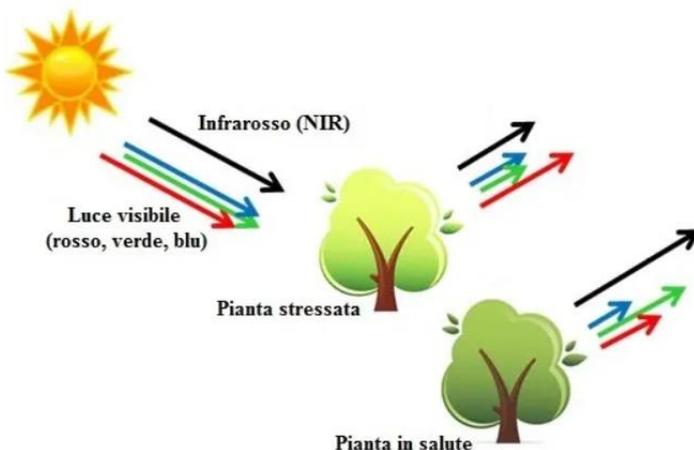


Fig. 1 Riflessione della luce da parte di piante con diverso vigore vegetativo. [1]

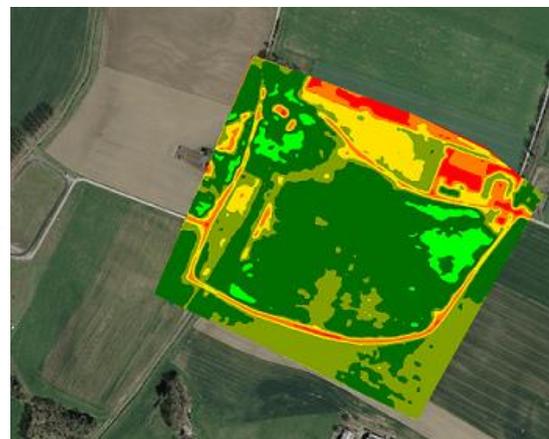


Fig. 2 Mappa di vigore. [1]

Invece l'utilizzo di *droni* per la spruzzatura sulle colture è una pratica non ancora molto diffusa in Italia, che sta però prendendo piede a livello globale soprattutto nei paesi orientali, dove viene impiegata sempre più spesso nelle coltivazioni di cereali come il riso.

A tal proposito, molti dei lavori di ricerca effettuati fino adesso in questo campo arrivano proprio dall'oriente, dove l'inquinamento dei pesticidi rappresenta un grosso problema.

L'utilizzo di *UAV (unmanned aerial vehicle)* non è del tutto nuovo in abito agricolo, infatti da circa una ventina di anni in Giappone vengono utilizzati mini elicotteri per le irrorazioni del

riso, tuttavia lo sviluppo del mercato riguardante i *droni* negli ultimi anni, ha permesso un grande salto in avanti dal punto di vista tecnologico. Infatti sul mercato oggi sono presenti varie tipologie di droni di diverse grandezze che permettono, in campo agricolo, di svolgere diverse attività che vanno dal tracciamento delle malattie, al trattamento vero e proprio delle stesse. Inoltre il progresso tecnologico degli ultimi anni, ha permesso di avere velivoli sempre più avanzati e semplici da pilotare: rendendoli in alcuni casi completamente autonomi poiché una volta mappato il campo da trattare, essi sono in grado di muoversi nello stesso con estrema versatilità.

## 1.2 L'utilizzo dei droni per la spruzzatura di fitofarmaci

Nella difesa delle colture, si riscontra la necessità di ridurre in particelle molto fini il prodotto per riuscire a coprire efficacemente la pianta. A seconda dei trattamenti effettuati, considerando comunque l'elevata meccanizzazione dell'agricoltura, questa micronizzazione può essere fatta utilizzando varie macchine a seconda delle esigenze dell'azienda. Le principali sono:

- *Le impolveratrici*: che permettono di depositare tramite un flusso di aria le polveri con cui si vuole trattare la coltivazione. In particolare, vengono utilizzati per l'aspersione dello zolfo.
- *Le fumigatrici*: le quali distribuiscono il principio attivo sulla zona da trattare sotto forma di gas.
- *Le irroratrici*: che tramite vari principi frantumano il liquido in particelle molto fini che poi nella maggior parte dei casi viene canalizzato sulla coltura tramite getti di aria. Questo ultimo tipo è il più utilizzato nelle applicazioni fitoiatriche in vigneto e frutteto, poiché la maggior parte dei prodotti prevede la miscelazione con acqua.

Le recenti normative riguardanti la *difesa fitosanitaria*, hanno posto particolare attenzione a questi trattamenti, in quanto se non vengono prese le giuste misure preventive, possono essere molto dannosi per l'ambiente circostante. Ci sono casi in cui circa l'80% del prodotto non raggiunge le piante, ma viene disperso nell'ambiente creando inquinamento e rendendo inefficace il trattamento.

Le ditte che producono le irroratrici, quindi si sono adoperate per ottimizzare i macchinari utilizzati per la spruzzatura realizzando attrezzature che siano sicure per gli operatori, che

evitino la deriva del prodotto riducendo l'impatto sull'ambiente e che permettano anche di utilizzare una quantità sempre più piccola di prodotti.

In particolare si possono dividere i trattamenti a seconda del volume di acqua utilizzato per ettaro in: volume *medio-alto* (1600 l/ha), *basso* (200 l/ha) e *ultrabasso* (50 l/ha).

Quello della riduzione dei fenomeni della deriva e dello spreco di prodotti è anche uno dei principali obiettivi del *PAN* (Piano di Azione Nazionale per l'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari).

Nell'ottica di introdurre nuove tecnologie per gli interventi di *difesa fitosanitaria*, l'utilizzo dei *droni* potrebbe essere uno dei mezzi più interessanti per far fronte a queste problematiche. Attualmente in commercio se ne trovano di vari modelli che si differenziano essenzialmente per il numero di rotori, il posizionamento degli ugelli e la capacità di liquido trasportabile. Tuttavia, dovendo sottostare alla legislatura in materia di volo, non differiscono molto l'uno dagli altri per quanto riguarda le dimensioni e le caratteristiche tecniche. Infatti, la maggior parte ha un diametro massimo di apertura dei bracci che sta al di sotto dei 2m, il peso compreso il fitofarmaco si attesta nell'intorno dei 20 kg ed il liquido trasportabile oscilla nell'intervallo 10-16 l. I moderni *droni agricoli*, seppur ancora in via di sviluppo, permettono dai dati dichiarati dai costruttori, di aumentare anche di circa 40 volte la rapidità con cui viene eseguito il trattamento. Utilizzando poi un *basso volume* di irrorazione, si riesce a risparmiare circa il 90% dell'acqua ed il 30-40% di *fitofarmaco* rispetto ad un trattamento tradizionale.

Attualmente possono essere applicati con buoni risultati soprattutto in quegli scenari dove non potendo intervenire con un trattore, è necessario eseguire i trattamenti con irroratrici spalleggiate o macchinari simili, che rendono l'operazione laboriosa e potenzialmente dannosa per l'operatore. Fra gli aspetti positivi si può essenzialmente riscontrare:

- Precisione maggiore durante la spruzzatura con risparmio in termini di prodotti utilizzati.
- Riduzione della dispersione dei prodotti spruzzati nell'ambiente.
- Possibilità di intervenire in zone impervie.
- Possibilità di trattare le colture con qualsiasi condizione del terreno.
- Riduzione dei tempi di trattamento.
- Salvaguardia della salute dell'operatore.
- Evitare la compattazione del terreno ed il danneggiamento delle colture in fase lattica.

Grazie a questi velivoli si potrebbe intervenire nei campi coltivati, per il diserbo di quelle erbacce infestanti come l'Erba Codina, che tendono a concentrarsi maggiormente in alcune zone, riuscendo ad eseguire un trattamento mirato. Proprio a questi interventi mirati stanno lavorando l'università di Saga in Giappone e Optim, i quali stanno studiando un sistema che permetta al

drone di identificare autonomamente gli insetti parassiti e successivamente intervenire con una dose mirata di pesticida [43].

Oltre a quello agricolo, tuttavia potrebbero essere utilizzati anche per i trattamenti boschivi ed in particolare per il controllo di: Tentredine, Ifantria e di altri insetti. Infatti, queste avversità provocano un'elevata defogliazione, che sarebbe facilmente rilevabile tramite sorvolo.

I droni inoltre vengono già utilizzati nella lotta integrata per la Piralide del mais, distribuendo tramite appositi accessori montati sul velivolo l'imenottero *Trichogramma Brassicacae* che è un insetto antagonista.

Un altro possibile intervento è quello sulla *Bactrocera Oleae* o mosca dell'olivo, permettendo di raggiungere anche gli oliveti posti nelle zone più impervie.

A tutte le potenzialità che si riscontrano nel possibile impiego, tuttavia bisogna considerare alcuni punti a sfavore.

Fra i principali troviamo:

- Limitata autonomia sia in termini di tempo di volo, che per quanto riguarda la spruzzatura.
- Costi molto elevati.
- Necessità di personale qualificato per manovrare il drone.
- Tecnologia non ancora ottimizzata.

## 1.3 Panorama legislativo

Sebbene i *droni* possano essere un'innovazione vincente in campo agricolo, l'irrorazione fatta con mezzi aerei ad oggi in Italia è vietata come scritto nell' art.13 del D. Lgs 150/2012.

Analizzando quindi l'articolo 13, si nota che l'*irrorazione aerea* è in generale vietata. Tuttavia, esistono delle deroghe che la rendono possibile nelle province autonome di Trento e Bolzano a patto che il Ministero della salute, il Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali e il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare siano favorevoli. Inoltre, alcuni fra i requisiti da rispettare sono: che non esistano altri metodi di applicazione alternativi, che l'irrorazione aerea presenti evidenti vantaggi rispetto agli altri metodi, che le attrezzature utilizzate dagli aeromobili debbano essere certificate e che l'operatore sia in possesso dell'adeguata e specifica formazione. Tuttavia si è aperto uno spiraglio, infatti riconosciute le potenzialità che possono presentare i droni nell'utilizzo agricolo, nella bozza di revisione del *PAN* (Piano di azione nazionale per l'utilizzo sostenibile dei prodotti fitosanitari) che si trova su sito del Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali, al punto: "A.3.10 - Uso dei droni"

c'è scritto che entro 24 mesi dall'entrata in vigore del Piano, dovranno essere stabiliti i requisiti per l'attività di sperimentazione eseguita sui *droni*.

Superato lo scoglio legislativo legato ai fitofarmaci, ci si deve scontrare anche con una normativa sul volo molto complessa che deriva dall'intersezione fra norme europee *EASA* (Agenzia dell'Unione europea per la sicurezza aerea) e nazionali riguardanti il volo dei droni civili. I droni essendo considerati a tutti gli effetti degli aeromobili, devono sottostare ai regolamenti emanati da *ENAC* (Ente Nazionale Aviazione Civile). Vengono individuate diverse categorie di droni a seconda delle dimensioni, diverse tipologie di operazioni e stabilite le normative sulla sicurezza durante il volo. Infatti da com'è possibile vedere dalla Fig.3, si nota come a seconda delle condizioni di volo e peso del drone esistano diverse categorie che richiedono certificazioni e permessi differenti per volare.

Ci si concentra sulle due che più interessano gli utilizzatori di droni in campo hobbystico e professionale, che sono : *open category* e *specific category*.

Per ricadere nella prima per esempio, i requisiti devono essere:

- Solo volo VLOS (volo a vista).
- Altezza massima di 120 m.
- Peso massimo del drone al decollo 25 kg.
- Il drone deve possedere il marchio CE.

Se anche una sola dei precedenti requisiti non viene rispettato, significa che l'operazione non è più *Open*, ma *Specific* ed il volo non è vietato, tuttavia si dovranno possedere altre certificazioni e sottostare a normative più stringenti.

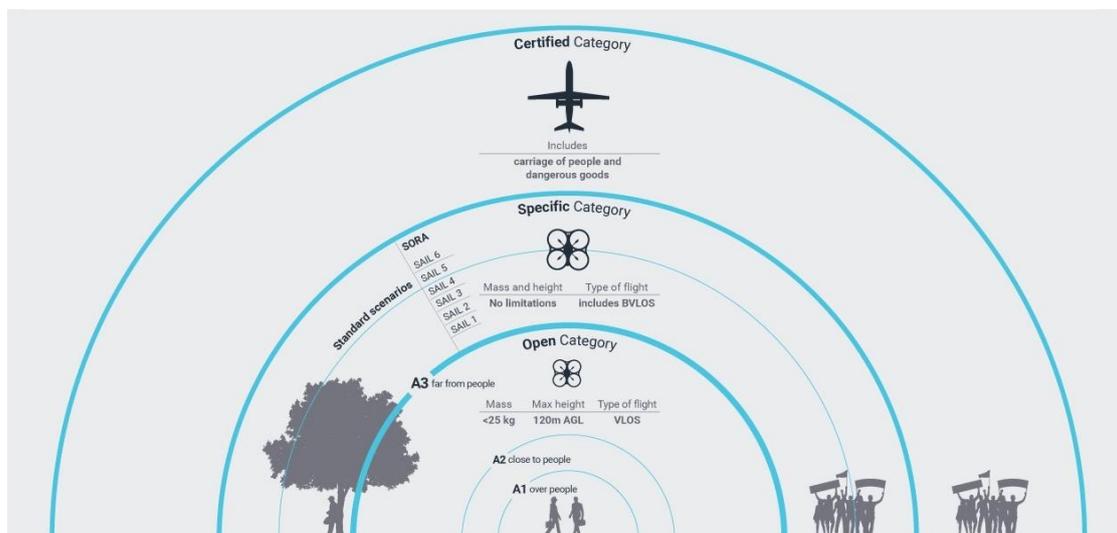


Fig. 3 Divisione fra le diverse categorie di operazioni. [4]

Nella categoria *Open* esistono poi tre tipi di volo: *A1* volo sopra alle persone, *A2* vicino alle persone, *A3* distante dalle persone.

Sempre nella stessa categoria inoltre, a seconda del peso *MTOM* (Maximum take-off mass), i droni possono essere raggruppati in 4 sottogruppi:

- C0 MTOM < 250 g
- C1 MTOM < 900 g
- C2 MTOM < 4 kg
- C3 MTOM < 25 kg

Passando alla categoria *Specific*, sono previste delle autorizzazioni speciali da richiedere di volta in volta ad *ENAC* o agli enti preposti e la necessità di avere un'ulteriore certificazione oltre alla *CE*, che dipende dalla classe di appartenenza. Ogni classe fa riferimento alle caratteristiche che possiede il drone per poter lavorare in certi scenari. Le classi riferite a scenari standard sono quelle comprese fra C1 e C4, tuttavia esistono poi le classi C5 e C6 che fanno riferimento ad impieghi particolari.

Nel caso specifico della coltivazione della vite poi, il *decreto Mipaaf* del 30/06/20 in materia di vino, prevede la valorizzazione di tutti quei vigneti considera eroici e storici. I primi sono quelli ubicati in zone impervie o di pregio paesaggistico dove non si riesce ad arrivare con la meccanizzazione e molte attività vengono svolte ancora a mano. In questi territori, a causa delle condizioni estreme della coltivazione, l'utilizzo dei *droni* potrebbe portare ad una svolta non solo per quanto riguarda i trattamenti di spruzzatura sulle colture. Tuttavia, molto spesso sorgono in parchi naturali o riserve dove il volo è vietato.

Quanto riportato da un'idea della complessità della normativa a cui sono sottoposti in generale i *droni*. Quindi anche per i costruttori di droni, volendo superare lo svantaggio di avere un serbatoio limitato, dovrebbero comunque sottostare alla normativa in termini di dimensioni, in quanto volendo fare un drone più capiente e quindi più pesante le certificazioni ed i permessi necessari al volo lo renderebbero scarsamente utilizzabile.

## 1.4 Consultazione degli esperti in materia di agricoltura e vite

### 1.4.1 Marcello Travenzoli dell'azienda agricola Corte Raffetta

Tramite un forum italiano che tratta tematiche riguardanti i droni, si è entrati in contatto con Marcello Travenzoli, dell'azienda agricola *Corte Raffetta* che sorge nel comune di Bigarello (MN).

L'azienda produce principalmente: riso, mais, girasoli, grano saraceno e zucche in regime di *coltivazione biodinamica*. Questo tipo di coltivazione non prevede l'utilizzo di pesticidi di sintesi, infatti, come specificato dallo stesso Marcello, si cerca tramite l'utilizzo di prodotti naturali, di riequilibrare le sostanze nutritive del suolo e combattere i parassiti lavorando in sinergia con la natura e non avvelenandola con prodotti chimici come nel caso dell'agricoltura tradizionale. Per fare un esempio: per l'*oidio*, che è una malattia tipica della vite, può essere



Fig. 4 Il drone di Travenzoli in azione su un campo di cereali.

impiegato il *siero del latte* diluito opportunamente in acqua, il quale svolge un'azione acidificante. Proprio per questo, non utilizzando pesticidi di sintesi, è stato il primo in Italia a dotarsi di un *drone agricolo* per la spruzzatura e soprattutto a poterlo utilizzare per l'applicazione dei vari liquidi a base naturale nebulizzati sulle proprie colture.

Parlando con lo stesso, è emerso che coltivando in *biodinamica*, i trattamenti devono essere molto più frequenti rispetto ad un regime di coltivazione convenzionale. Quando è partito con il progetto di conversione, i primi anni, utilizzava una pompa irroratrice spalleggiata. Ben presto però, dovendo trattare alcuni ettari di colture, si è reso conto di dover adottare un mezzo più efficiente per i trattamenti, che gli permettesse di risparmiare tempo e di lavorare in condizioni meno massacranti. Infatti il principale problema era quello di ritrovarsi a lavorare sotto la calura estiva con una ventina di chili dell'*irroratore spalleggiato* caricati sulla schiena. Questa scelta è ricaduta coraggiosamente su un drone e così dalla primavera 2019 è stato il primo in Italia a dotarsi di un *Dji Agras MG-1P*. Coraggiosamente, in quanto l'investimento in termini economici è stato importante, considerando anche il fatto che essendo un precursore non fosse sicuro della reale efficacia che questo mezzo innovativo poteva avere.

Marcello è stato molto disponibile e ci ha fornito, grazie alla sua esperienza maturata in questi due anni di utilizzo, molte informazioni utili che diversamente non avremmo potuto reperire da

nessun'altra parte in quanto, nei vari siti dei produttori di droni, vengono chiaramente descritti i pregi, ma non quelli che potrebbero essere i difetti del mezzo.

Spiegandogli lo studio che si stava portando avanti, è emersa subito la differenza sostanziale che c'è fra l'impiego per cui questi *droni commerciali* sono stati progettati e l'applicazione su vigneto. Infatti vengono usati prevalentemente per i trattamenti su coltivazioni estese in senso orizzontale e per il diserbo. Dovendo quindi trattare delle viti a spalliera, in cui la coltura si sviluppa verticalmente, potrebbero sorgere delle problematiche riguardo il ricoprimento degli strati inferiori più vicini al terreno. Lo stesso proprietario del drone, il quale porta avanti vari progetti di natura agricola, si è detto interessato a poter impiegare il suo drone per i trattamenti nel suo vigneto, tuttavia non ha avuto risposte dalla casa costruttrice in merito all'esistenza di componentistica per la conversione del drone.

Per quanto riguarda poi le colture trattate nell'azienda agricola, si è detto globalmente soddisfatto di aver preso questa scelta, elencando tutta una serie di benefici che ha portato nella sua attività.

Andando per ordine, in prima battuta ha notato un risparmio di tempo rispetto ad un trattamento convenzionale. Questo drone è tecnologicamente molto avanzato e permette di eseguire una tracciatura preliminare dei terreni su cui verranno effettuati i trattamenti, avendo anche la possibilità di evidenziare i possibili ostacoli presenti nei campi come: pali ed alberi. Grazie a queste informazioni è quindi in grado di ottimizzare le traiettorie durante le fasi di spruzzatura e rientro, infatti quando la batteria raggiunge livelli bassi di carica gli permette di seguire il percorso più breve.

Garantisce nelle prima fase vegetativa della coltura, detta *fase lattica*, di poter eseguire comunque i trattamenti. Infatti con il trattore, in queste prime fasi, dovendo entrare all'interno del campo, c'è il rischio di danneggiare le piantine irreversibilmente. Infatti tendono ad essere schiacciate e non avendo ancora un fusto resistente si possono provocare danni irreversibili.

L'*altezza di volo* con cui trattano le coltivazioni dipende essenzialmente dall'altezza delle stesse: infatti si passa da colture raso terra come la zucca, a più di due metri per i girasoli. Il valore può variare da circa 1,50 m fino a 10 m. Due parametri da tenere in conto per regolare l'altezza di volo sono: la presenza di vento che potrebbe deviare il liquido nebulizzato mancando il bersaglio ed il fatto che il terreno sia più o meno umido, in quanto volando troppo bassi si rischia di alzare troppa polvere che va a disturbare il volo.

La *velocità* viene invece regolata dal drone stesso, in base alla modalità impostate ed ai litri per ettaro di prodotto che si sceglie di distribuire, che in questo caso si aggira sui 40-50 l/ha.

Infatti il drone è dotato di varie modalità che possono essere impostate dall'utente prima di iniziare l'attività di aspersione: le quali permettono in automatico di ottimizzare i vari parametri scelti, come per esempio la quantità di liquido spruzzata al minuto, garantendo così una

ricopertura ottimale della coltura nelle diverse condizioni di volo. La *velocità* del drone, si attesta comunque sui 4-6 m/s e anche se il drone sarebbe capace di raggiungere velocità notevoli, è limitata in ogni caso elettronicamente a 8 m/s durante la spruzzatura.

Il maggior svantaggio evidenziato, oltre al notevole investimento iniziale, è il fatto che i droni odierni abbiano una capacità di carico non ancora molto elevata e che dovendo ottimizzare il peso, le batterie non riescano a garantire a drone carico più di 15 minuti di autonomia. Infatti per preservarne la loro integrità, non possono essere scaricate completamente, in quanto potrebbero danneggiarsi e non riuscire più a garantire l'autonomia iniziale. Per questa ragione, per riuscire a coprire vaste aree, ci si deve dotare di molte batterie. Tuttavia, le stesse hanno un costo molto elevato, infatti si parla di cifre intorno al migliaio di euro per pacco batteria, quindi risulta importantissimo riuscire ad utilizzare tutti i minuti di volo garantiti da ogni singola unità. In particolare lo stesso Marcello ha spiegato che a pieno carico il drone, come detto in precedenza, può volare per un tempo di circa 15 minuti. Bisogna però sottrarre a questi minuti il tempo per il rientro dello stesso nel punto dove si trova il pilota, infatti quando il sistema elettronico identifica che la batteria si sta esaurendo, si attiva una modalità di atterraggio di emergenza che lo può far atterrare anche molto distante dal punto di refill prefissato e se ciò avvenisse in mezzo al campo, risulterebbe scomodo andarlo a recuperare.

Considerato ciò quindi i minuti di spruzzatura effettiva si riducono a circa 12 min. Per non sprecare batteria e riuscire quindi a sfruttare tutta l'energia a disposizione ottimizzando il processo, si è dotato di taniche rispettivamente da 10l e da 5l. In questo modo, partendo a batteria carica, viene riempito il drone con la tanica da 10l, che corrisponde ad un tempo di spruzzatura di 7,5 min più il tempo di rientro. A quel punto il drone rientrato nello spazio adibito alla ricarica, viene riempito con la seconda tanica da 5l che permette circa 4 minuti di spruzzatura a cui si deve aggiungere il tempo per il rientro. A questo punto la batteria è quasi esaurita e viene sostituita con un'altra carica, riempiendo di nuovo il serbatoio e ricominciando con il ciclo introdotto in precedenza. Dalla foto Fig.5 è possibile notare le taniche di diverse dimensioni, poste in un luogo opportuno all'atterraggio a ridosso della coltivazione, pronte per il refill del drone.



Fig. 5 Luogo scelto per il refill del drone in cui si possono notare le taniche da 5 l e da 10 l.

## 1.4.2 Eugenio Pastoris di Agricola Pastoris

Studiando un qualcosa di innovativo per quanto riguarda l'ambito dei droni, si è ritenuto fosse utile per riuscire a comprendere meglio le varie problematiche e sviluppare idee migliori, recarsi sul campo per poter raccogliere il maggior numero di informazione riguardo ad un vigneto coltivato con la tecnica della spalliera.

E' stato molto importante poter vedere fisicamente il vigneto, poiché ci si rende subito conto delle reali dimensioni e della distribuzione spaziale assunta delle piante. Fattori che con il materiale reperibile in rete e nella letteratura, difficilmente si riescono a visualizzare e comprendere a pieno.

I vitigni in cui sono stati fatti i sopralluoghi sono quelli appartenenti ad *Agricola Pastoris*, un'azienda agricola situata in provincia di Biella, che sorge sulle colline del comune di Viverone.

Le principali varietà coltivate sono Erbaluce e Nebbiolo, anche se sono presenti alcuni appezzamenti di Dolcetto e Freisa. Tutti le viti comunque, sono coltivate con la tecnica della spalliera ed in particolare quella detta : " Guyot".



Fig. 6 Rilevamenti nelle vigne di Agricola Pastoris.

La visita è stata guidata dal figlio del proprietario, Eugenio Pasotris, il quale ha fornito diverse informazioni molto utili: sia riguardo ai trattamenti che vengono effettuati, sia anche sulle varie fasi vegetative delle loro colture.

Per quanto riguarda i prodotti utilizzati nei trattamenti, coltivando in *regime biologico*, quelli concessi e i quantitativi applicabili sono rigidamente regolati dall'ente certificatore, il quale vigila sul rispetto delle norme con controlli a sorpresa durante la stagione.

Per i trattamenti utilizzano un' *irroratrice convenzionale* trainata da trattore, che è fornita di un ventilatore assiale di circa un metro di diametro, il quale genera un getto di aria che viene incanalato e indirizzato radialmente, in modo che investa i due filari trattati contemporaneamente, trasportando così sul bersaglio il liquido nebulizzato dagli ugelli. La *dose di liquido* utilizzata per ettaro di coltura si attesta sui 500 l/ha, dove con liquido si intende la quantità totale composta dal prodotto impiegato per trattare le affezioni e l'acqua. Il *tempo* impiegato per trattare un ettaro è invece di circa 50-60 minuti, infatti si deve considerare che essendo una zona collinare, molto spesso i terreni sono accidentati e soggetti a dislivelli in cui sorgono terrazzamenti. Tutto ciò costringe il trattore a delle manovre, cambi di direzione e risalite per passare da un filare all'altro allungando il tempo di trattamento.

Proprio su questo tema è sorto un dibattito: infatti si deve considerare che a seconda della zona dove viene coltivata la vite, come detto da Eugenio, i terreni vengono modellati seguendo le tradizioni del luogo. Per esempio nell'alto Piemonte, le colline che ospitano i vigneti, i quali hanno una storia alle spalle di qualche centinaio di anni, in passato quando la manodopera costava molto meno, sono state rese in parte pianeggianti grazie all'introduzione di terrazzamenti. Mentre nelle Langhe, dove le coltivazioni sono relativamente più recenti, si possono scorgere paesaggi in cui non si trova neanche un muretto a secco, infatti i filari seguono perfettamente il profilo naturale della collina e per superare i dislivelli spesso vengono impiegati trattori cingolati e non gommati. Si trovano anche zone naturalmente pianeggianti come in Franciacorta, dove ci sono filari molto lunghi, in cui i cambi di direzione sono meno frequenti e dove probabilmente il tempo per il trattamento con il trattore si riduce, tuttavia a causa dell'umidità maggiore questi vigneti spesso sono soggetti a maggiori effezioni e quindi trattamenti. Ci sono poi zone in cui le coltivazioni possono essere considerate estreme, tre esempi possono essere: la zona di Carema, quella delle Cinque Terre e la Valtellina. In questi casi, molto spesso non è possibile l'utilizzo di trattori, in quanto posti in zone impervie, perciò rappresentano forse il caso dove i droni potrebbero essere impiegati con maggior successo.

Un altro aspetto importante da considerare è come varia la vegetazione dei vari tipi di viti, sia in funzione della specie che del periodo dell'anno. Per quanto riguarda il volume non c'è una così marcata differenza fra una coltivazione e l'altra, piuttosto variano gli interventi che l'agricoltore deve fare durante la stagione vegetativa per indirizzare e gestire la parte verde della pianta. Per esempio l'Erbaluce, fra i vitigni coltivati, è quello più vigoroso che sviluppa il maggior volume fogliare. Infatti poiché tende a fruttificare nelle zone estreme dei tralci, durante le potature deve essere lasciata una parte legnosa abbondante che garantisca un buon raccolto. Soprattutto nella fase vegetativa primaverile, porta a dover condurre diversi passaggi di canalizzazione e verticalizzazione dell'apparato verde. Mentre per gli altri vigneti come la Freisa, che geneticamente parlando è la madre del Nebbiolo, i passaggi di reindirizzamento e sfoltitura sono più radi.

Nella coltivazione a Guyot non ci sono sostanziali differenze di altezza fra le varie specie coltivate.

Inoltre, da come è possibile notare dalla Fig.7, i filari sono dotati di rete antigrandine. Vista l'applicazione futura del drone nei trattamenti, è importante considerare questo fattore, in quanto sempre più produttori si doteranno negli anni venturi di queste protezioni. I cambiamenti climatici infatti, hanno reso sempre più frequenti grandinate anche abbondanti che possono compromettere, come è successo nel 2019 ad Agricola Pastoris, l'intera annata.

Quindi nella primavera 2020 l'azienda ha deciso, in via sperimentale, di applicare queste protezioni ad una parte dei vigneti di Erbaluce e Freisa per poi estendere la copertura a tutti i vigneti entro il 2022, se i risultati dati da questa prima sperimentazione fossero buoni.

Dalle osservazioni che sono state fatte durante la stagione, l'applicazione di questa protezione ha portato alcuni benefici sia sul frutto che sulla parte verde della pianta. Per quanto riguarda i grappoli, hanno riscontrato una diminuzione del 5-10% sulle bruciature degli acini causate dal sole. Dal punto di vista vegetativo invece: porta ad una verticalizzazione della pianta che si sviluppa maggiormente in altezza con alcuni tralci che svettano rispetto ai pali, tuttavia risulta



Fig. 7 Particolare di un filare dotato di rete antigrandine.

più compatta nella parte bassa in quanto la rete ha un'azione contenitiva. In particolare nella Freisa, ha permesso di ridurre i passaggi durante la stagione atti ad indirizzare i tralci, poiché grazie alla rete vengono guidati e non prendono direzioni non volute. Grazie a questo risparmio di tempo, è possibile concentrare maggiormente il lavoro sulla :” Fascia grappoli”, ossia sulla rimozione delle foglie in prossimità del grappolo, che permette di evitare problemi di muffe o marciumi acidi nella fase di invaiatura e maturazione.

Il principale svantaggio riscontrato è nella *potatura legnosa*, in quanto i tralci e i viticci tendono ad incastrarsi nella rete, quindi in questa fase bisogna fare attenzione a non danneggiare la rete tirando i rami.

Infine sono stati eseguiti dei rilievi dove stono state eseguite delle misurazioni sulle principali grandezze che contraddistinguono il vigneto. Da com'è possibile notare confrontando le Fig. 6-7, poiché i vari appezzamenti sono stati piantati a distanza di anni, in azienda sono presenti due tipi di strutture a spalliera: una in cui i pali sono in legno e l'altra costruita con pali in cemento. La prima ha dimensioni più contenute, infatti l'*interfilare* misura circa 200 cm, mentre l'*altezza* dei pali si attesta sui 190 cm. La seconda invece ha un *interfilare* di circa 230 cm, con un'*altezza* dei pali che arriva a 220 cm. Bisogna considerare poi che le misurazioni sono state fatte in inverno, durante il riposo vegetativo delle piante, quindi si dovrà considerare anche il volume occupato dallo sviluppo dalle foglie e dai rami. Trovandosi in campo agricolo, quelle precedentemente introdotte, sono dimensioni di massima, soggette a variazioni.

Per quanto riguarda la distanza fra le piante invece, si attesta nell'intervallo compreso fra i 110 cm ed i 120 cm. Questo dato è importante in quanto permette di calcolare la densità delle piante per ettaro e quindi adattare la quantità di prodotti utilizzati per i trattamenti.

Quanto detto prima riguardo ai terrazzamenti è possibile notarlo dalla fig.8, che ritrae dall'alto uno degli appezzamenti dell'azienda coltivati a Nebbiolo. La foto è stata scattata con un DJI Mavic Air 2.



Fig. 8 Veduta aerea autunnale del podere “La Cucca” coltivato a Nebbiolo.

### 1.4.3 Fabrizio Lebole

Fabrizio Lebole è un laureando in enologia all'Università degli Studi di Torino, nella sede di Alba. Da sempre la sua famiglia si dedica alla coltivazione della vite e negli ultimi anni, per lavoro, segue alcune aziende nel Monferrato che coltivano in *regime biologico*.

Da lui sono state acquisite informazioni: sia sulla scelta della quantità di prodotto attivo da utilizzare, sia sulla quantità totale di liquido da nebulizzare sulla vite per ettaro.

Per quanto riguarda la prima voce, è importante seguire le linee guida fornite nella documentazione tecnica dal produttore del prodotto scelto. Di solito viene indicata sia la dose in ml/hl, sia quella in l/ha in funzione del tipo di affezione e del grado con cui è stata colpita la coltivazione Fig.9. La più importante delle due risulta essere quella che indica la quantità per ettaro, infatti una volta scelta questa, in base al mezzo con cui si intende trattare la vite e le condizioni ambientali verrà scelto il quantitativo di acqua.

Coltura	Avversità	Dose (L/ha)	Note	Volume di irrorazione (L/ha)
VITE	Oidio ( <i>Erysiphe necator</i> )	2 - 4	In caso di bassa pressione della malattia	100 - 1200
		4 - 8	In situazioni mediamente gravi	
		8 - 12	In situazioni gravi o per trattamenti "eradicanti"	
	Escoriosi ( <i>Phomopsis viticola</i> )	4 - 6	Da gemma cotonosa a prime 3 foglie	
	Erinosi ( <i>Colomerus vitis</i> ) ed Acariosi ( <i>Calipetrimerus vitis</i> )	6 - 12	Da gemma cotonosa a prime 3 foglie	

Fig. 9 Indicazioni sulle dosi di Thiopron, in funzione dell'avversità e del grado della malattia. [5]

Quanto indicato sulle etichette comunque sono indicazioni generali che possono essere leggermente modificate a seconda dell'esperienza e delle condizioni ambientali in cui i trattamenti vengono eseguiti. Infatti, la scelta delle giuste quantità di prodotto e soprattutto dell'acqua risentono di diversi fattori quali:

- Tipo di allevamento adottato
- Densità di impianto: bassa dove si trovano 3000 piante/ha, media dove si trovano fra 3000 e 6000 piante/ha o alta intensità per appezzamenti in cui si trovano più di 6000 piante/ha
- Fase vegetativa della vite.
- Temperatura alla quale viene fatto il trattamento: si deve tenere conto di questo fattore poiché in giornate molto calde, c'è un maggior rischio di evaporazione.
- Presenza di vento.
- Tecnologia utilizzata per l'aspersione.

Per quanto riguarda il quantitativo totale di liquido utilizzato per ettaro, si è passati dagli usuali 1000 l/ha di un tempo a circa 500 l/ha odierni o addirittura valori inferiori. La quantità dipende sia dai fattori esterni elencati, che possono rendere più o meno efficaci la spruzzatura e soprattutto dal grado di tecnologia adottato. Infatti, il progresso ha portato ad avere irroratrici sempre più prestanti ed ottimizzate, che permettono di ridurre lo spreco di prodotto che si presenta con macchinari obsoleti dove una buona parte del prodotto atomizzato è soggetta a deriva, riducendo sempre di più la quantità di liquido totale utilizzata per ettaro.

Chiaramente per le aziende, dover aggiornare i macchinari, presenta un investimento economico, che però porta a dei benefici sia diretti che indiretti. Riuscendo a trattare meglio la vite si avrà: una vendemmia migliore, un risparmio sui prodotti utilizzati per i trattamenti e una riduzione dell'inquinamento ambientale causato dagli stessi.

Dalla Fig.10 è possibile notare una classificazione dei trattamenti in base al volume utilizzato per ettaro in colture erbacee ed arboree. Per utilizzare efficacemente il drone per i trattamenti

sulla vite, considerando i limiti di portata, si dovrebbe ricadere nelle classi: volume molto basso, volume ultra basso.

<b>Classificazione dei volumi di irrorazione</b>	<b>Colture erbacee (l/ha)</b>	<b>Colture arboree (l/ha)</b>
Volume alto	> 600	> 1000
Volume medio	200-600	500-1000
Volume basso	50-200	200-500
Volume molto basso	5-50	50-200
Volume ultra basso	<5	<50

Fig. 10 Classificazione dei volumi di irrorazione. [6]

Considerando ciò, discutendo con Fabrizio, è sorto un possibile problema a cui si andrebbe incontro utilizzando dei volumi così bassi. Infatti, i prodotti liquidi utilizzati nei trattamenti effettuati con il trattore, sono studiati per essere impiegati diluiti in centinaia di litri di acqua. Molti di loro presentano una viscosità rilevante, infatti basti pensare che: Thiopron ha una viscosità dinamica di 89 mPas, mentre per prodotti come Heliocuire si arriva a 221 mPas. Per dare un riferimento di viscosità, il valore per l'olio di oliva è di circa 100 mPas.

Dovendone utilizzare, soprattutto durante la stagione calda, diversi litri per ettaro di questi prodotti, riducendo in maniera importante il quantitativo di acqua si rischierebbe di ottenere una miscela troppo densa che porterebbe quasi sicuramente ad avere dei mal funzionamenti degli ugelli con spruzzi irregolari e gocce di dimensioni diverse da quelle attese. Per questo si riscontra la necessità di un intervento a monte, ossia che i produttori di fitofarmaci, in vista di un futuro sviluppo dei trattamenti aerei, inizino a lavorare sulla sperimentazione di nuovi prodotti appositamente studiati per l'impiego con i droni.

## CAPITOLO 2: Il processo di atomizzazione

### 2.1 La formazione del droplet

#### 2.1.1 Introduzione

Un getto che viene sparato in un ambiente gassoso prima o poi va sempre incontro a rottura, tuttavia può essere soggetto a diversi fenomeni a seconda dell'efflusso seguito e portare alla formazione di gocce di dimensioni diverse.

Facendo una considerazione di tipo energetico, questo volume di liquido formatosi, cercherà di tendere al minimo di energia superficiale, quindi in assenza di altre perturbazioni le goccioline tenderanno ad assumere una forma sferica.

I parametri che intervengono nel fenomeno della formazione delle gocce, sono legati sia alle proprietà fisiche del liquido come: la *densità*, la *viscosità* e la *tensione superficiale* sia ai parametri che caratterizzano il flusso e l'ambiente esterno come: la *velocità* del liquido e la *pressione*. In particolare, poi intervengono anche fenomeni interni all'ugello quali la *cavitazione* e le *turbolenze*, generate da una particolare conformazione interna, che inducono il liquido a un particolare efflusso.

Quello che si vuole avere in agricoltura è un'elevata velocità relativa fra liquido e aria all'uscita dell'ugello, in modo da ottenere particelle molto piccole. Infatti, lo scopo dell'atomizzazione, è proprio quello di rompere il liquido in particelle, in modo da aumentare l'area superficiale riuscendo a coprire meglio la coltura che si intende trattare.

La rottura del getto per basse velocità di efflusso, è essenzialmente dovuto a *fenomeni oscillatori* legati a fenomeni interni che in condizioni favorevoli possono amplificarsi. Tuttavia, a velocità maggiori diventano molto importanti gli effetti causati dall'aria e legati alla velocità relativa all'interfaccia acqua-aria che sono predominanti a velocità molto elevate. Indipendentemente da come il foglio liquido si formi, quando incontra l'ambiente in cui viene espulso, la sua instabilità viene incrementata da disturbi di tipo aerodinamico che fanno diminuire il suo spessore portano alla sua perforazione e poi divisione successiva in fili e gocce di varie dimensioni, che possono poi andare incontro a rotture secondarie.

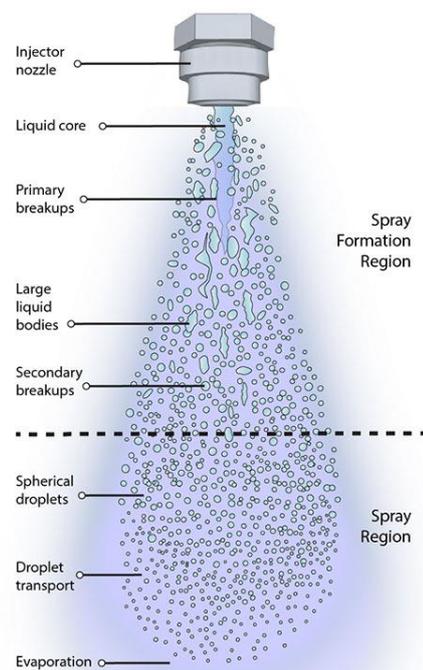


Fig. 11 Le varie fasi del processo di formazione del droplet.[7]

Da come è possibile vedere dalla Fig.11, quando il getto viene espulso dall'ugello nell'ambiente esterno, a diverse distanze dall'orifizio di uscita si verificano vari fenomeni. In particolare, in prossimità dell'uscita si assiste alla rottura del getto liquido, definita come *rottura primaria*. Questa prima rottura può generare gocce di elevate dimensioni, che possono poi ulteriormente disgregarsi tramite il processo della *rottura secondaria* e formare il vero e proprio *droplet*.

A distanza dall'ugello poi, quando lo spray è completamente formato, si possono verificare *fenomeni secondari* che dipendono dalle condizioni ambientali e climatiche quali il trasporto per mezzo delle correnti d'aria e l'evaporazione delle goccioline più fini.

A causa dell'elevata complessità dei dispositivi di spruzzo utilizzati nella pratica, per semplificare lo studio del fenomeno dell'atomizzazione, si ricorre a geometrie semplici quali: sfere, cilindri, lamine piane e coniche.

Nella pratica comune viene utilizzato spesso il termine *atomizzazione*, che ha un significato intrinseco di riduzione delle particelle fino agli atomi. Un termine più corretto, per descrivere i vari processi fisici con cui si ottengono particelle da un liquido è *frammentazione*.

Per studiare il fenomeno si ricorre alla valutazione dei due numeri adimensionali Reynold e Weber che possono essere espressi nella forma:

$$Re = \frac{F_{inerzia}}{F_{viscose}} = \frac{\rho_l \cdot v \cdot L}{\mu_l}$$

$\rho_l$ : densità del liquido [kg/m<sup>3</sup>]

v: velocità del liquido [m/s]

L: lunghezza caratteristica [m]

$\mu_l$ : viscosità dinamica del liquido [Pas]

$$We = \frac{F_{inerzia}}{F_{capillari}} = \frac{\rho_g (\Delta v)^2 D_0}{\sigma}$$

$\rho_g$ : densità del gas [kg/m<sup>3</sup>]

$\Delta v$ : differenza di velocità all'interfaccia [m/s]

$D_0$ : diametro iniziale della goccia [m]

$\sigma$ : tensione superficiale del liquido [N/m]

## 2.1.2 Rottura primaria

La *rottura primaria* è il primo passo per arrivare ad avere il *droplet*. È abbastanza difficile arrivare ad un modello fisico che descriva il fenomeno precisamente, quindi vengono utilizzati spesso dei modelli concettuali/statistici. Uno dei più comuni è quello a *cascata di frammentazione* di gocce che riducono progressivamente la loro dimensione e si basa sul modello proposto da Kolmogorov riguardante la frammentazione di particelle solide. Questo processo di cascata va avanti fino a quando, con la riduzione delle dimensioni delle particelle, le forze coesive e disgregatrici non raggiungono un equilibrio

La rottura primaria, quando le velocità in gioco non sono molto elevate, avviene a causa di *oscillazioni ondose* che si instaurano all'interno del liquido all'uscita dell'ugello, che sono provocate dalle forze coesive e distruttive legate alla tensione superficiale e alla velocità relativa fra le due fasi. Queste oscillazioni, in particolari condizioni dovute alle proprietà del liquido e alla forma dell'interfaccia, vengono amplificate e portano alla separazione delle particelle di quest'ultimo.

Due parametri utilizzati per analizzare il fenomeno sono: la lunghezza del getto integro all'uscita dell'ugello, che fornisce informazioni sullo sviluppo del disturbo e la grandezza delle goccioline, che invece fornisce informazioni sul moto ondoso che si instaura. Come detto in precedenza, nel fenomeno intervengono anche la cavitazione e la turbolenza, che però sono fenomeni fortemente legati alla geometria interna e quindi al particolare ugello. Volendo quindi fare una trattazione generale, si sono sviluppati dei modelli che non tengano conto di questi ultimi due fenomeni.

Questi fenomeni oscillatori che vengono ad instaurarsi, a seconda delle condizioni possono portare a varie situazioni [8]. Si sono sviluppati vari casi che analizzano questo moto ondoso, fra le trattazioni più interessanti ci sono quelle riguardanti onde assialsimmetriche nei due casi estremi di velocità. In particolare sono: quella di Rayleigh in cui le lunghezze d'onda sono riferite a basse velocità relative e quella di Ranz-Taylor che riguarda l'atomizzazione, in cui la velocità relativa è elevata. Per discernere i vari regimi viene adottato il parametro  $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$ , dove il numeratore rappresenta il perimetro del getto, mentre il denominatore è la lunghezza d'onda delle oscillazioni presenti nel getto.

Le condizioni in cui si hanno i due regimi sono:

- $\alpha < 1$  Regime di Rayleigh
- $\alpha \gg 1$  Regime di Ranz Taylor

Rayleigh utilizzando il metodo delle piccole perturbazioni, studiò le condizioni necessarie che devono verificarsi al fine di causare il collasso del getto liquido che non presenti viscosità, quando questo fuoriesce dall'ugello ad una bassa velocità [9].

Facendo considerazioni di carattere energetico, pose a confronto l'energia superficiale, la quale è direttamente proporzionale al prodotto tra superficie e tensione superficiale, confrontando il caso disturbato con quello in quiete.

Esprese poi il potenziale della configurazione disturbata come:

$$E_s = \frac{\pi\sigma}{2d}(\gamma^2 + n^2 - 1)b_n^2 \quad [9]$$

$E_s$ : superficie di energia potenziale

$d$ : diametro del getto

$b_n$ : costante dell'espansione della serie di Fourier

$\gamma$ : lunghezza d'onda adimensionale =  $2\pi/\lambda$

$n$ : numero intero positivo (zero incluso)

$\lambda$ : lunghezza d'onda del disturbo

Se si ha un disturbo non simmetrico,  $n \gg 1$  e quindi il potenziale introdotto assumerà sempre un valore positivo, ciò vuol dire che con un disturbo di questo tipo, il sistema rimarrà stabile.

Nel caso in cui  $n = 0$  e  $\gamma < 1$ , che è il caso di un disturbo simmetrico si avranno valori negativi di  $E_s$  e quindi con questo tipo di disturbo si avranno delle instabilità.

Per cui un getto che, seppur si presenti nell'ambiente di valle con una velocità minima, diventerà instabile per qualsiasi disturbo simmetrico che abbia una lunghezza d'onda  $\lambda > \pi d$ , che corrisponde ad avere un  $\gamma < 1$ . Tutto ciò fondamentalmente vuol dire che se si ha un disturbo con una lunghezza d'onda maggiore della circonferenza del getto, questo si propagherà. Fra queste oscillazioni, in particolare, quelle per le quali si vedono gli effetti maggiori sono tali per cui  $\alpha = 1/\sqrt{2}$ . In queste condizioni l'innesco dell'instabilità può essere dovuto anche ad una piccolissima perturbazione come può essere un'onda acustica o una disuniformità del flusso.

La teoria formulata da Rayleigh, però non teneva conto della viscosità dei liquidi, quindi venne ripresa ed estesa da Weber che prese come ipotesi che i disturbi causassero delle oscillazioni simmetriche del getto [9]. Il parametro utilizzato per studiare il comportamento è il  $\lambda_{min}$ , infatti se la lunghezza d'onda del disturbo iniziale assume un valore minore di  $\lambda_{min}$  le forze di superficie tendono a smorzare il disturbo, situazione opposta si ha invece se si supera il  $\lambda_{min}$  in quanto il disturbo viene amplificato. È presente poi un  $\lambda_{opt}$  che rappresenta le condizioni più favorevoli alla propagazione.

Per quanto riguarda il  $\lambda_{min}$  i valori trovati non si discostano troppo fra liquidi viscosi e non viscosi, tuttavia il valore ottimo della lunghezza d'onda cresce per i liquidi che presentano viscosità.

Un altro interessante aspetto analizzato è quello della resistenza causata dall'aria nel fenomeno di disintegrazione del getto in particelle. Infatti, l'effetto dell'aria è quello di abbassare il valore sia di  $\lambda_{min}$  che di  $\lambda_{opt}$  contribuendo a rendere instabile il getto.

Per un liquido non viscoso:

$$\lambda_{min} = \pi d$$

$$\lambda_{opt} = \sqrt{2\pi d} = 4.44d$$

Per i liquidi viscosi:

$$\lambda_{min} = \pi d$$

$$\lambda_{opt} = \sqrt{2\pi d} \left(1 + \frac{3\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma d}}\right)^{0.5}$$

Per quanto riguarda il valore minimo non cambia nulla, tuttavia la lunghezza d'onda ottima che è quella che crea l'instabilità massima ha un valore maggiore per i liquidi che presentano viscosità. Confrontandoli con gli studi effettuati da Rayleigh in precedenza, è interessante notare come nei liquidi non viscosi i risultati ottenuti siano molto simili, infatti il parametro  $\lambda/d$  che crea la massima instabilità ha un valore di 4,51 nel caso di Rayleigh e 4,44 nel caso di Weber. Analizzando inoltre gli effetti dell'attrito generato dall'aria sulla rottura del getto liquido e quindi della velocità relativa all'interfaccia, anche Weber trovò che l'aria riduce sia il valore di  $\lambda_{min}$  che quello di  $\lambda_{opt}$ .

Nella Fig.12 è possibile notare i vari regimi realizzabili partendo da un getto laminare, in particolare sull'asse orizzontale si trova la lunghezza di rottura superficiale, mentre in quello verticale la velocità media del liquido. Il fatto di avere un getto laminare permette di eliminare l'indeterminazione causata dalla transizione laminare-turbolento e semplificare la curva che presenta solo un massimo. In generale, si può vedere come dal punto in cui l'aria incomincia ad avere un ruolo significativo nel processo al regime di atomizzazione, si individui un regime detto: "Aerodinamicamente indotto", che può essere scomposto in due parti. Nella prima parte è più marcata la riduzione della lunghezza di rottura complessiva del getto, nella seconda invece l'effetto dell'aria è più marcato ed è la lunghezza di rottura superficiale a ridursi

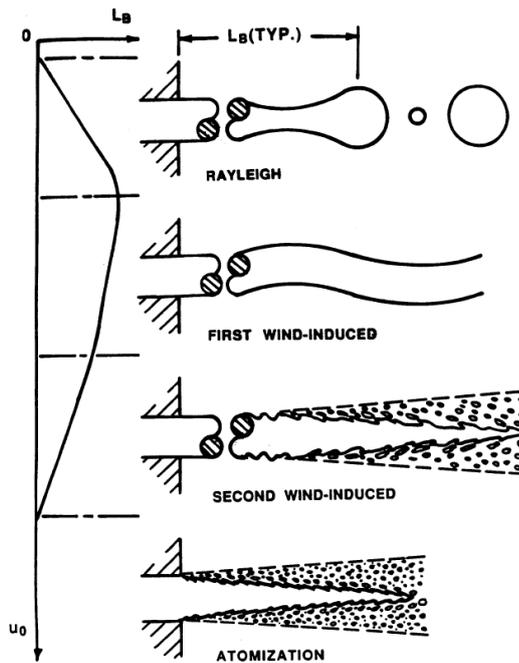


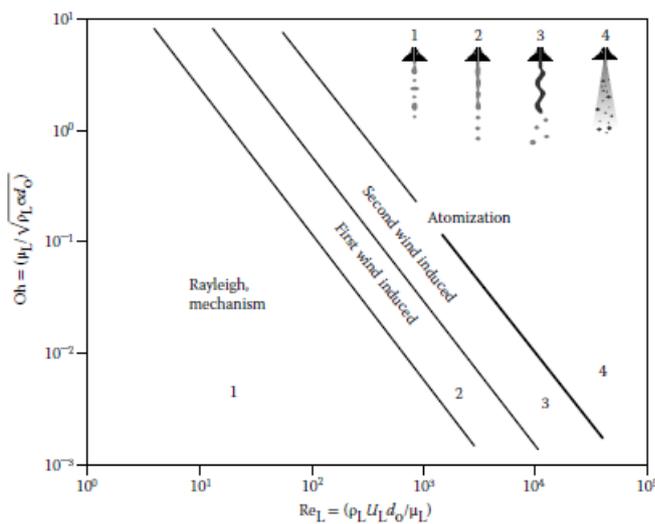
Fig. 12 Regimi riscontrabili partendo da un getto laminare. [8]

Analizzando la Fig.12 è possibile trovare i seguenti regimi:

- *Drop formation*: questo fenomeno dove non c'è l'influenza dell'aria, è stato studiato da Rayleigh e si verifica quando la portata è minima e quindi il numero di Reynolds assume valori piccoli. Spesso viene descritto con il termine *varicoso* riferendosi alla forma che il getto assume. A causa dell'interazione fra i disturbi che agiscono sul liquido e la tensione superficiale si forma un moto ondulatorio. Si può osservare una dipendenza lineare della lunghezza del getto indisturbato rispetto alla velocità. Questo fenomeno porta alla formazione di gocce piuttosto grandi, dell'ordine di qualche millimetro.
- *Drop formation with air influence*: quando la portata aumenta, l'aria comincia ad avere effetto sull'instabilità del getto. In particolare, rispetto al caso precedente le oscillazioni del getto vengono accentuate formando delle onde che fanno oscillare il getto con una forma *sinuosa*. In questa zona le deformazioni agiscono prevalentemente accorciando la lunghezza di rottura del getto nel complesso rispetto alla lunghezza di rottura superficiale. Come nel primo caso la disintegrazione avviene a distanza dallo sbocco, producendo gocce che hanno una grandezza simile al foro di uscita.
- *Drop formation due to the wawiness of the jet*: In questo caso le forze aerodinamiche aumentano e l'influenza della tensione superficiale nel contrastarle viene meno. Il getto si rompe a distanza dall'uscita e le gocce che si formano hanno diametri inferiori al diametro di uscita. In questo caso l'effetto dell'aria è più intenso ed agisce accorciando la lunghezza di rottura superficiale.
- *Atomization*: quando poi la velocità è sufficientemente elevata, il getto si disintegra in piccole particelle con un andamento altamente caotico e difficile da descrivere. Qui troviamo le normali condizioni operative degli atomizzatori.

Un'altra classificazione riguardante i vari modi di disintegrazione di un getto, può essere fatta utilizzando il numero di Reynolds ed il parametro introdotto da Ohnesorge, il quale analizzò le immagini ottenute fotografando un getto durante il processo di disintegrazione e indagò gli effetti di: gravitazione, inerzia, tensione superficiale e viscosità. Quest'ultima caratteristica del liquido agisce riducendo le instabilità che si vengono a creare nella struttura liquida. Utilizzando quindi l'analisi dimensionale classificò i vari meccanismi di rottura.

Analizzando il grafico che porta in ascissa il  $Re$  e in ordinata il parametro  $Oh$ , che tiene quindi conto della viscosità, si può notare come per un liquido ed un ugello dato andando ad incrementare la velocità e quindi il numero di Reynolds, muovendosi in orizzontale, si incontrano le varie fasi di rottura fino ad arrivare all'*atomizzazione*.



$$Oh = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma d_0}}$$

$\rho_L$ : densità del liquido  
 $\sigma$ : tensione superficiale  
 $d_0$ : diametro dell'orifizio  
 $\mu_L$ : viscosità dinamica

Fig. 13 Classificazione dei modi in cui avviene la disintegrazione: [9]

- 1: Rayleigh jet breakup
- 2: First wind-induced breakup
- 3: Second wind-induced breakup
- 4: Atomization

Come visto prima, a seconda del regime seguito dal getto, la rottura avverrà a distanze diverse rispetto alla sezione di uscita dell'ugello.

Analizzando la Fig.14 detta *curva di stabilità*, che non si limita solo al tratto laminare, è possibile avere un'idea dell'andamento di questa lunghezza di rottura.

Partendo dall'asse delle ordinate, la prima zona che si incontra è quella dovuta al *gocciolamento*. La lunghezza è minima in quando le velocità in gioco sono molto basse e il liquido tende ad accumularsi all'uscita fino a quando la forza di gravità prevale e la goccia precipita. Aumentando la velocità si incontra il punto A, dove si passa ad avere un getto in *condizioni laminari*.

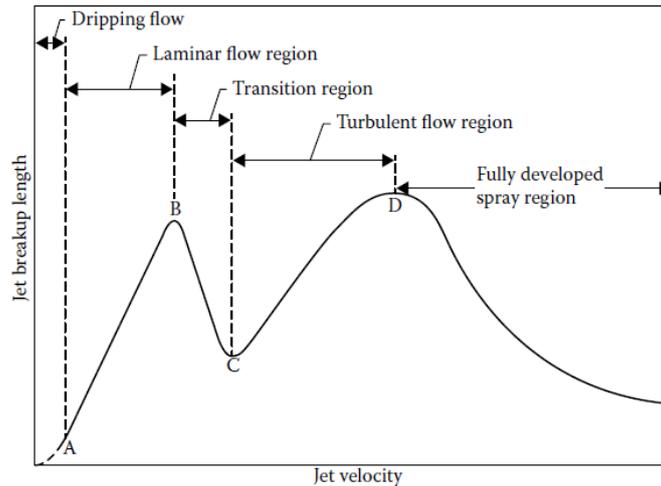


Fig. 14 Curva di stabilità che indica l'influenza della velocità sulla lunghezza di rottura del getto. [9]

Nella zona A-B il getto si disintegra seguendo l'andamento studiato da Rayleigh e la lunghezza alla quale avviene la rottura è direttamente proporzionale alla velocità di efflusso.

Arrivati al punto B, c'è un cambiamento nel meccanismo di rottura e si passa da *varicoso* a *sinuoso*, in quanto l'impatto dell'aria sulla superficie del getto comincia a farsi sentire. Alcuni ipotizzano anche che questo punto sia dovuto all'inizio della turbolenza che comincia a presentarsi, molto probabilmente è dovuto ad entrambi i meccanismi.

Nel tratto successivo B-C, si ha poi la transizione fra laminare e turbolento dove la lunghezza si accorcia in quanto si hanno dei disturbi forti che provocano instabilità.

Nel tratto *turbolento* poi, il liquido si presenta all'uscita dell'ugello con una superficie corrugata causata dall'efflusso caotico che presenta fluttuazioni nelle componenti di velocità. A differenza dell'*efflusso laminare* dove abbiamo un getto liscio e trasparente, in quello *turbolento* la superficie si presenta bianca a causa dello *scattering* della luce nelle increspature. Da questa zona in poi il processo è altamente caotico e di difficile interpretazione in quanto oltre ad oscillazioni simmetriche si trovano anche oscillazioni trasversali.

Quando ci si trova ad alte velocità, ossia nella zona descritta come detto in precedenza anche da Ranz-Taylor, le onde hanno una crescita molto rapida e si possono trovare a distanze inferiori rispetto al diametro dell'ugello. Questo modello non descrive le modalità con cui l'onda riesce a rompere la superficie del getto, tuttavia i dati sperimentali e le previsioni teoriche concordano sul fatto che qualsiasi sia la sua evoluzione rappresenta la causa primaria di rottura. In questo ultimo caso, si considera come lunghezza di rottura il luogo dei punti, perpendicolare all'asse dell'ugello, dove per la prima volta il liquido non si trova più a contatto con il getto fuoriuscente dall'ugello. È quindi osservabile all'interno dello spray un cuore liquido, che soprattutto in passato, è stato individuato con difficoltà per mezzo di analisi ottiche a causa della presenza della nube di goccioline periferica.

Analizzando il grafico in questo tratto è possibile inoltre notare come aumentando la velocità, la lunghezza di rottura diminuisca. Questo è causato dal fatto che velocità più elevate favoriscono una crescita più rapida delle onde che generano la disgregazione.

Questo fenomeno comunque, non è ancora stato totalmente definito e ci sono varie proposte riguardo ai fattori che generano la rottura del getto. Si pensa che non ci sia una sola causa, ma la concomitanza di vari fenomeni quali: effetto dell'aria, turbolenza e cavitazione.

### 2.1.3 Effetto della velocità sull'efflusso

Il getto può uscire dall'orifizio dell'ugello secondo un deflusso *laminare* o *turbolento*. Il primo caso è favorito quando: non ci sono disturbi nel flusso, si hanno profili delle tubature arrotondate e il liquido presenta una buona viscosità. Quindi le particelle defluiscono in modo ordinato seguendo una traiettoria rettilinea. Il secondo caso invece si manifesta con più facilità se si hanno: delle elevate velocità in gioco, tubature larghe, rugosità elevata, cambiamenti repentini di sezione e protuberanze che si estendono all'interno del flusso.

La distinzione fra flusso *laminare* e *turbolento* può essere fatta confrontando il valore del  $Re$  con quello critico, che può essere definito come il valore al di sotto del quale in un lungo tubo rettilineo eventuali disturbi vengono attenuati. Tuttavia, nella realtà può verificarsi ad esempio che un flusso in assenza di disturbi rimanga laminare per valori di  $Re$  superiori a quello critico. In queste condizioni però anche la più piccola perturbazione può innescare la transizione.

Per un dato ugello, visto che parametri geometrici rimangono costanti, il tipo di efflusso dipende fondamentalmente dal  $Re$ .

Dalla Fig.15 si possono notare i profili di velocità del flusso. In particolare, salta all'occhio come in un *efflusso laminare*, la velocità vari in maniera parabolica, il che porta ad avere un valore nullo avvicinandosi alle pareti. Quando il flusso sbocca in un ambiente in cui l'aria è in stato di quiete, la velocità relativa all'interfaccia sarà prossima allo zero per cui non avverrà subito l'atomizzazione causata dall'attrito con l'aria. Anche se tuttavia, ad una certa distanza la concomitanza fra attrito con l'aria e tensione superficiale manderà in instabilità il getto che si disintegrerà attraverso un diverso fenomeno.

Quando invece ci si trova in *campo turbolento*, all'uscita dell'orifizio la componente di velocità che si trova a contatto con l'aria è elevata e porta alla distruzione del film che si crea all'interfaccia e conseguentemente del getto intero. In particolare, è curioso notare che se ci si trovasse nel caso di flusso completamente turbolento, l'attrito aerodinamico non sarebbe essenziale per la rottura in goccioline, infatti anche se il getto venisse a trovarsi nel vuoto si disintegrerebbe

unicamente sotto l'azione dell'agitazione creata dalla turbolenza, proprio in prossimità dell'uscita.

Se invece il flusso è *semi-turbolento* si forma un anello esterno laminare che previene la distruzione del film di interfaccia causata dal moto turbolento interno. La velocità relativa è infatti minima e quindi gli effetti dell'attrito con l'aria sono ridotti, per cui la disintegrazione in questo caso non avverrà in prossimità dell'uscita. Più a valle tuttavia, il cuore turbolento riesce a superare la zona laminare ed avviene la rottura.

Quindi oltre ai fenomeni espressi in precedenza, anche l'evoluzione del profilo di velocità a valle dell'orifizio di uscita, porta a delle instabilità. Infatti, quando il liquido abbandona le pareti

dell'ugello si verifica una redistribuzione dei profili di velocità, che avviene tramite un trasferimento di quantità di moto fra i diversi livelli interni di liquido che può portare alla generazione di disturbi interni che lavorano in concomitanza con l'effetto dell'aria.

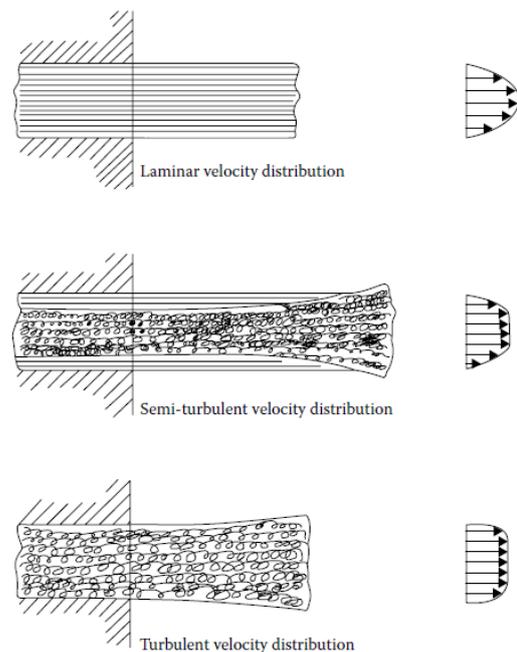


Fig. 15 Distribuzione della velocità nei vari efflussi. [9]

## 2.1.4 Rottura secondaria

Una volta formate le goccioline, se hanno dimensioni abbastanza elevate, possono andare incontro ad una rottura secondaria dovuta principalmente all'azione delle forze aerodinamiche. Il liquido, sottoposto ad un disturbo all'interfaccia, reagisce tramite l'azione della tensione superficiale con l'insorgere di una *pressione* detta *capillare* che si oppone alla perturbazione.

Si può esprimere questa pressione correlandola alle caratteristiche geometriche dell'interfaccia ed alla tensione superficiale tramite l'*equazione di Laplace*, da cui si può ottenere la forza dovuta alla tensione superficiale.

Si considera quindi il caso di una goccia rappresentabile come una sfera, la cui *energia superficiale* si può esprimere come il prodotto di  $\sigma$  per la superficie:  $\sigma 4\pi R^2$ .

Quindi la variazione di energia associata ad una riduzione del raggio della sfera  $dR$ , dovuto alla tensione superficiale sarà:  $\sigma 8\pi R dR$ . Che verrà bilanciata da una variazione di pressione  $\Delta p$  nell'interfaccia.

Eguagliando il lavoro svolto dalla tensione superficiale per bilanciare questa pressione e la variazione di energia si ha:

$$\Delta p 4\pi R^2 dR = \sigma 8\pi R dR$$

Da cui per una sfera si ha:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$$

All'equilibrio, le forze di pressione aerodinamica e quelle dovute alla tensione superficiale devono controbilanciarsi. Tuttavia, quando la goccia ha un'elevata velocità, il valore delle forze aerodinamiche esercitate dall'aria sulla superficie esterna aumenta e può diventare così elevato da non verificarsi più l'equilibrio. L'effetto causato dall'aria in queste condizioni è quello di deformare la goccia, che andrà poi incontro a rottura. Arrivati a questo punto, essendo diminuito il diametro si arriverà ad una successiva condizione di stabilità.

Grazie alle fotografie ad alta velocità, si è scoperto che le gocce a seconda delle condizioni del flusso che si viene a creare intorno a loro, possono disgregarsi in maniera differente.

In particolare, Hinze identificò tre tipi fondamentali di deformazione che sono rappresentati in Fig.16.

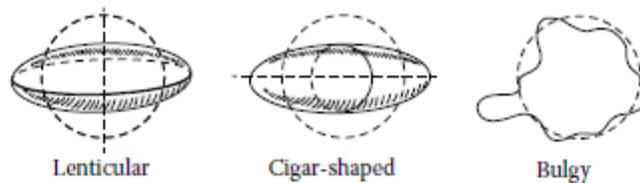


Fig. 16 I vari tipi di deformazione a cui sono sottoposte le gocce. [9]

Si può arrivare a deformazione di tipo:

- *Lenticolare*: a causa delle pressioni aerodinamiche e dello stress viscoso prodotto da flussi di aria rotanti o paralleli, la goccia viene appiattita fino a formare un ellissoide. A causa poi delle azioni interne, questa può evolvere in un toroide che può allungarsi ulteriormente e disintegrarsi in goccioline fini.
- *Forma di sigaro*: nel caso in cui si trovino dei flussi piani iperbolici e di Couette, la goccia assume la forma di un sigaro che può collassare disgregandosi in particelle più piccole.
- *Rigonfia*: a causa dell'irregolarità del flusso di aria, la superficie della goccia da liscia comincia a diventare corrugata e vengono a formarsi cavità e rigonfiamenti che possono staccarsi e formare goccioline.

Per liquido con bassa viscosità, in particolare, il fenomeno dipende principalmente dalle forze di tipo aerodinamico e dalla tensione superficiale del liquido.

Per discernere i vari comportamenti delle gocce, questi due effetti possono essere riassunti dal *numero di Weber* in quanto maggiore è il suo valore e più sarà accentuato l'effetto deformante della pressione esterna causata dall'aria rispetto all'effetto stabilizzante della tensione superficiale.

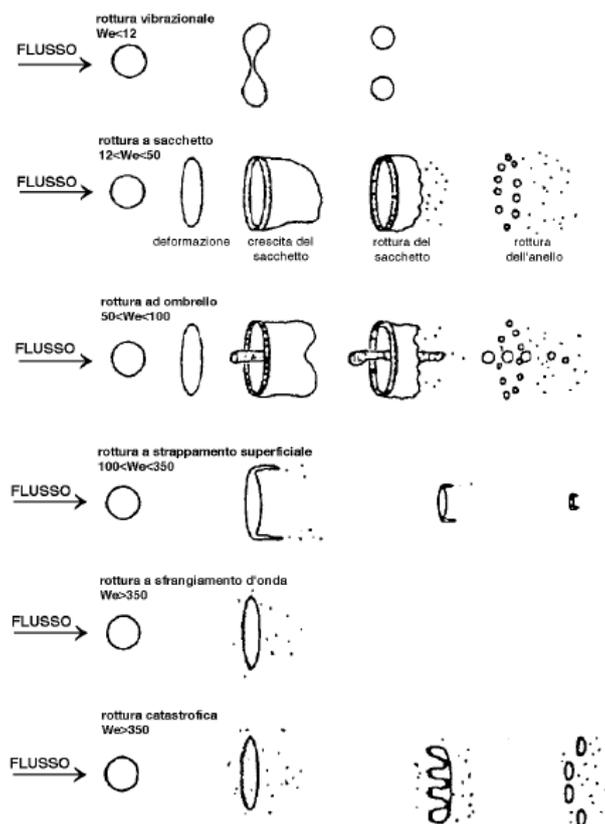


Fig. 17 Meccanismi di disintegrazione delle gocce. [8]

A seconda del valore assunto dal numero di Weber, si può assistere a diversi meccanismi di rottura come rappresentato in Fig.17, in cui l'attrito con l'aria riveste un ruolo sempre più importante.

Analizzando una singola particella sferica come in Fig.18, le forze causate dalle azioni aerodinamiche agenti sulla goccia, possono essere espresse come:

$$F_{\text{drag}} = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot U_R^2 \cdot A_t \quad [11]$$

$C_D$ : coefficiente di resistenza aerodinamica

$\rho$ : densità del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$U_R$ : differenza di velocità all'interfaccia [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$A_t$ : area di riferimento [ $\text{m}^2$ ]

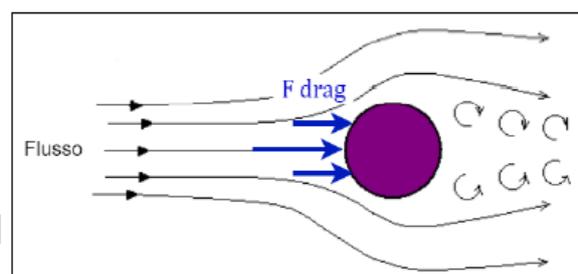


Fig. 18 Forze fluidodinamiche agenti sulla goccia. [11]

Come rappresentato nella formula,  $F_{drag}$  è proporzionale alla sezione della gocciolina di interesse. Ciò vuol dire che più si ridurranno le dimensioni della stessa e minore sarà l'effetto della forza aerodinamica.

Le forze causate invece dalla tensione superficiale sono:

$$F_{capillare} = L \cdot \sigma$$

L: lunghezza della linea al di sopra della quale agisce la forza [m]

$\sigma$ : tensione superficiale [N/m]

Considerando le due formule precedenti, si ottiene la condizione di rottura causata principalmente da effetti aerodinamici quando:  $F_{drag} = F_{capillare}$ .

Da ciò, eguagliando le due espressioni scritte in precedenza e facendo qualche sostituzione, è possibile ottenere l'espressione per la quale il numero di Weber raggiunge il valore critico, al di sotto del quale se avviene la rottura non è legata all'azione diretta della corrente d'aria, ma a fenomeni di instabilità in cui in seconda battuta può intervenire anche l'interazione con l'aria. Per i liquidi poco viscosi, con velocità nell'ordine delle decine di metri al secondo, questo valore può essere compreso fra 10 e 20.

Il *Weber critico* è esprimibile come:

$$We_g^c = \frac{\rho_g U_R^2 D}{\sigma} = \frac{8}{C_D} \quad [8]$$

Da questa relazione, inoltre, è possibile ricavare anche il diametro massimo sotto al quale le gocce sono stabili:

$$D_{max} = \frac{8\sigma}{C_D \cdot \rho_A \cdot U_R^2} \quad [8]$$

Un altro parametro importante che entra in gioco nella rottura delle gocce, è la viscosità del liquido analizzato. È stata ricavata da Brodkey una correlazione sperimentale per un sistema liquido-gas che può essere analizzata citando il numero Z di Ohnesorge  $Z = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma D}}$ . In particolare, dal grafico in Fig.19 che riporta Oh in ascisse e  $We_c$  in ordinata è possibile notare come fino a valori prossimi a 0,1 Oh, il Weber critico rimanga su valori bassi, per poi crescere molto rapidamente quando il valore delle ascisse aumenta, assumendo un andamento asintotico. Ciò è dovuto proprio alla viscosità, infatti più questa è elevata, più la rottura risulta difficile e al limite impossibile.

Da qui si presenta il problema che dovendo concentrare il più possibile la soluzione con cui caricare il serbatoio del drone, si potrebbe ottenere un liquido abbastanza viscoso che genererà particelle tendenzialmente più grossolane.

La forma analitica che rappresenta la correlazione di Brodkey è esprimibile nella forma:

$$We_g^c = 12(1 + 1.077 \cdot Oh^{1.6}) \quad [8]$$

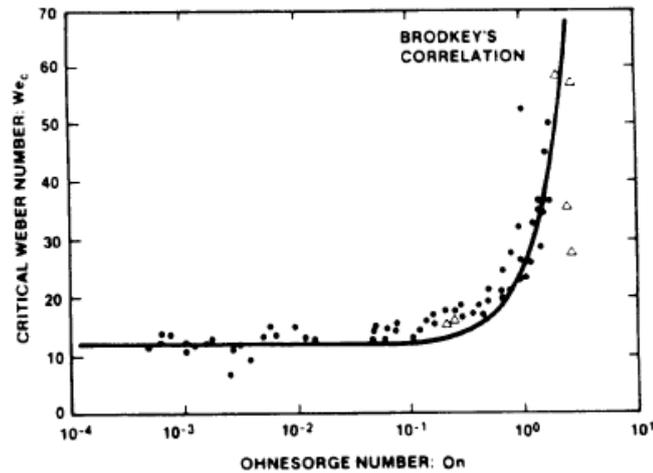


Fig. 19 Correlazione di Brodkey.[8]

È molto interessante inoltre analizzare l'effetto della velocità e i vari valori di velocità in gioco nel fenomeno della rottura.

Analizzando infatti il grafico Fig. 20, riferito a un liquido con una tensione superficiale pari a circa 0.02 N/m, dove la linea tratteggiata rappresenta il Weber critico: salta subito all'occhio come la dimensione delle gocce sia fortemente influenzata dalla velocità del liquido.

Infatti, analizzando per esempio la linea a 50 m/s è possibile notare come le gocce che si trovino all'uscita dell'ugello con un diametro superiore ai 100 micron siano sempre instabili. Mentre per il caso a 5 m/s si debba addirittura arrivare a circa 10 mm per raggiungere il Weber critico.

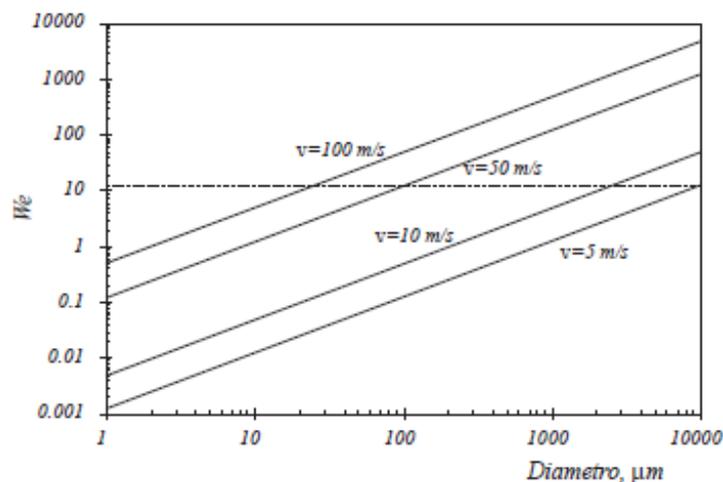


Fig. 20 Diametro per il quale viene raggiunto il Weber critico per diverse velocità delle gocce. [8]

## 2.2 Parametri per la misurazione del droplet

### 2.2.1 Introduzione alla rappresentazione

Quando il liquido passa all'interno dell'ugello, viene disintegrato in particelle molto fini che vengono valutate attraverso il diametro medio in micron.

Nella realtà tuttavia, nello stesso ugello nel medesimo istante, a causa dei processi caotici che portano alla formazione delle gocce, si producono particelle che ricadono in un intervallo dimensionale che può andare da qualche micron, fino a circa  $500 \mu m$ .

Quindi data la natura eterogenea dello *spray*, può essere rappresentato tramite uno spettro distribuito delle dimensioni delle particelle rispetto a determinati valori medi. La rappresentazione della distribuzione può essere fatta tramite un istogramma come in Fig. 21 che porta nelle ordinate il numero o il volume di particelle che ricadono in un certo intervallo dimensionale dato sulle ascisse da un valore centrale  $D$  e dai limiti  $D - \frac{\Delta D}{2}$  e  $D + \frac{\Delta D}{2}$ .

Se il campione è abbastanza grande, prendendo un  $\Delta D$  molto piccolo, invece si può ottenere una distribuzione di frequenza come mostrato in Fig. 22.

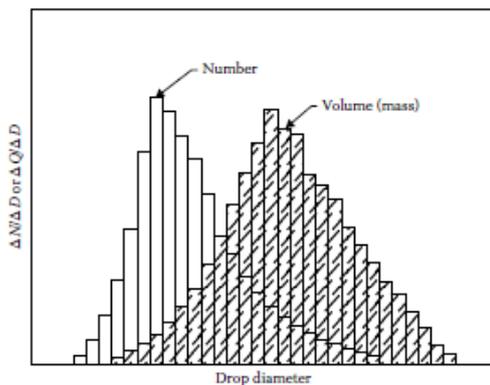


Fig. 21 Istogramma delle dimensioni delle goccioline basato sul numero e sul volume. [9]

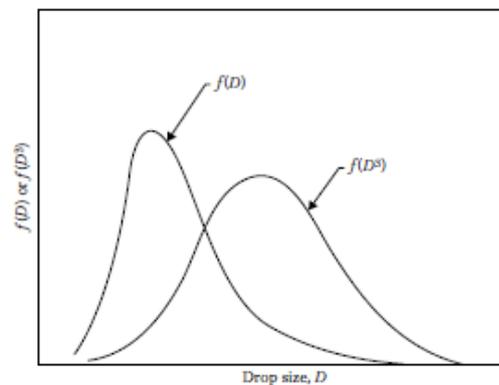


Fig. 22 Distribuzione di frequenza delle goccioline basata sul numero e sul volume. [9]

Il numero di particelle in ordinata inoltre può essere espresso in vari modi come: il numero di particelle avente un certo diametro, la frazione sul totale o come frazione sul totale per classe dimensionale.

Per capire meglio quale sia l'andamento delle dimensioni e studiare meglio i fenomeni che lo influenzano, si può anche ricorrere ad una distribuzione cumulativa che è l'integrale della curva di frequenza e rappresenta la percentuale sul totale di goccioline che stanno al di sotto di una certa dimensione o la percentuale della superficie o del volume contenuta nello spray al di sotto di una certa dimensione delle particelle.

I dati sullo spray vengono raccolti tramite il sistema *PDPA* (Phase Doppler Particle Analyzer), il quale permette di avere informazioni riguardo alla velocità, grandezza delle particelle e portata volumica. Questo può presentare 2 o 4 raggi laser che si intersecano e possono raccogliere informazioni riguardanti la nube senza interferire con quest'ultima.

Un problema che si può presentare negli interferometri che rilevano le particelle, o nei sistemi che le contano a partire da un'immagine o un ologramma, è la presenza di alcune gocce molto grandi. Queste gocce, seppur presenti in piccoli numeri, possono causare delle discontinuità evidenti nella distribuzione cumulativa ottenuta semplicemente con il conteggio statistico dei dati. Per ovviare a ciò è buona norma rappresentare i dati raccolti con un'opportuna funzione matematica. In generale vengono utilizzate: la distribuzione normale, log-normale, Nukiyama-Tanasawa, Rosin-Rammler e la upper-limit distribution.

Inoltre, poiché il processo di atomizzazione non è ancora del tutto chiaro e non esiste una funzione che univocamente possa rappresentare i dati in maniera soddisfacente, è quindi necessario provare diverse funzioni per adattare al meglio al caso studiato. I motivi per cui si può preferire una funzione all'altra, visto che non ci sono evidenze che una sia in generale migliore delle altre, sono: la semplicità in termini matematici, la facilità con cui può essere manipolata nei calcoli e la consistenza rispetto al fenomeno fisico studiato.

### 2.2.2 Il mean diameter

Come detto prima, le gocce create da un ugello non sono tutte uguali, ma si è di fronte ad un *processo stocastico*. Quindi vengono definite per mezzo di una funzione di densità in termini probabilistici delle dimensioni, per cui piuttosto che utilizzare le dimensioni effettive, nelle distribuzioni delle particelle, è più indicato utilizzare il diametro medio.

Il *mean diameter* viene calcolato con la seguente formula:

$$(\mathbf{D}_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^a (dN/dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN/dD) dD} \quad [9]$$

I valori a e b sono scelti in base all'effetto che si vuole studiare e la loro somma viene definita come *ordine del mean diameter*.

Può anche essere espresso nella forma:

$$D_{ab} = \left[ \frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{1/(a-b)} \quad [9]$$

Dove  $i$  rappresenta la gamma dimensionale  $i$ -esima,  $N_i$  è il numero di goccioline nella gamma dimensionale  $i$  e  $D_i$  è il suo diametro mediano.

Nella tabella sottostante sono riportati i vari valori degli indici  $a$  e  $b$  da adottare a seconda del caso esaminato.

$A$	$B$	$a + b$ (Order)	Symbol	Name of Mean Diameter	Expression	Application
1	0	1	$D_{10}$	Length	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Comparisons
2	0	2	$D_{20}$	Surface area	$\left( \frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i} \right)^{1/2}$	Surface area controlling
3	0	3	$D_{30}$	Volume	$\left( \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i} \right)^{1/3}$	Volume controlling, e.g., hydrology
2	1	3	$D_{21}$	Surface area-length	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$	Absorption
3	1	4	$D_{31}$	Volume-length	$\left( \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i} \right)^{1/3}$	Evaporation, molecular diffusion
3	2	5	$D_{32}$	Sauter mean diameter (SMD)	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	Mass transfer, reaction
4	3	7	$D_{43}$	De Brouckere or Herdan	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$	Combustion equilibrium

Fig. 23 Valori caratteristici dei parametri  $a$  e  $b$ . [9]

Analizzando la tabella in Fig.23, è possibile trovare:

- $D_{10}$  : è il valore medio statistico considerando le dimensioni di tutte le gocce dello spray, ossia il diametro medio aritmetico.
- $D_{20}$  : è il diametro rappresentativo di una goccia, che moltiplicato per il numero di gocce totali, fornisce il valore dell'area superficiale totale dello spray.
- $D_{30}$  : è il diametro rappresentativo di una goccia, il cui volume se moltiplicato per il numero di gocce contenute nello spray, fornisce il valore del volume totale dello spray.
- $D_{32}$  : viene chiamato diametro medio di *Sauter* (SMD), che è il diametro di una goccia per la quale il rapporto tra volume e area superficiale è uguale al rapporto fra la somma dei volumi e quella delle superfici dell'intero spray. Esso è particolarmente utilizzato per caratterizzare il comportamento dello spray relativamente ai processi di scambio di materia e di calore.

I vari diametri inoltre, sono utili per esaminare alcuni fenomeni fisici. Per esempio:  $D_{31}$  è rappresentativo del tasso di evaporazione,  $D_{21}$  può essere correlato al numero di Weber, mentre  $D_{32}$  al rapporto fra forze di inerzia e trascinamento aerodinamico.

### 2.2.3 I diametri rappresentativi

Per gli scopi ingegneristici inoltre, la distribuzione della taglia di goccioline può venir rappresentata in maniera più concisa come funzione di due parametri: un diametro rappresentativo e l'altro la gamma dimensionale in cui possono essere contenute le particelle.

Utilizzando una distribuzione di Rosin-Rammler i diametri rappresentativi possono essere individuati nella curva di frequenza come espresso in Fig.24.

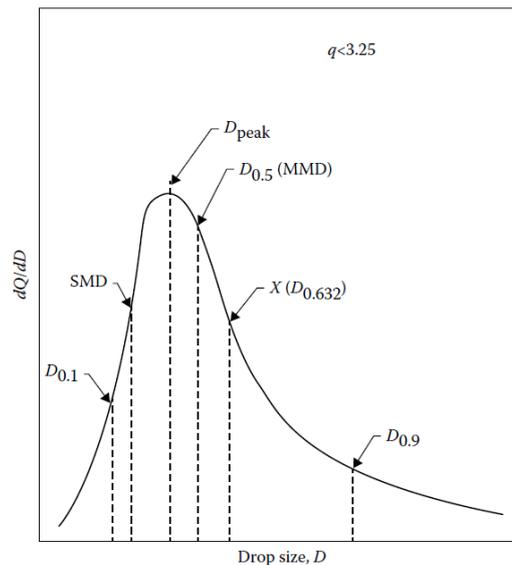


Fig. 24 Posizionamento dei diametri rappresentativi in una distribuzione di frequenza assumendo una distribuzione di Rosin-Rammler. [9]

- $D_{0.1}$ : diametro rappresentativo che indica che il 10% delle goccioline presenti sul totale del volume di liquido hanno un valore inferiore a quello dato.
- $D_{0.5}$ : viene definito come VMD (volume median diameter), ed è il parametro che divide il volume o la massa considerata in due. Il 50% delle gocce avrà un diametro inferiore al valore dato, mentre l'altro 50% avrà un valore superiore.
- $D_{0.632}$ : viene utilizzato per calcolare alcuni parametri nella distribuzione di Rosin-Rammler.
- $D_{0.9}$ : indica che il 90% delle particelle presenti nel volume di liquido, hanno un diametro inferiore al valore dato.
- $D_{0.999}$ : indica che il 99,9% delle particelle presenti nel volume di liquido, hanno un diametro inferiore al valore dato.
- $D_{peak}$ : è il picco della curva di distribuzione di frequenza.

Partendo dai diametri rappresentativi, un parametro che viene utilizzato per indicare la variabilità del droplet nella nube è il *relative span factor*. Viene calcolato come:

$$R_s = \Delta = \frac{D_{0,9} - D_{0,1}}{D_{0,5}} \quad [9]$$

Valori piccoli dello *span factor* indicano una maggior uniformità dimensionale nello spruzzo, questo è dovuto al fatto che i vari diametri rappresentativi hanno valori più prossimi uno con l'altro. Se si vuole uno spruzzo più regolare bisogna attenersi a valori piccoli, in quanto avendo goccioline con dimensioni simili, queste tenderanno a comportarsi in maniera simile, seguendo traiettorie simili. Al contrario se si hanno goccioline di dimensioni molto diverse, a seconda della dimensione, queste tenderanno a raggrupparsi in determinate zone causando disuniformità nello spruzzo e fenomeni indesiderati.

Per esempio, partendo da due getti con un  $D_{0,5}$  di  $300\mu$  con il primo avente un  $D_{0,1} = 150$   $D_{0,9} = 800$  e l'altro con  $D_{0,1} = 200$   $D_{0,9} = 600$  si ottengono valori dello span factor rispettivamente di 2,2 e 1,3. Il che vuol dire che il secondo avrà una distribuzione più uniforme, che può garantire una miglior copertura e una potenziale riduzione del drift.

Va detto quindi che la distribuzione delle goccioline non può essere univocamente definita tramite un parametro, infatti due spray non possono generalmente essere definiti simili solo perché hanno uno stesso valore dell'SMD o del VMD.

## CAPITOLO 3: Gli ugelli irroratori

---

### 3.1 Caratterizzazione degli ugelli

Data una certa tipologia e geometria dell'ugello, si ha la necessità di avere degli strumenti che consentano di determinare la portata smaltita in funzione della pressione a cui viene alimentato.

In particolare: da com'è stato suggerito dal dott. Minuto del CERSAA di Albenga, da Salvarani e Abbà che sono due aziende che commercializzano prodotti per l'agricoltura, ci si è concentrati maggiormente sullo studio degli ugelli a cono [12].

Proprio questi ugelli hanno un principio di funzionamento particolare: prima dell'orifizio di uscita è posizionata una camera detta di *vorticazione* dove grazie a particolari geometrie e bocche di ingresso, al liquido viene impressa oltre alla normale componente assiale di velocità, anche una componente tangenziale. Proprio a causa di questa *vorticazione*, nel liquido vengono a generarsi dei fenomeni altamente complessi che rendono difficile la trattazione teorica.

Negli anni sono stati eseguiti diversi lavori su questo argomento, con lo scopo di riuscire a trovare dei coefficienti in grado di fornire delle relazioni utilizzabili per caratterizzare l'efflusso del liquido in funzione dei parametri operativi dell'ugello. Inizialmente sono stati fatti degli studi preliminari che trascuravano l'attrito, tuttavia ben presto ci si accorse che era una semplificazione troppo grande, così queste trattazioni hanno lasciato spazio a relazioni quantitative che tenessero conto della relazione fra le dimensioni dell'ugello e altri parametri come le proprietà del liquido stesso.

Fra le varie semplificazioni, Taylor mostrò che seppur il movimento della maggior parte del liquido presente nella camera può essere nel complesso considerato irrotazionale, l'effetto della viscosità che agisce sullo strato in prossimità delle pareti ha un'influenza che non può essere trascurata. Infatti, il liquido a contatto con la parete non riesce ad avere un regime di rotazione sufficientemente elevato da vincere il gradiente di pressione e procedere con una traiettoria circolare, quindi si può instaurarsi un flusso diretto verso l'orifizio di uscita di forma rettilinea attraverso lo strato limite.

Lavori successivi hanno poi dimostrato che nel caso reale, si nota la formazione all'interno della camera di turbolenza, di un cuore aeriforme con il liquido che rimane incollato alle pareti. Vista la difficile rappresentazione del fenomeno, queste trattazioni si basavano su alcune semplificazioni che non permettevano di rappresentare a pieno la realtà, tuttavia verificandole sperimentalmente, riuscivano comunque a fornire una buona rappresentazione del fenomeno.

Con lo sviluppo dei software e il miglioramento della potenza di calcolo dei computer, si è piano abbandonato questo approccio teorico per passare ad una progettazione degli ugelli basata sulle simulazioni.

### 3.1.1 Approccio teorico al calcolo del coefficiente $C_D$

Il *coefficiente di scarico* rappresenta il rapporto fra il liquido che riesce a passare nell'ugello nel caso reale rispetto a quello teorico, il suo valore in ugelli conici è generalmente basso, in quanto la formazione di un cuore aeriforme nella *camera di vorticazione* diminuisce la sezione di passaggio del liquido.

Giffen and Muraszew partendo da un ugello con una geometria molto semplificata Fig.25 arrivarono ad una formulazione che può essere applicata anche a ugelli più complessi [9].

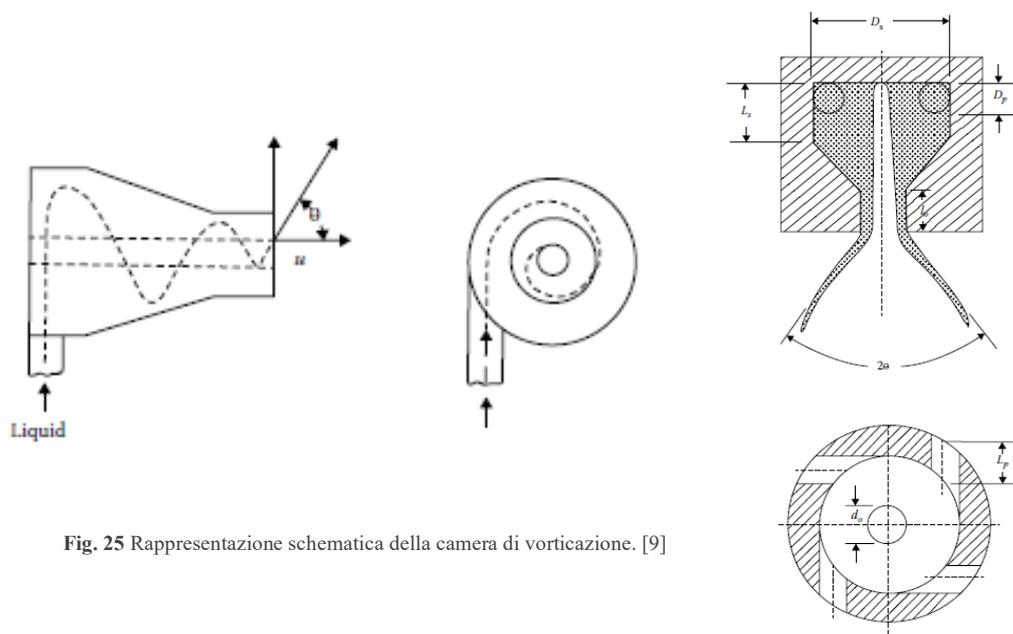


Fig. 25 Rappresentazione schematica della camera di vorticazione. [9]

Com'è possibile vedere dall'immagine, il fluido nel canale ha un movimento a spirale che forma un vortice. Considerando il fatto che non ci siano azioni esterne esercitate sul fluido all'interno della camera, il momento angolare si conserva ed è possibile scrivere la seguente relazione:

$$vr = v_i R_s \quad (1)$$

$v_i$ : velocità all'ingresso della camera [m/s]

$R_s$ : raggio all'ingresso della camera [m]

Dall'equazione della portata, si può esprimere  $v_i$  come:

$$v_i = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L A_p} \quad (2)$$

$A_p$ : sezione della porta di ingresso [ $m^2$ ]

$\dot{m}_L$ : portata di liquido [ $kg/s$ ]

$\rho_L$ : densità del liquido [ $kg/m^3$ ]

Analizzando le equazioni precedenti, si può comprendere il fatto che al centro della camera venga a crearsi un cuore aeriforme, infatti per  $r = 0$  la velocità dovrebbe tendere ad  $\infty$ .

Assumendo inoltre che all'interno dell'ugello non si verificano dissipazioni di alcun tipo, il carico totale si conserva all'interno della camera e può essere considerato pari alla pressione di iniezione. Quindi, la pressione totale può essere espressa per qualsiasi punto dell'orifizio utilizzando le due componenti della velocità tramite Bernoulli come:

$$P = p + \frac{1}{2}\rho_L u^2 + \frac{1}{2}\rho_L v^2 = cost \quad (3)$$

$u$ : componente assiale nell'orifizio [ $m/s$ ]

$v$ : componente tangenziale [ $m/s$ ]

$p$ : pressione statica del liquido [ $Pa$ ]

Per un vortice libero si può scrivere che  $p + \frac{1}{2}\rho_L v^2 = cost$ , quindi in caso stazionario, in presenza di un liquido non viscoso, la componente assiale è costante nell'anello liquido intorno al cuore aeriforme per qualsiasi raggio.

Analizzando poi il cuore aeriforme, trovandosi in comunicazione con l'esterno, la sua pressione sarà uguale a quella dell'ambiente con cui comunica e quindi la pressione  $p$  sarà nulla, così l'espressione introdotta in precedenza (3) potrà essere scritta come:

$$P = \frac{1}{2}(\rho_L u_{ra}^2 + \rho_L v_{ra}^2) \quad (4)$$

Dove  $u_{ra}$  può essere sostituito con  $u$ , visto che la componente di velocità rimane costante e può essere espressa nell'orifizio come:

$$u = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L(A_0 - A_a)} \quad (5)$$

Dalle equazioni (1) e (2) precedentemente presentate è possibile ottenere:

$$v_{ra} = \frac{\dot{m}_L R_s}{\rho_L A_p r_a} \quad (6)$$

A questo punto, sostituendo la (5) e la (6) nella (4), la pressione totale è esprimibile come:

$$P = \frac{1}{2} \rho_L \left[ \left( \frac{\dot{m}_L}{\rho_L (A_0 - A_A)} \right)^2 + \left( \frac{\dot{m}_L R_s}{\rho_L A_p r_a} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Poiché la portata, conoscendo  $C_D$  è esprimibile tramite:

$$\dot{m}_L = C_D A_0 \sqrt{2 \rho_L P} \quad (8)$$

Sostituendo quindi la portata (8) nell'equazione della pressione (7), si può ottenere la seguente relazione dove  $X = A_a/A_0$  e  $K_1 = A_p/\pi r_0 R_s$ :

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{1}{K_1^2 X} + \frac{1}{(1-X)^2} \quad (9)$$

Si è così trovata una relazione che lega il *coefficiente di scarico* con la geometria dell'ugello e con le dimensioni della parte gassosa interna. Tuttavia, volendo eliminare una variabilità da questa formula, si può considerare il caso dove per qualsiasi valore di  $K_1$  si ottenga sempre un cuore gassoso che permetta di ottenere la massima portata e quindi avere  $C_D$  massimo. Ponendo quindi la derivata  $d(\frac{1}{C_D^2})/dX = 0$ , si ottiene  $2K_1^2 X^2 = (1-X)^3$  dove  $X$  è unicamente funzione del solo parametro  $K_1$ .

Alla fine, si ottiene quindi la relazione che esprime  $C_D$ , da cui si può notare la sola dipendenza dai fattori geometrici dell'ugello.

$$C_D = \sqrt{\left[ \frac{(1-X)^3}{1+X} \right]}$$

Dal grafico sottostante Fig.26 è possibile notare l'andamento di  $C_D$ , in funzione di  $K = \frac{A_p}{D_s d_0} = \frac{\pi K_1}{4}$ , che rappresenta le caratteristiche geometriche dell'ugello all'ingresso e all'uscita.

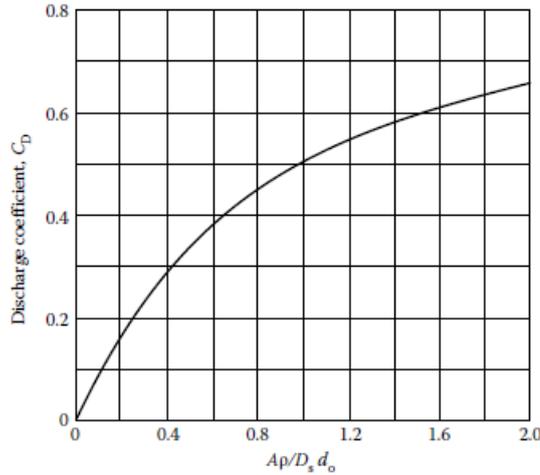


Fig. 26 Relazione esistente fra le dimensioni dell'ugello e il parametro  $C_D$ . [9]

Tuttavia, utilizzando questa equazione, confrontando il coefficiente con quello ricavato sperimentalmente, si ottengono valori discordanti. Per cui sono state apportate delle modifiche che tenessero conto di effetti secondari trascurati in prima battuta. In particolare, successivamente con ulteriori analisi, si tenne conto dell'influenza delle dimensioni della camera di turbolenza considerando il suo diametro e la sua lunghezza. Partendo dalla seguente formula proposta da Taylor, per un flusso non viscoso, vennero apportate varie correzioni:

$$C_D = \sqrt{0.225 \frac{A_p}{D_s d_0}}$$

Dai grafici sottostanti sono ricavabili i coefficienti di correzione per tenere conto dell'influenza dei diametri della camera di vorticazione Fig.27 e della sua lunghezza Fig.28, che vengono dati come rapporto fra valore ricavato sperimentalmente e quello teorico del coefficiente di scarico.

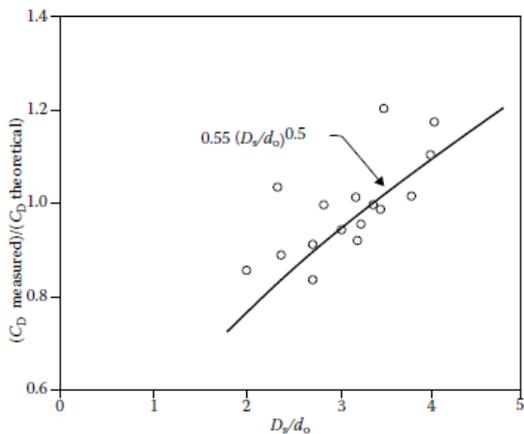


Fig. 27 Influenza della differenza di dimensioni fra ingresso ed uscita sul  $C_D$ . [9]

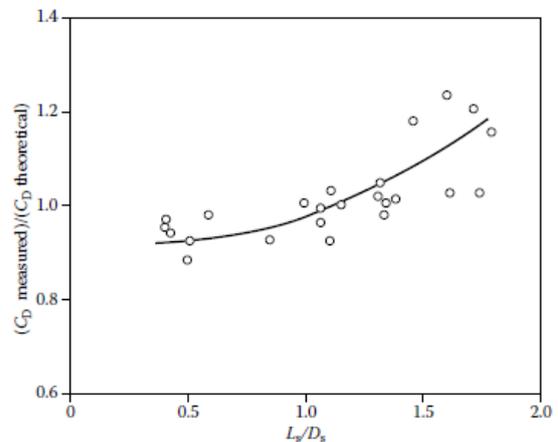


Fig. 28 Influenza della lunghezza della camera di vorticazione  $C_D$ . [9]

Modificando la relazione di Taylor tenendo conto dei fattori correttivi, otteniamo l'espressione che è rappresentata dal grafico in Fig.29. Appare subito evidente come rispetto al caso semplificato, rappresentato con la linea tratteggiata, la variazione della geometria interna della camera, porti ad una variazione del  $C_D$ .

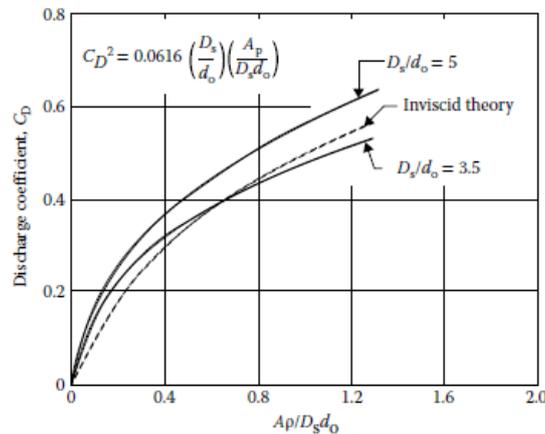


Fig. 29 Influenza dei parametri geometrici sul coefficiente  $C_D$ . [9]

Bisogna considerare però il fatto che le relazioni presentate non tengono conto degli attriti interni, che giocano un ruolo importante negli ugelli a cono.

Essi infatti hanno un ruolo sia positivo che negativo: ostacolano la rotazione del liquido all'interno della camera riducendo così le dimensioni del cuore gassoso e incrementando il  $C_D$ , però creano dissipazioni energetiche che fanno diminuire il salto di pressione a disposizione.

Durante la progettazione oltre a garantire una buona finitura del componente, bisogna fare attenzione ai vari parametri che definiscono la geometria dell'ugello, in quanto influenzano le perdite. Alcuni valori da rispettare nella progettazione dell'ugello dovrebbero essere i seguenti:

- $\frac{D_s}{d_o}$ : questo parametro dovrebbe essere piccolo per ridurre le perdite per attrito, non dovrebbe superare 0,5.
- $\frac{L_s}{D_s}$ : questo parametro dovrebbe essere piccolo in modo da ridurre le perdite per sfregamento, tuttavia non può essere ridotto significativamente in quanto si deve garantire abbastanza spazio, in modo che i getti che escono dalle varie porte di ingresso abbiano tempo per riunirsi. Nella maggior parte dei progetti, il valore assunto ricade nell'intervallo fra 0,5-1,0, anche se si sono evidenziati effetti positivi nell'atomizzazione per valori più elevati.
- $\frac{l_0}{d_0}$ : in questo tratto le perdite sono molto elevate, quindi si cerca di minimizzarne la lunghezza  $l_0$  stando su valori molto bassi, tuttavia nel caso reale, a causa delle lavorazioni meccaniche di solito si arriva su valori di circa 0,5.

- $\frac{l_p}{d_p}$ : questo valore non dovrebbe essere inferiore a 1,3 in quanto se le porte sono troppo piccole possono verificarsi dei problemi nella spruzzatura.

Quindi si capisce come il coefficiente  $C_D$  dipenda da altri parametri oltre a quelli introdotti inizialmente nella trattazione semplificata. Anche se quest'ultima, vista la semplicità applicativa, può comunque dare buoni risultati in uno studio preliminare.

Jones [9], conducendo degli esperimenti molto dettagliati, che analizzavano: proprietà del liquido, condizioni operative e parametri geometrici dell'ugello ottenne poi la seguente relazione empirica che riassume tutti i vari effetti citati in precedenza.

$$C_D = 0.45 \left( \frac{d_0 \rho_L U}{\mu_L} \right)^{-0.02} \left( \frac{l_0}{d_0} \right)^{-0.03} \left( \frac{L_s}{D_s} \right)^{0.05} \left( \frac{A_p}{D_s d_0} \right)^{0.52} \left( \frac{D_s}{d_0} \right)^{0.23}$$

### 3.1.2 Calcolo sperimentale del coefficiente $C_D$

Per le considerazioni fatte in precedenza nel capitolo 2 riguardo ai diversi tipi di efflusso, dipendenti dai parametri operativi, affinché l'atomizzazione venga garantita deve essere rispettata la seguente relazione [10]:

$$\left( \frac{d_j v_j \rho_l}{\mu_l} \right) \geq 280 \left[ \frac{\mu_l}{(\sigma \rho_l d_j)^{0.5}} \right]^{0.82}$$

$d_j$ : diametro del getto [m]

$v_j$ : velocità del getto [m/s]

$\mu_l$ : viscosità del liquido [Pas]

$\sigma$ : tensione superficiale [N/m]

Se le caratteristiche dell'ugello sono note, è possibile ricavare la velocità  $v_j$  tramite la formula:

$$v_j = C_v \left( 2 \frac{\Delta p}{\rho_l} \right)^n$$

$C_v$ : coefficiente di velocità

$\Delta p$ : salto di pressione [Pa]

$n$ : 0.5 se l'efflusso è turbolento

La portata smaltita dall'ugello è data da:

$$Q = C_V \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho_l}} C_A A$$

A = sezione di uscita dell'ugello [m<sup>2</sup>]

C<sub>A</sub> = coefficiente correttivo dell'area

Q = portata [m<sup>3</sup>/s]

Δp = salto di pressione [Pa]

Poiché all'interno dell'ugello si ha la presenza di un cuore aeriforme, si verifica una contrazione di vena e quindi la sezione di uscita del liquido si riduce rispetto alla sezione del foro.

Si tiene conto di questo fenomeno grazie al coefficiente correttivo C<sub>A</sub>.

Sapendo poi che il *coefficiente di scarico* è dato da C<sub>D</sub> = C<sub>V</sub>C<sub>A</sub>, ribaltando l'equazione della portata è possibile ottenere:

$$C_D = \frac{Q}{A \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho_l}}}$$

Quindi avendo a disposizione i cataloghi degli ugelli scelti, in cui si possono trovare i valori sperimentali delle portate in funzione della pressione, è possibile ottenere il parametro C<sub>D</sub> per caratterizzare il comportamento dell'ugello.

In particolare, a causa di tutti i fenomeni dissipativi e che portano alla riduzione della sezione utile di uscita dell'ugello, il valore teorico di C<sub>D</sub> = 0,61 usato normalmente per un orifizio con flusso turbolento si ridurrà di molto.

Nei capitoli seguenti, partendo dai dati sperimentali ricavati dai cataloghi degli ugelli, verrà fatta una caratterizzazione dei vari coefficienti di scarico, per capire come questi varino in funzione delle condizioni operative.

### 3.1.3 Normativa ISO 10625

Per ogni tipo di ugello, i vari costruttori forniscono diverse taglie che a parità di pressione di alimentazione sono in grado di fornire una diversa portata.

Una volta questi ugelli venivano identificati dai costruttori assegnando varie colorazioni, che erano però esenti da qualsiasi criterio dimensionale e cambiavano da costruttore a costruttore. Questo però, soprattutto quando ci si trova a dover fare delle sostituzioni in loco, può portare a una certa confusione nella scelta dell'ugello adatto.

Nel 2005 quindi con la norma *ISO 10625*, emanata al fine di regolarizzare questo aspetto, si è cercato di uniformare la scelta cromatica adottando un *sistema codice/colore*, composto da quindici classi, che permetta di valutare immediatamente le performance di un dato ugello univocamente. Visto che la maggior parte dei produttori di ugelli fa parte del mondo anglosassone, la portata nella normativa ISO viene espressa in galloni al minuto (GPM) e la pressione in PSI.

Facendo riferimento alla tabella in Fig. 30, considerando che 1 gallone = 3,78541 litri, è possibile eseguire la conversione.

Flow-rate at 300 kPa (with relative tolerance of ± 5 %) l/min	Nozzle size *	Colour	Name of colour	RAL number **
0,2	0050		Blue lilac	4005
0,25	0067		Olive green	6003
0,3	0075		Light pink	3015
0,4	01		Pure orange	2004
0,6	015		Traffic green	6024
0,8	02		Zinc yellow	1018
1,0	025		Signal violet	4008
1,2	03		Gentian blue	5010
1,4	035		Brown red	3011
1,6	04		Flame red	3000

Fig. 30 Parte della tabella codice-colore presente nella normativa ISO 10625. [13]

Per esempio, prendendo l'ugello *traffic green*, al quale è riferita una portata di 0,15 GPM, facendo la conversione si ottengono 0,6 l/min alla pressione di 3 bar.

Un ugello normato, a prescindere dalla ditta produttrice, a parità di codice/colore e pressione di esercizio, dovrà sempre erogare la stessa portata in l/min.

Inoltre, sull'ugello si possono trovare altri codici che forniscono alcune informazioni su: marca dell'ugello, modello, angolo formato, portata smaltita e materiale con il quale è costruito.

Per esempio, i codici stampati sull'ugello nell'immagine Fig. 31 identificano un ugello Teejet di modello XR che genera una nube con angolo di apertura di 110° e smaltisce una portata di 0,4 GPM se alimentato con una pressione di 40 PSI. VS indica per gli ugelli, che l'inserto è in acciaio inox, VK si usa per la ceramica e VP per la plastica.

Per quanto riguarda i codici stampati sugli ugelli, non c'è uno standard preciso riguardo alle informazioni da fornire e alla posizione dove sono scritte, ma ogni costruttore adotta rappresentazioni leggermente diverse.

Per i colori invece, molto spesso sui cataloghi è possibile trovare sia la rappresentazione ISO, che quella classica scelta dal costruttore prima della normativa del 2005.

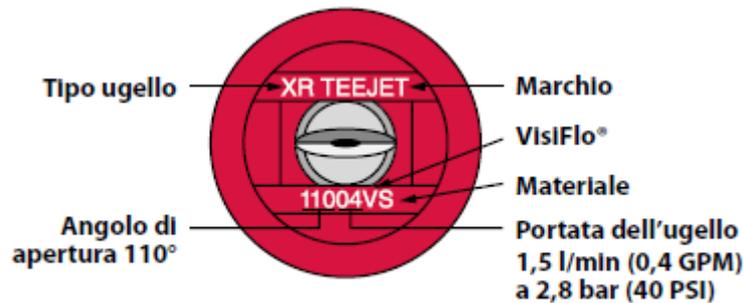


Fig. 31 Codici identificativi di un ugello Teejet. [14].

### 3.1.4 Standard ASABE S-572.1

È molto importante conoscere la taglia e la distribuzione del droplet prodotto, in quanto influenzano: il drift, l'effetto e l'efficienza del trattamento. Poiché lo stesso volume di liquido diviso in particelle più piccole riuscirà a coprire meglio la zona trattata. Per esempio, prendendo una goccia di  $200\mu m$  e dividendola in 64 gocce da  $50\mu m$  di diametro si riesce a coprire un'area di circa 4 volte superiore rispetto alla goccia di partenza.

Poiché la classificazione statistica della distribuzione delle particelle può causare confusione, per una maggior praticità e semplificazione della scelta di un determinato ugello da parte degli agricoltori, sono state fatte delle classificazioni dall'organismo inglese *BCPC* (British Crop Protection Council) e dall'*ASABE* (American Society of Agricultural and Biological Engineers). *ASABE* ha sviluppato un sistema per identificare le dimensioni delle particelle di droplet generate da un determinato ugello (ASABE S-572.1).

Spray Quality*	Size of Droplets	VMD Range (Microns**)	Color Code	Retention on Difficult to Wet Leaves	Used for	Drift Potential
Extremely Fine	Small	<60	Purple	Excellent	Exceptions	High
Very Fine	↓	61-105	Red	Excellent	Exceptions	↓
Fine		106-235	Orange	Very Good	Good Cover	
Medium		236-340	Yellow	Good	Most Products	
Coarse		341-403	Blue	Moderate	Systemic Herbicides	
Very Coarse		404-502	Green	Poor	Soil Herbicides	
Extremely Coarse	503-665	White	Very Poor	Liquid Fertilizer	↓	
Ultra Coarse	Large	>665	Black	Liquid Fertilizer		Low

\*Always read the pesticide label to determine which spray quality is required.  
 \*\*Estimated from sample reference graph in ASABE/ANSI/ASAE Standard S572.1

Fig. 32 Tabella che rappresenta le classi dimensionali scelte dallo standard ASABE S-572.1 [15]

L' *ASABE S-572.1* prevede la classificazione del droplet in 8 categorie, che vengono indicate dai costruttori degli ugelli a catalogo utilizzando le lettere iniziali in maiuscolo. Per esempio, la categoria Very Fine viene indicata a catalogo con VF.

Lo stesso ugello comunque, da come si può vedere in Fig. 33, a seconda della pressione con cui viene alimentato, può generare particelle di diversa grandezza. Tuttavia, se si vuole smaltire una portata maggiore si dovrà scegliere la taglia superiore dell'ugello in quanto si cerca di non lavorare a pressioni troppo elevate, poichè vengono generate particelle troppo piccole che sono maggiormente soggette al fenomeno di *drift*.

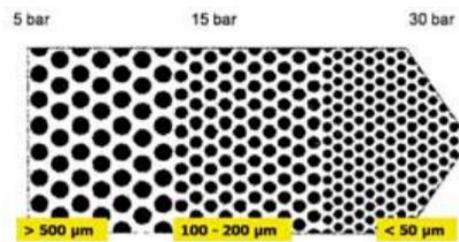


Fig. 33 Andamento dimensionale delle dimensioni delle goccioline per diverse pressioni di alimentazione. [39]

La categoria dimensionale di gocce con cui deve essere fatto il trattamento, spesso si trova sull'etichetta del prodotto, così come i quantitativi di prodotto per ettaro.

La gamma dimensionale delle gocce prodotte da ugelli adatti a vigneti e frutteti si attesta nel range 50 – 450  $\mu m$ , i più usati in ricadono nell'intervallo 200 – 300 $\mu m$ .

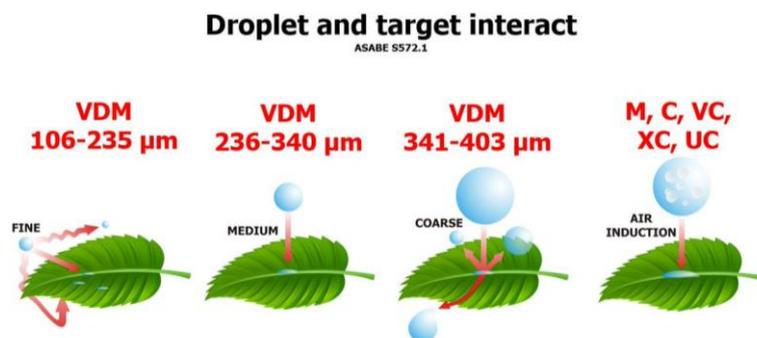


Fig. 34 Comportamento delle gocce a seconda del valore del VDM. [15]

Da come è possibile osservare nella Fig.34, a seconda del valore del VMD, il *droplet* durante l'applicazione dei fitofarmaci può comportarsi in diversi modi. Se le particelle sono troppo finemente disperse infatti è possibile che alcune di loro non raggiungano le foglie poichè troppo soggette alle correnti d'aria. Nel caso opposto invece, quando si hanno particelle troppo grandi, si può assistere al fenomeno del gocciolamento. È quindi necessario trovare il giusto compromesso fra avere gocce abbastanza grandi da non andare incontro a deriva, tuttavia abbastanza piccole da evitare fenomeni di rebounding.

## 3.2 Scelta degli ugelli

### 3.2.1 Teejet TXA

Questo tipo di ugello è stato consigliato da *Salvarani* che è un'azienda che commercializza prodotti *TeeJet*, e *Abbà-ASJ* del gruppo *ARAG* [12].

È un ugello a *cono vuoto*, prodotto da Teejet ed utilizzato per le irrorazioni dirette di vigneti e frutteti. È ideale per l'applicazione di: insetticidi, fungicidi, defoglianti e fertilizzanti fogliari. Il corpo è in polipropilene, con inserto in ceramica. Questi due materiali permettono la resistenza alla corrosione ed all'usura, quando si utilizzano fitofarmaci abrasivi, garantendo una vita più lunga all'ugello. Il campo di utilizzo consigliato è di 3-20 bar con un cono che raggiunge un'apertura di 80° a 7 bar.

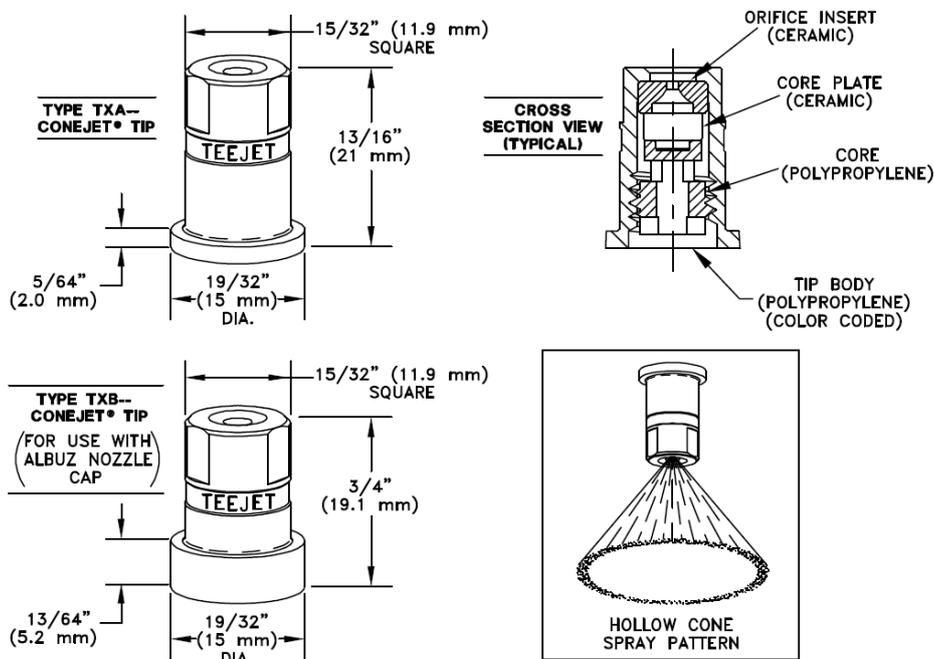


Fig. 35 Dimensioni e sezioni interne dell'ugello TXA. [14]

		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

Fig. 36 Tabella rappresentativa delle portate smaltite e delle dimensioni delle gocce generate da varie taglie di ugello TXA. [14]

## Teejet TXA800050VK

$d_o = 0,86 \text{ mm}$  Color: Purple

TX_800050VK ConeJet® Spray Tip			
PRESSURE bar	Dv0.1	Dv0.5	Dv0.9
2	61	124	175
4	56	107	154
6	53	100	141
8	51	95	131
10	49	92	123
12	48	90	117
14	47	89	111
16	46	88	105
18	45	87	100
20	44	87	96

ANGOLO DELLO SPRAY (bar)			
2	3	7	20
68°	72°	80°	83°



Fig. 38 Ugello TXA800050VK. [14]

Fig. 37 Dimensioni delle gocce. [14]

p[bar]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_D$	0,33	0,28	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21

Fig. 39 Coefficienti  $C_D$  calcolati.

## Teejet TXA800067VK

$d_o = 1,04 \text{ mm}$  Color: Olive green

TX_800067VK ConeJet® Spray Tip			
PRESSURE bar	Dv0.1	Dv0.5	Dv0.9
2	65	133	187
4	59	115	164
6	56	106	150
8	54	101	140
10	52	98	132
12	51	96	124
14	50	95	118
16	49	94	112
18	48	93	107
20	47	92	103

ANGOLO DELLO SPRAY (bar)			
2	3	7	20
70°	73°	80°	81°



Fig. 41 Ugello TXA800067VK [14]

Fig. 40 Dimensioni gocce. [14]

p[bar]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_D$	0,30	0,26	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Fig. 42 Coefficienti  $C_D$  calcolati.

## Teejet TXA8001VK

$d_o = 1,19 \text{ mm}$  Color: Orange

TX 8001VK ConeJet® Spray Tip			
PRESSURE bar	Dv0.1	Dv0.5	Dv0.9
2	75	153	215
4	68	132	189
6	65	122	173
8	62	117	161
10	60	113	151
12	59	110	143
14	57	109	136
16	56	108	129
18	55	107	123
20	54	106	118

ANGOLO DELLO SPRAY (bar)			
2	3	7	20
71°	74°	80°	80°



Fig. 44 Ugello TXA8001VK. [14]

Fig. 43 Dimensioni gocce. [14]

p[bar]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_D$	0,35	0,29	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23

Fig. 45 Coefficienti  $C_D$  calcolati.

## Teejet TXA80015VK

$d_o = 1,45 \text{ mm}$  Color: Green

TX 80015VK ConeJet® Spray Tip			
PRESSURE bar	Dv0.1	Dv0.5	Dv0.9
2	88	181	256
4	81	157	224
6	77	146	205
8	74	139	191
10	72	134	180
12	70	131	170
14	68	129	161
16	66	128	153
18	65	127	147
20	64	126	140

ANGOLO DELLO SPRAY (bar)			
2	3	7	20
72°	75°	80°	80°



Fig. 47 Ugello TXA80015VK. [14]

Fig. 46 Dimensione gocce. [14]

p[bar]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C_D$	0,35	0,30	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24

Fig. 48 Coefficienti  $C_D$  calcolati.

Da come si può notare nelle tabelle, aumentando la taglia dell'ugello, aumenta l'orifizio di uscita  $d_o$ . Appare subito chiaro, valutando i dati, che nel caso reale i coefficienti  $C_D$  assumano valori molto minori rispetto al valore ipotizzato nel caso ideale. In particolare, si può notare come aumentando la taglia dell'ugello, per lo stesso valore della pressione, il coefficiente  $C_D$  tenda ad aumentare.

Analizzando i risultati ottenuti, si verifica un'inversione di tendenza nell'ugello TXA800067VK, probabilmente dovuta al cambiamento della mesh del filtro che viene applicato oppure ad un diverso aumento proporzionale nelle dimensioni interne dell'ugello. Questo fatto è possibile analizzarlo anche nel grafico sottostante, in quanto la curva del TXA800067VK è molto più vicina a quella dell'ugello di taglia inferiore rispetto alle altre.

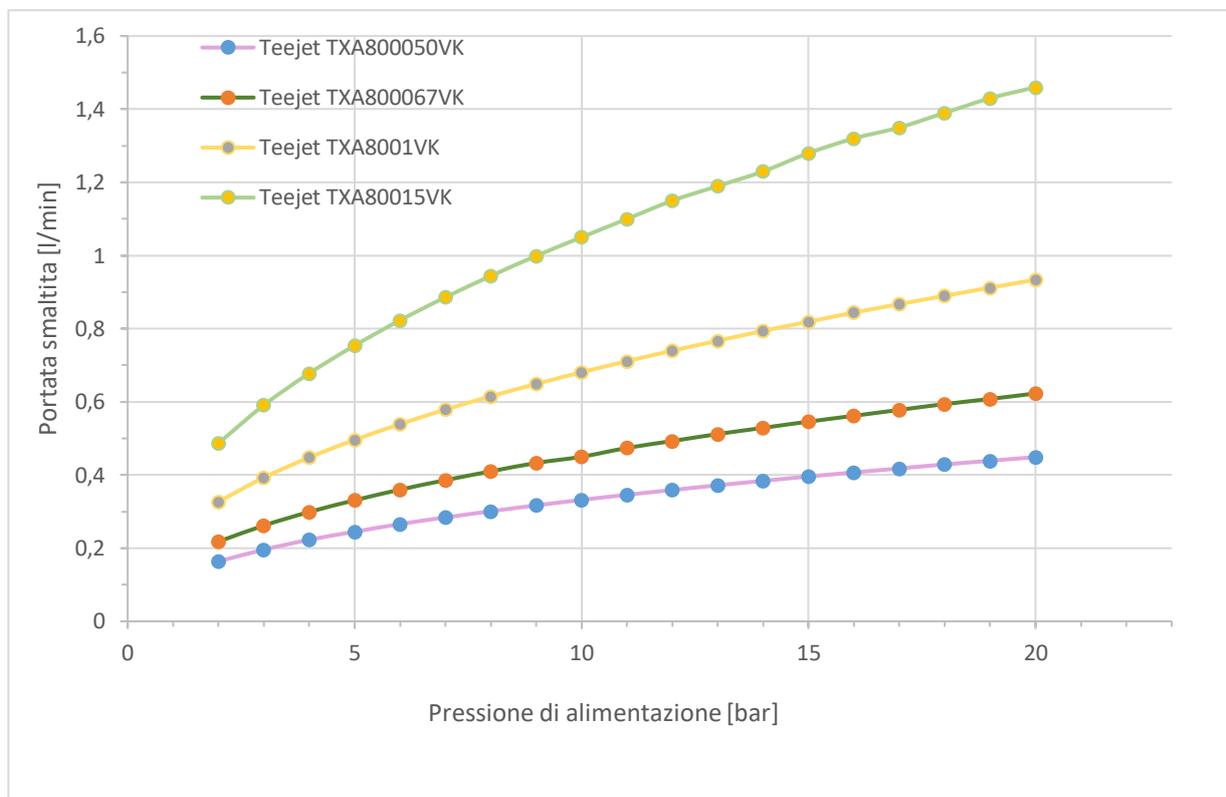


Fig. 49 Curve della portata smaltita dai vari ugelli TXA esaminati, in funzione della pressione di alimentazione.

Dal grafico Fig. 49 in cui viene rappresentata la portata smaltita dall'ugello, in funzione della pressione a cui viene alimentato, è possibile comprendere il discorso fatto in precedenza sulle varie taglie di ugello che vengono fornite per ogni modello. Le quattro curve rappresentate fanno riferimento allo stesso modello, il Teejet TXA.

Si può notare come per un ugello nel quale la geometria esterna è invariata, salendo di taglia e quindi incrementando le dimensioni del foro di uscita, si possa arrivare a smaltire a parità di pressione portate di molto superiori.

Per quanto riguarda le portate smaltite, i TXA possono essere adatti per l'applicazione su drone, in quanto alle pressioni di alimentazione garantite dalle pompe equipaggiabili su un UAV, sono in grado di garantire un'autonomia comprese nel range dei 5-10 minuti, utilizzando un serbatoio da 10L.

Tuttavia, analizzando le tabelle a catalogo, questi ugelli sono in grado di produrre a pressioni di alimentazione nell'intorno dei 5 bar gocce identificate dalla normativa come *VF*, il che vuol dire avere delle gocce con un VMD nell'intervallo  $65 - 105 \mu m$  che potrebbero essere molto soggette al *drift* causato dal *downwash* generato dalle pale del drone. Questi ugelli sono stati consigliati da esperti del settore, quindi gli effetti negativi dati dalle correnti di aria generate dalle pale del rotore dovranno essere indagati poi sperimentalmente.

### 3.2.2 Ugelli AITX

Come suggerito dal dott. Minuto del CERSAA di Albenga (SV) [12], si è valutato l'impiego di ugelli a cono semplice. Tuttavia, ha suggerito anche di considerare il possibile impiego di ugelli *antideriva* per far fronte al drift delle gocce.

Il *Teejet AIXT* è un ugello a cono vuoto, adatto ad atomizzatore e applicazioni di irrorazione diretta. Il corpo è in polipropilene con inserti in ceramica per garantire la resistenza alla corrosione e all'usura di tipo meccanico. Il pre-orifizio è smontabile per garantire la pulizia interna. Il campo di utilizzo consigliato è di 4-20 bar.

A differenza dei normali ugelli a cono, è presente un sistema che grazie all'*effetto Venturi* garantisce l'aspirazione di un flusso di aria durante lo spruzzo. Questa aria viene inglobata nelle gocce che avranno quindi dimensioni maggiori e verranno influenzate in misura inferiore dalle correnti di aria, permettendo di raggiungere l'obiettivo con una maggiore probabilità.

Dalle immagini della Fig.50, si nota l'orifizio posto a lato dell'ugello che serve ad aspirare l'aria da inglobare nel liquido durante la nebulizzazione. Nella sezione sono evidenziati i canali di passaggio dell'aria.

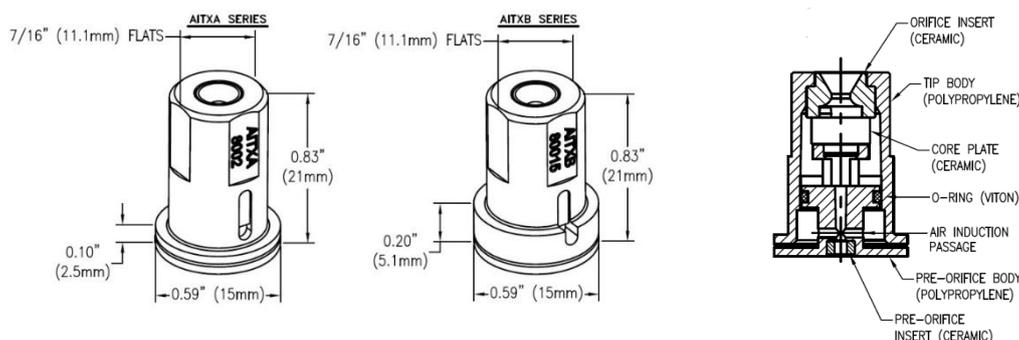


Fig. 50 Dimensioni esterne e sezione dell'ugello AITX. [14]

		l/min																	
		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	
AITX <sup>+</sup> 8001VK	50	0,449	0,499	0,545	0,586	0,625	0,661	0,695	0,727	0,758	0,787	0,816	0,843	0,869	0,895	0,920	0,944	0,967	
		XC	XC	VC	VC	C	C	C	C	C	C	C	C	M	M	M	M	M	
AITX <sup>+</sup> 80015VK	50	0,674	0,753	0,824	0,889	0,950	1,01	1,06	1,11	1,16	1,21	1,25	1,30	1,34	1,38	1,42	1,46	1,49	
		XC	XC	VC	VC	VC	C	C	C	C	C	C	C	C	C	M	M	M	

Fig. 51 Tabella rappresentativa delle portate smaltite e delle dimensioni delle gocce generate da varie taglie di ugello AITX. [14]

## Teejet AITX8001VK

**Color:** orange

AITX 8001 Air Induction Hollow Cone VISIFLO SPRAY TIP			
PRESSURE Bar	Dv0.1	Dv0.5	Dv0.9
4.0	209	556	852
5.0	194	480	788
6.0	183	427	735
7.0	175	386	688
8.0	168	355	648
9.0	163	330	613
10.0	158	309	581
12.0	151	276	526
14.0	145	252	480
16.0	141	234	440
18.0	137	219	407
20.0	134	206	377

Fig. 52 Dimensioni gocce. [14]

SPRAY ANGLE AT bar			
2	3	7	20
-	-	-	-



Fig. 53 Ugello AITX8001VK. [14]

Analizzando i dati forniti dal costruttore, è possibile notare come la dimensione delle gocce generate aumenti rispetto al modello TXA. Nell'intervallo di pressione garantito dalla pompa equipaggiabile su un drone troviamo gocce di tipo XC, VC.

Tuttavia, già per il modello 8001VK che rappresenta la taglia più piccola, la portata smaltita è importante e potrebbe causare uno svuotamento troppo veloce del serbatoio. Dovendo alimentarlo a pressioni superiori ai 4 bar, come dichiarato dal costruttore, si avrebbe una portata minima smaltita per ugello di 0,45 l/min. Il che vorrebbe dire avere, per un drone che presenta 4 ugelli, una portata totale di 1,8 l/min che svuoterebbe la tanica in circa 5 minuti e mezzo. In un'ottica di ottimizzazione delle batterie questo tempo risulta essere troppo breve.

### 3.2.3 Ugelli XR

L'ugello *Teejet XR*, a differenza dei precedenti è un *ugello a ventaglio*, che viene utilizzato principalmente montato sulle barre irroratrici delle trattrici che trattano le colture in campo aperto.

Sono disponibili in: acciaio inox, ceramica e polimero con angoli di apertura di 80° e 110°.

Una caratteristica positiva è il fatto che lavorino con pressioni ridotte, infatti il range di utilizzo va da 1 a 4 bar. Dovendo quindi raggiungere pressioni più basse, si potrebbe pensare all'applicazione di pompe con caratteristiche inferiori rispetto a quelle che servono per alimentare gli ugelli TXA e ATX. Inoltre, visto che la pompa scelta riesce ad ottenere pressioni maggiori, può essere applicata una regolazione efficiente dell'ugello nell'intera gamma di pressioni.

Si può notare, benchè venga di solito utilizzato per altri scopi, che un'ulteriore punto a favore sia il fatto di generare gocce più grosse a parità di portata smaltita rispetto ai primi ugelli a cono presentati. Guardando infatti la tabella sottostante, si nota che le gocce prodotte sono di tipo F, quindi meno soggette alla deriva rispetto a quelle prodotte dai TXA.

Anche se non sono espressamente adatti all'applicazione in vigneto e frutteto, visti però i punti a favore, si potrebbe valutare anche l'applicazione di questo tipo di ugello.

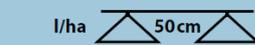
	 bar	DIMENSIONI GOCCE		PORTATA DI UN UGELLO IN l/min	 l/ha $\triangle$ 50cm $\triangle$												
		80°	110°		4	5	6	7	8	10	12	16	18	20	25	30	35
		km/h	km/h		km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h
<b>XR8001</b> <b>XR11001</b> <b>(100)</b>	1,0	F	F	0,23	69,0	55,2	46,0	39,4	34,5	27,6	23,0	17,3	15,3	13,8	11,0	9,2	7,9
	1,5	F	F	0,28	84,0	67,2	56,0	48,0	42,0	33,6	28,0	21,0	18,7	16,8	13,4	11,2	9,6
	2,0	F	F	0,32	96,0	76,8	64,0	54,9	48,0	38,4	32,0	24,0	21,3	19,2	15,4	12,8	11,0
	2,5	F	F	0,36	108	86,4	72,0	61,7	54,0	43,2	36,0	27,0	24,0	21,6	17,3	14,4	12,3
	3,0	F	F	0,39	117	93,6	78,0	66,9	58,5	46,8	39,0	29,3	26,0	23,4	18,7	15,6	13,4
	4,0	F	VF	0,45	135	108	90,0	77,1	67,5	54,0	45,0	33,8	30,0	27,0	21,6	18,0	15,4
<b>XR80015</b> <b>XR110015</b> <b>(100)</b>	1,0	M	F	0,34	102	81,6	68,0	58,3	51,0	40,8	34,0	25,5	22,7	20,4	16,3	13,6	11,7
	1,5	F	F	0,42	126	101	84,0	72,0	63,0	50,4	42,0	31,5	28,0	25,2	20,2	16,8	14,4
	2,0	F	F	0,48	144	115	96,0	82,3	72,0	57,6	48,0	36,0	32,0	28,8	23,0	19,2	16,5
	2,5	F	F	0,54	162	130	108	92,6	81,0	64,8	54,0	40,5	36,0	32,4	25,9	21,6	18,5
	3,0	F	F	0,59	177	142	118	101	88,5	70,8	59,0	44,3	39,3	35,4	28,3	23,6	20,2
	4,0	F	F	0,68	204	163	136	117	102	81,6	68,0	51,0	45,3	40,8	32,6	27,2	23,3

Fig. 54 Tabella rappresentativa delle portate smaltite e delle dimensioni delle gocce generate da varie taglie di ugello XR. [14]

A catalogo viene indicato che l'ugello utilizzato a basse pressioni, tende a creare gocce di dimensioni più grandi riducendo il fenomeno della deriva da com'è possibile notare dalla Fig.55. Tuttavia, utilizzandolo a pressioni più elevate, la nube è più fitta e garantisce una miglior copertura.

È stato preso in considerazione il modello XR8001, in quanto la taglia successiva a meno di non alimentarla alle

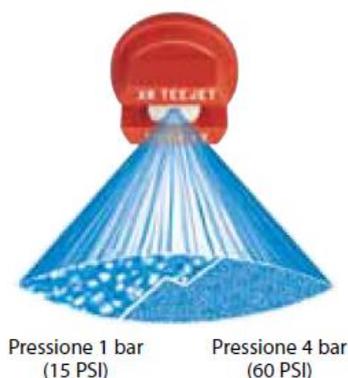


Fig. 55 Gocce generate da un ugello XR a diverse pressioni di alimentazione. [14]

minime pressioni possibili, garantisce portate smaltite troppo elevate svuotando il serbatoio troppo rapidamente.

Dalle tabelle in Fig.56 si può notare come le gocce generate da questo tipo di ugello siano nettamente più grandi di quelle generate dall'ugello TXA.

<b>XR8001 TEEJET® FLAT SPRAY TIP</b>			
<b>PRESSURE bar</b>	<b>Dv0.1</b>	<b>Dv0.5</b>	<b>Dv0.9</b>
1	145	283	468
1.5	131	247	419
2	121	227	389
2.5	114	213	370
3	108	203	357
3.5	102	195	347
4	98	189	340
4.5	94	184	335
5	90	179	331
5.5	87	175	329
6	84	172	327

<b>XR80015 TEEJET® FLAT SPRAY TIP</b>			
<b>PRESSURE bar</b>	<b>Dv0.1</b>	<b>Dv0.5</b>	<b>Dv0.9</b>
1	164	316	502
1.5	151	281	458
2	139	260	430
2.5	129	246	409
3	122	236	393
3.5	115	228	379
4	110	221	368
4.5	105	216	359
5	100	211	352
5.5	96	207	345
6	93	204	341

Fig. 56 Dimensioni delle gocce degli ugelli XR. [14]

## CAPITOLO 4: Il fenomeno della deriva

---

### 4.1 Introduzione al fenomeno della deriva

Volendo studiare l'applicazione di un drone in ambito agricolo in un'ottica di *agricoltura 4.0*, uno dei fenomeni a cui prestare maggiore attenzione è rappresentato dalla *deriva* delle goccioline. Questo fenomeno che interessa anche l'agricoltura tradizionale, è dovuto al fatto che lavorando con un liquido nebulizzato, a causa delle ridotte dimensioni delle particelle, queste possano essere soggette più o meno marcatamente alle correnti d'aria presenti nell'ambiente, mancando così il bersaglio.

Questo fenomeno si rivela essere dannoso sotto vari aspetti:

- *Economico*: in quanto dovendo spruzzare più miscela, è necessario più tempo in termini di ore lavorative e anche perché c'è uno spreco di prodotto, con i relativi costi aggiuntivi.
- *Fitoiatico*: se una parte di prodotto manca il bersaglio, il trattamento sarà meno efficace.
- *Ambientale*: contaminazione dei corsi d'acqua, dei luoghi frequentati dalla popolazione, contaminazione di altre coltivazioni, avvelenamento della flora e della fauna.

La dannosità dei *prodotti fitosanitari* viene infatti spesso sottovalutata dagli agricoltori, i quali trascurano le norme di legge, esponendo al rischio sia se stessi durante i trattamenti, sia la flora e la fauna circostante. Tant'è che esistono regolamenti che dettano linee guida per quanto riguarda l'utilizzo dei prodotti fitosanitari, che permettono di limitare il più possibile questo fenomeno. Gli interventi per il controllo della deriva si dividono essenzialmente in:

- *Diretti*: si cerca di intervenire sui metodi con cui vengono distribuiti i prodotti fitosanitari, adottando opportune tecnologie ed accessori per la riduzione del fenomeno e regolando l'erogazione dei getti.
- *Indiretti*: si cerca di limitare l'esposizione di aree sensibili ai prodotti usati per i trattamenti. In tal senso vengono adottate: le zone di rispetto, siepi, barriere frangivento, paciamature atte a fermare le particelle disperse nell'aria.

Per quanto riguarda i metodi diretti, uno dei fattori su cui si può agire, è la dimensione delle gocce. Il loro diametro, influenza fortemente la traiettoria.

Infatti, quando vengono espulse dagli ugelli idraulici, possono raggiungere una velocità di 20-30 m/s, che viene poi ridotta dall'attrito con l'aria fino a raggiungere un valore che è funzione del diametro stesso.

In particolare, se il diametro assume valori maggiori di 200  $\mu\text{m}$ , la traiettoria assunta dopo essere stata espulsa dall'ugello risentirà in maniera minore delle correnti d'aria.

Per dare un'idea del fenomeno, una goccia microscopica con un diametro iniziale di 10  $\mu\text{m}$ , posta a 3 metri di altezza, in presenza di un vento di 5 km/h può arrivare fino a 1000 m di distanza dal punto in cui è stata generata [17].

Parlando poi di quelli indiretti, a causa proprio del fenomeno del *drift* è vietato eseguire trattamenti con *PF* (prodotti fitosanitari) in un raggio di 200 m da pozzi o sorgenti di acque destinate al consumo umano.

Inoltre, se i campi coltivati sorgono vicino a corsi d'acqua principali o secondari è necessario prevedere una *buffer zone* che può andare da 5 a 30 metri e permette di evitare la contaminazione delle zone antistanti.

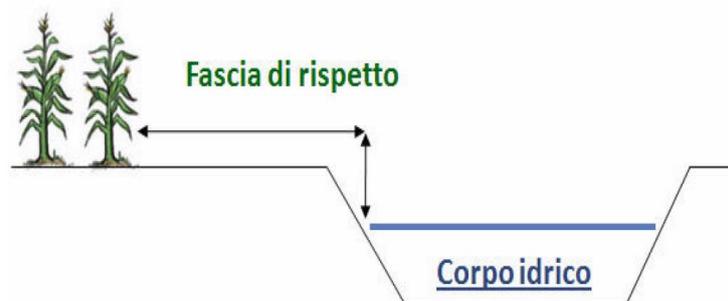


Fig. 57 Fascia di rispetto in presenza di corsi d'acqua adiacenti la coltura. [6]

Se invece il trattamento è eseguito vicino a quelle che vengono indicate come *aree sensibili*, che possono essere: strade, case, luoghi pubblici. Bisogna verificare che la nube di sostanza non esca dal limite della coltivazione, predisponendo le opportune misure per la mitigazione della deriva, o addirittura sospendere il trattamento se le condizioni ambientali sono avverse e non si è in grado di garantire ciò. In particolare, da come è possibile notare dalla figura: le manovre a fine filare devono essere eseguite con l'erogazione chiusa e se il filare è all'estremità dell'appezzamento si deve azionare solo il getto in direzione della coltura accendendo o spegnendo il ventilatore.

Durante i trattamenti vicino alle abitazioni, i proprietari vanno puntualmente avvertiti, in modo che adottino tutte le

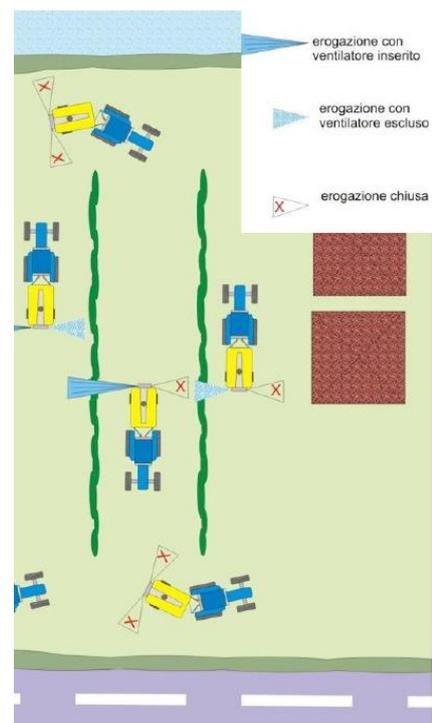


Fig. 58 Indicazioni sull'azionamento dell'irroratrice durante il trattamento. [6]

precauzioni del caso come: la chiusura delle finestre, ritirare eventuali indumenti stesi ad asciugare e coprire gli orti con teli per evitare la contaminazione di frutta e verdura.

Se tuttavia, dopo aver adottato tutte le norme del caso, si dovessero essere verificate contaminazioni dei luoghi vicini alla coltura trattata, l'agricoltore ha l'obbligo di segnalare il fatto indicando il prodotto utilizzato. Anche sulle etichette dei fitofarmaci comunque si trovano indicazioni sia sulla deriva che sulle zone di rispetto da adottare.

In base a quanto detto, considerando quindi che quello del drift è un problema che interessa anche l'agricoltura tradizionale, a maggior ragione si dovrà studiarlo nell'applicazione di un drone agricolo. In quanto in questa ultima applicazione si dovrà cercare di far raggiungere il bersaglio al maggior numero di particelle, poichè ci sono naturalmente delle correnti d'aria generate dalle pale che potrebbero influenzare la spruzzatura.

## 4.2 Il fenomeno della deriva negli UAV

### 4.2.1 Effetto delle dimensioni del droplet

Questo fenomeno, per quanto riguarda gli *UAV*, è stato principalmente studiato facendo delle sperimentazioni su colture a sviluppo orizzontale come può essere il riso e altri cereali e ci si è accorti che il parametro che più influenza la *deriva* e la *penetrazione* del prodotto è rappresentato dalla grandezza delle goccioline spruzzate.

In particolare, nello studio [17] è stato utilizzato un drone *Agras MG-1S* che è dotato di 8 rotori e 4 ugelli posti verticalmente in asse sotto i motori. È equipaggiato con una tanica da 10 L ed è in grado di volare per circa 15 minuti, ad una velocità compresa fra 1-7 m/s.

Sono stati testati vari tipi di *ugelli Teejet* di taglie differenti, in grado di generare droplet con un *VMD* diverso Fig. 60.

Fatto volare su un campo coltivato a riso ad un'altezza di 1,5 m, mantenendo una velocità di 5 m/s smaltendo una portata di 1,4 l/min: grazie all'ausilio di apposite *cartine idrosensibili*, è stato possibile studiare come la nube spruzzata si comportasse nelle diverse condizioni ambientali e di volo.

Chiaramente dovendo garantire la stessa portata con ugelli diversi, per uniformare le prove, la pressione di alimentazione è stata adattata a seconda dell'ugello scelto.

Da come è possibile notare dall'immagine Fig. 59, sono state applicate varie cartine idrosensibili alle colture, utilizzando una spaziatura regolare in campo e considerando per il posizionamento la direzione del vento. Per studiare poi la penetrazione del trattamento nella coltura, le cartine sono state poste a diverse altezze sulla pianta.

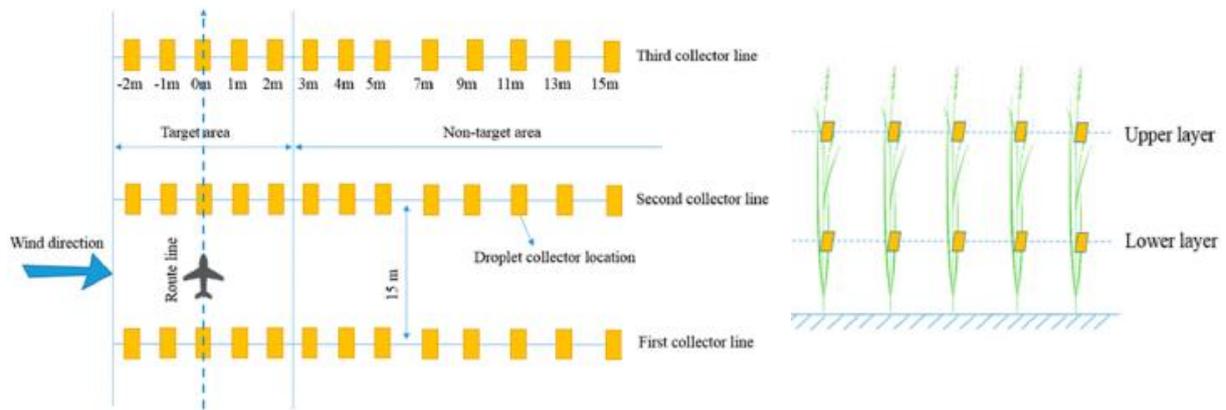


Fig. 59 Rappresentazione schematica del campo di riso su cui sono state applicate le cartine idrosensibili e traiettoria di volo seguita dal drone. [17]

Viene evidenziata una *target-area* che va da -2,5 m a +2,5 m dove idealmente ci si aspetterebbe di trovare il liquido spruzzato, tuttavia visto il fenomeno che si sta studiando, deve essere prevista anche una *non-target area* dove si andranno a depositare le particelle che hanno mancato il bersaglio a causa della deriva causata dal vento.

Nozzle type	Spray pressure /MPa	VMD / $\mu\text{m}$	Dv0.1 / $\mu\text{m}$	Dv0.9 / $\mu\text{m}$	Droplet classification	Test treatment
TEEJET 11001VS	0.50	95.21	50.85	175.16	Very-Fine	T1
TEEJET 110015VS	0.38	121.43	60.45	217.45	Fine	T2
TEEJET 11002VS	0.25	147.28	69.47	235.80	Fine	T3
TEEJET 11003VS	0.15	185.09	87.53	365.73	Medium	T4

**Wind speed (m/s):**

**T1:** 2.0-2.7

**T2:** 1.9-2.6

**T3:** 1.8-2.3

**T4:** 1.9-2.5

Fig. 60 Ugelli utilizzati e parametri di spruzzatura adottati durante le 4 prove effettuate. [17]

Gli ugelli, essendo di taglie differenti, come detto prima, devono essere alimentati con pressioni decrescenti man mano che la taglia aumenta, riuscendo così a smaltire la stessa portata ed uniformando i test effettuati.

Si può notare, come aumentando la taglia dell'ugello il VMD delle gocce aumenti. Questo è un effetto benevolo, in quanto più le gocce sono piccole e più risentono dell'eventuale effetto di correnti d'aria, tuttavia la scelta della taglia dell'ugello va studiata correttamente in quanto con un ugello troppo grande si rischia di svuotare troppo rapidamente il serbatoio del drone, garantendo così un'autonomia limitata.

Raccogliendo quindi i dati riguardanti il liquido depositato sulle cartine nelle 4 prove effettuate ed elaborandoli, da come ci si può aspettare è emerso che il picco riguardante la deposizione del *droplet* lo si trova spostato verso destra a causa del vento.

In particolare, questo effetto è più marcato in T1 e T2 dove le goccioline sono più piccole ed il picco si sposta verso la *non-target area*. Per quanto riguarda T3 e T4, le goccioline che sono

più grandi, vengono influenzate in maniera minore e si può trovare il picco relativo alla deposizione nella *target-area*.

Analizzando invece l'uniformità della distribuzione del liquido è possibile notare come al crescere delle dimensioni delle particelle si noti un miglioramento della deposizione sia nei livelli superiori che inferiori per quanto riguarda la *target-area*, infatti le particelle più grandi tendono a fermarsi in questa zona e non essere trasportate altrove.

La penetrazione del liquido è migliore nella zona compresa fra -1 m e 2 m mentre più ci si avvicina a -2 m e più diminuisce Fig.59. Questo è dovuto al fatto che a causa della direzione delle correnti, le particelle tenderanno ad essere spinte più verso destra e poche raggiungeranno la zona prossima a -2 m

Considerando quindi che il vento nei test soffia da sinistra verso destra, è possibile notare dai grafici Fig.61, che rappresenta la quantità di droplet che raggiunge la non-target area, come le distanze raggiunte, seppur da una quantità minima di goccioline, siano considerevoli.

In particolare, il test T1 rappresenti il caso peggiore, in quanto il maggior numero di particelle raggiunge notevoli distanze, che arrivano a più di 12 metri. Man mano che ci si sposta verso gocce più grandi questa distanza diminuisce e la percentuale di gocce risulta inferiore, infatti si nota un abbassamento delle 3 curve che rappresentano le tre linee dove sono state posizionate le cartine.

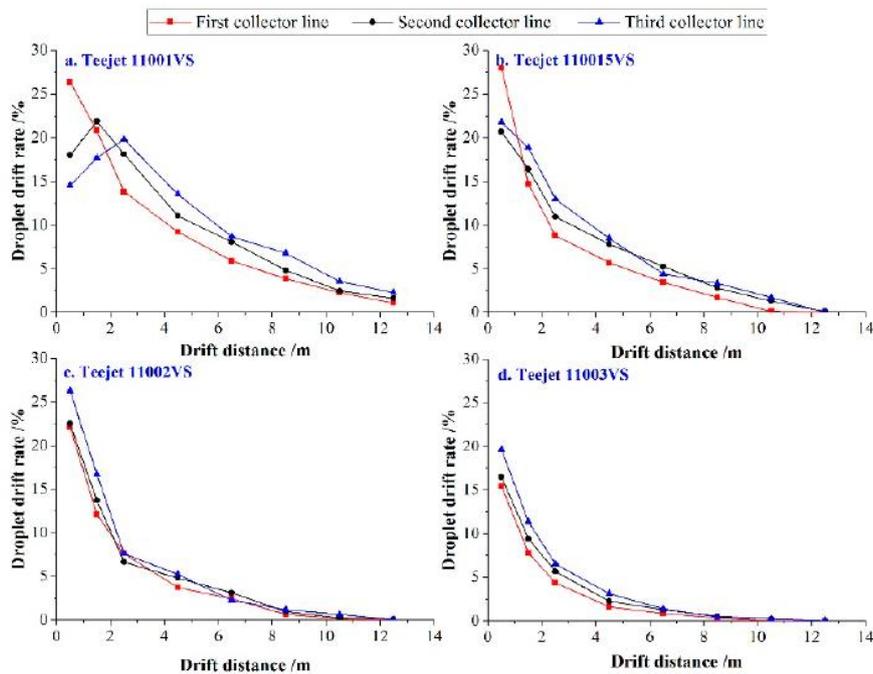


Fig. 61 Distanza raggiunta dalle goccioline nella non-target area. [17]

In un trattamento di questo tipo quindi, com'è stato introdotto anche in precedenza, per quanto riguarda la dimensione delle gocce si dovrà cercare di non scendere al di sotto ad un  $Dv_{0.5}$  di

160  $\mu\text{m}$  e prevedere una *buffer zone* di almeno 10 metri per evitare l'inquinamento delle zone antistanti.

Questo discorso si fa molto importante dovendo trattare un vigneto, infatti a differenza del riso dove sono stati effettuati i test e dove le piante sono molto vicine fra di loro, fra un filare e l'altro intercorrono circa 2 m. Inoltre, anche per quanto riguarda l'altezza si passa da circa 50 cm del riso ai 2 m della vite. A causa di questi fattori quindi è molto importante riuscire ad avere una buona penetrazione del liquido e una bassa deriva, in quanto essendo abbastanza distanti i filari, il liquido che non colpirà l'obiettivo difficilmente riuscirà a colpire le piante vicine ed andrà quasi sicuramente a disperdersi sul terreno.

#### 4.2.2 Ipotesi sull'assetto di volo

Analizzando le irrorazioni fatte su un campo di cereali per mezzo di: immagini, video, le informazioni fornite da Marcello Travenzoli e [12]. Considerando il fatto che le colture richiedano per essere trattate, due approcci completamente diversi: in quanto colture come i cereali si sviluppano in orizzontale e le piantine sono molto vicine, mentre nella vite coltivata a spalliera troviamo filari che arrivano a circa 2 m di altezza e che, per permettere il passaggio dei mezzi agricoli, si trovano a distanze notevoli uno dall'altro.

Uno dei punti da cui partire è l'ipotizzare le varie configurazioni di volo che un drone adatto alla spruzzatura in vigneto potrebbe adottare. Infatti, da com'è possibile notare dalla figura, si può pensare di farlo volare sia sopra al filare, sia lateralmente.

È molto importante considerare sempre il fatto che bisogna ridurre il più possibile la distanza fra gli ugelli e la coltura da trattare. Infatti, anche nell'agricoltura tradizionale, un metodo per mitigare il drift è quello di ridurre il più possibile la distanza fra la barra irroratrice ed il terreno, considerando comunque sempre i limiti tecnici con cui ci si deve scontrare nella realtà. Nel caso

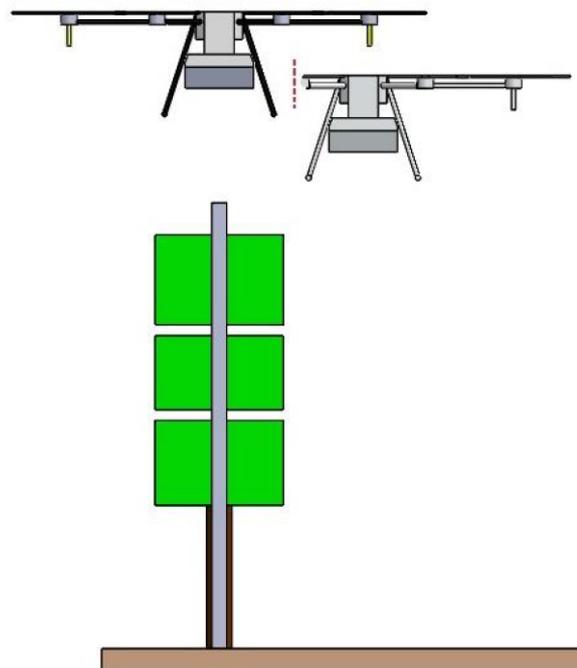


Fig. 62 Possibili posizioni assunte dal drone durante la spruzzatura. [12]

del drone quindi è consigliabile ridurre il più possibile l'altezza di volo rispetto al filare, in modo da minimizzare la distanza che la nube deve percorrere prima di colpire il bersaglio, compatibilmente comunque con i limiti forniti dal costruttore in termini di sicurezza di volo.

Ogni configurazione ha i suoi pro ed i suoi contro, le tre principali adottabili sono:

- *Drone centrato fra i filari:* in questo caso il trattamento verrebbe effettuato tramite il drone che segue la linea di mezzeria fra due filari adiacenti. Può essere applicata efficacemente quando la distanza interfilare è ridotta, altrimenti dovrebbero essere predisposte delle prolunghie ed appendici per portare gli ugelli il più possibile in prossimità della vegetazione. Agendo in questo modo, sarebbe possibile trattare due filari alla volta, riducendo così i tempi. Sarebbe comunque da studiare attentamente un'opportuna angolazione degli ugelli, in quanto si rischierebbe che una gran parte del liquido finisca sul terreno a causa delle correnti d'aria verso il basso.
- *Drone sopra il filare:* adottando questo tipo di trattamento, il drone si troverebbe a seguire l'asse del filare stesso, concentrandosi così su un filare alla volta. Il trattamento in questo caso verrebbe fatto con una nube proiettata in verticale, sfruttando lo scuotimento delle foglie dato dalla corrente d'aria. Anche in questo caso è opportuno regolare i vari parametri di volo e spruzzatura a seconda delle condizioni che si presentano. Infatti, potrebbe esserci il rischio che il trattamento sia inefficace sugli strati inferiori della pianta.
- *Drone accostato al filare:* una tecnica mista fra le precedenti introdotte potrebbe essere quella di far volare il drone accostato al filare. In presenza di vento lieve, posizionandosi controvento, questa tecnica potrebbe ridurre il drift causato dalle correnti laterali. Lo svantaggio principale è quello di poter trattare un solo lato del filare per volta, aumentando quindi i passaggi che il velivolo deve fare.

Partendo quindi dalle considerazioni fatte sui vari tipi di assetto di volo che il drone può assumere durante il trattamento, bisogna considerare il fenomeno del *downwash* e in che misura possa influenzare la deposizione delle particelle di prodotto sulle foglie. Infatti, considerando che per correnti d'aria di pochi metri al secondo, le particelle più fini possono essere trasportate a decine di metri di distanza, il posizionamento degli ugelli con una configurazione sbagliata potrebbe avere effetti disastrosi sull'efficienza del trattamento.

### 4.2.3 Il downwash nel volo statico.

Dallo studio [17], effettuato eseguendo delle simulazioni CFD su un quadricottero in *hovering* (volo stazionario), poi validate tramite prove sperimentali, è possibile avere un'idea dello spostamento di aria generato dalle pale durante il loro movimento e delle velocità delle correnti in gioco.

Il dominio totale utilizzato per le simulazioni è un cilindro di 6 m di diametro, ed un'altezza di 5 m. Per quanto riguarda il drone, la posizione relativa è indicata nella Fig 63, dove le coordinate sono espresse in metri. Per avere un riferimento sulla grandezza dello stesso, la diagonale fra i centri delle due eliche contrapposte misura 1,4 m.

Durante le prove effettuate, il regime di rotazione delle pale, che ruotano con diversi sensi di rotazione per l'equilibratura delle coppie, si attesta sui 2500 rpm.

È interessante notare come l'altezza a cui è stato posizionato il drone, potrebbe essere perfettamente equiparata a quella adottata durante i trattamenti. Chiaramente in questo caso, le prove sono state svolte considerando uno spazio vuoto sotto al velivolo, nella realtà sorgerà un disturbo dato dalla presenza del filare.

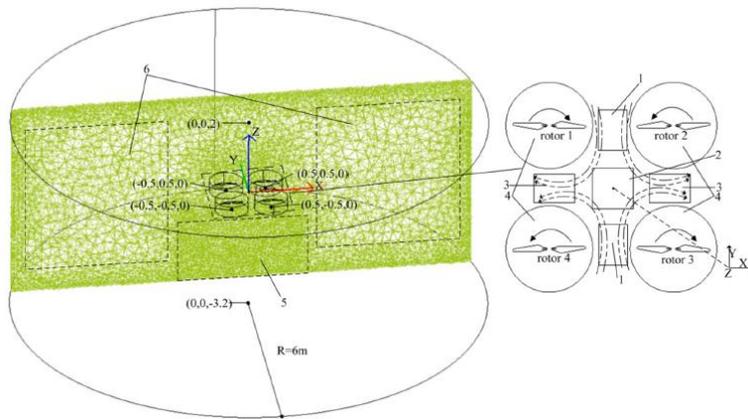


Fig. 63 Dominio su cui sono state effettuate le simulazioni. [18]

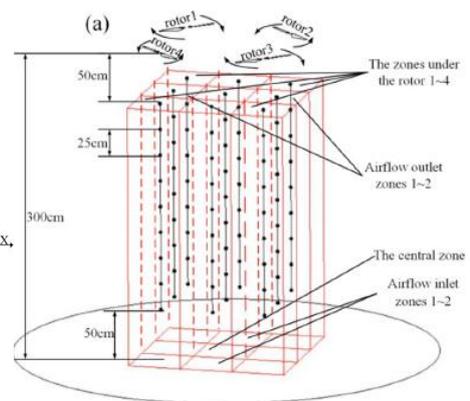


Fig.64 Setting per le prove sperimentali di validazione. [18]

Da com'è possibile vedere dalla Fig.63, che rappresenta il dominio computazionale, vengono identificate varie zone. In particolare: 1 rappresenta la zona di ingresso del flusso d'aria, 2 la zona centrale, 3 la zona di uscita del flusso di aria, 4 la zona sottostante i rotori, 5 la zona dove la meche è meno rifinita e 6 la zona interessata maggiormente dallo studio dove la meche è più fitta.

Per validare i dati, è poi stato creato in laboratorio un telaio in alluminio su cui sono state posizionate le eliche, in cui sono state evidenziate le varie zone come nella simulazione fatta al computer Fig. 64. Grazie ad un anemometro montato su un piedistallo telescopico, sono state

effettuate le varie rilevazioni a varie altezze e posizioni, in modo da confrontare i dati ricavati numericamente con quelli reali.

Dal confronto fra il modello sviluppato tramite il software di simulazione e i dati reali, si possono notare delle discrepanze a seconda della distanza dal suolo.

Infatti, nella zona compresa fra 1-2,5 m da terra l'errore relativo medio si attesta su valori inferiori al 10%, nella zona a 0,75 m da terra si attesta su valori inferiori al 15%, mentre aumenta fino a valori che possono arrivare al 25% nella zona a circa 0,5 m.

Ciò probabilmente è dovuto al fatto che, spostandosi verso terra, diventano importanti i disturbi legati alla presenza del terreno che forma una barriera in cui i getti si rimescolano e creano quindi zone con delle criticità, sia per quanto riguarda il software, sia per quanto riguarda la parte sperimentale. Tuttavia, questo non rappresenta un grosso problema, infatti le foglie sulle quali deve essere concentrato il trattamento, si trovano ad un'altezza compresa nell'intervallo 0,75-2m che è quella dove l'errore si mantiene su valori abbastanza piccoli.

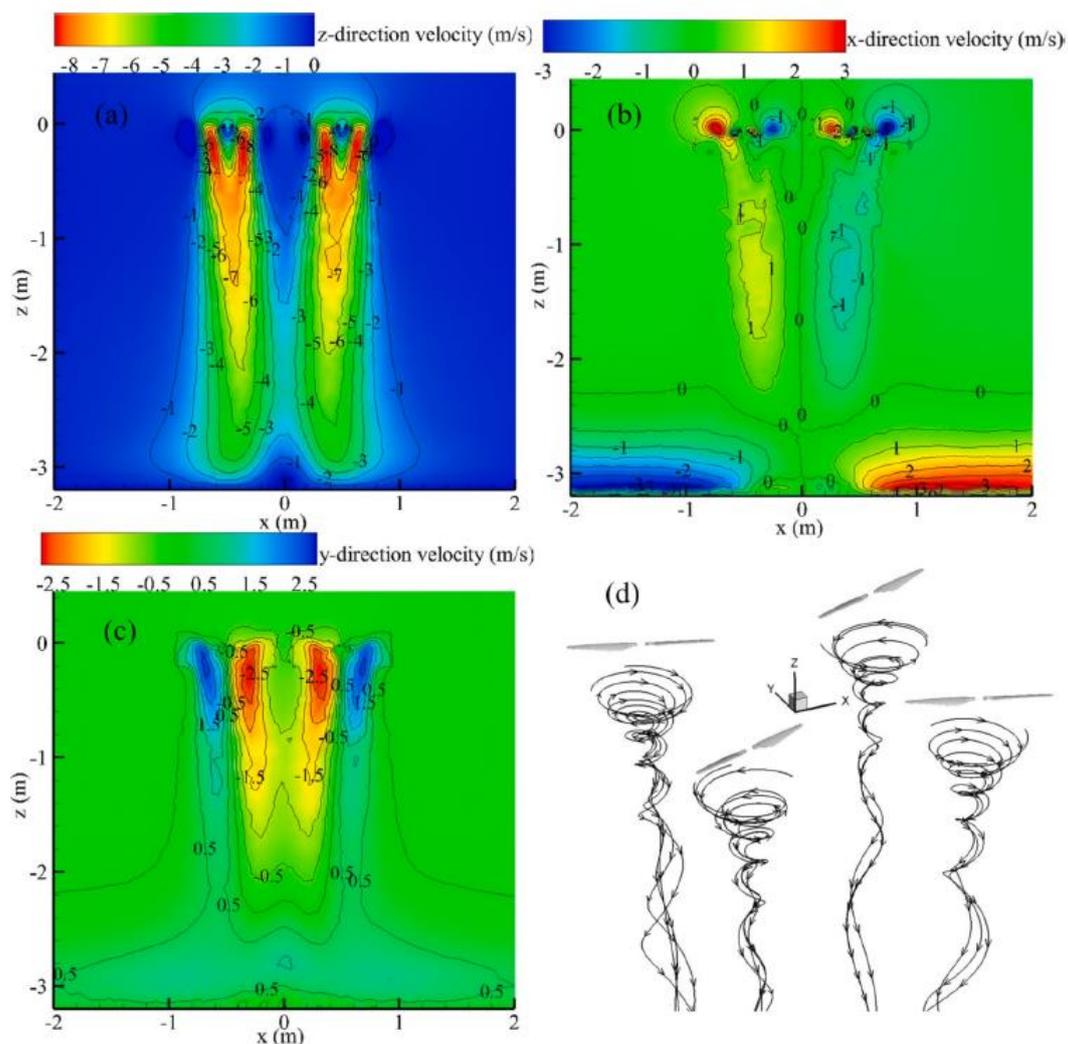


Fig. 65 Campo delle velocità del fluido in xoz.  
 (a) Componente z (b) componente x (c) componente y (d) vortici formati al di sotto dei rotori. [18]

Esaminando i grafici Fig. 65, che rappresentano le varie componenti di velocità assunte dal flusso d'aria a regime durante l'hovering, è possibile comprendere la direzione assunta dalla corrente e intuire quindi l'influenza che potrebbe avere sulla coltura.

Normalmente quando il drone sta in hovering i flussi derivanti dai vari rotori non interferiscono più di tanto uno con l'altro.

Partendo dal grafico (a), che rappresenta la componente z di velocità, si nota come in assenza di corpi sotto al drone, la sua distribuzione sia praticamente simmetrica. Le velocità, che raggiungono valori anche molto elevati in corrispondenza del drone, dove si arriva a circa 9 m/s, decrescono man mano che ci si avvicina al terreno dove arrivano a circa 3-4 m/s. A causa di queste velocità, che non sono trascurabili, il liquido nebulizzato se non opportunamente direzionato, considerando anche l'azione della forza di gravità, potrebbe venir spinto verso il terreno violentemente mancando così il bersaglio.

Per quanto riguarda invece la componente x (b), che si trova nella zona di uscita del fluido, è curioso notare come per elevate distanze dal suolo si attestino su valori minimi, mentre in prossimità del terreno vengano raggiunti valori rilevanti. Questo è dato dal fatto che il fluido raggiungendo il suolo con una componente prettamente verticale, tenda a diffondersi in tutte le direzioni ed in particolare verso x, passando così da un andamento abbastanza ordinato ad uno turbolento.

In (d) invece viene mostrato come l'aria, a causa dell'elevato regime di rotazione delle pale, tenda ad assumere la forma di un piccolo tornado che ruota seguendo il senso di rotazione delle palette. Questo fenomeno è stato evidenziato anche da Travenzoli, il quale ha spiegato che durante i trattamenti, osservando il liquido nebulizzato dagli ugelli che sono montati sotto ai motori del drone, tenda a vorticare.

Tutti questi fenomeni non devono essere visti solo in senso negativo, infatti se opportunamente sfruttati potrebbero aiutare nella corretta deposizione del trattamento sulle foglie. Lo scuotimento delle stesse può aiutare infatti ad aumentare la penetrazione delle goccioline. Il fatto che venga creata una corrente d'aria diretta dall'alto verso il basso, secondo il principio di Bernoulli, a causa della differenza di distribuzione di pressione che viene a crearsi fra la parte superiore ed inferiore della foglia, fa sì che queste vengano ribaltate di continuo garantendo così il trattamento su entrambe le facce.

Inoltre, questi vortici che vengono a crearsi, potrebbero aiutare a risucchiare le particelle che si trovano al di fuori della zona disturbata dal flusso di aria spingendole verso il centro e migliorando il trattamento.

Quanto detto in precedenza riguardo l'andamento del fluido, è possibile vederlo anche dal grafico in Fig. 66, che rappresenta la vorticità del fluido al di sotto di un drone in volo stazionario. Si può notare la formazione di quelli che vengono definiti *wing-tip-vortex*, che sono

legati alla rotazione delle palette e tendono a diventare instabili per angoli di rotazione superiori a  $540^\circ$ , lasciando spazio alla spirale introdotta precedentemente. Il fluido man mano che ci si sposta verso il basso assume un andamento sempre più caotico, dove i vari getti di aria si disturbano uno con l'altro

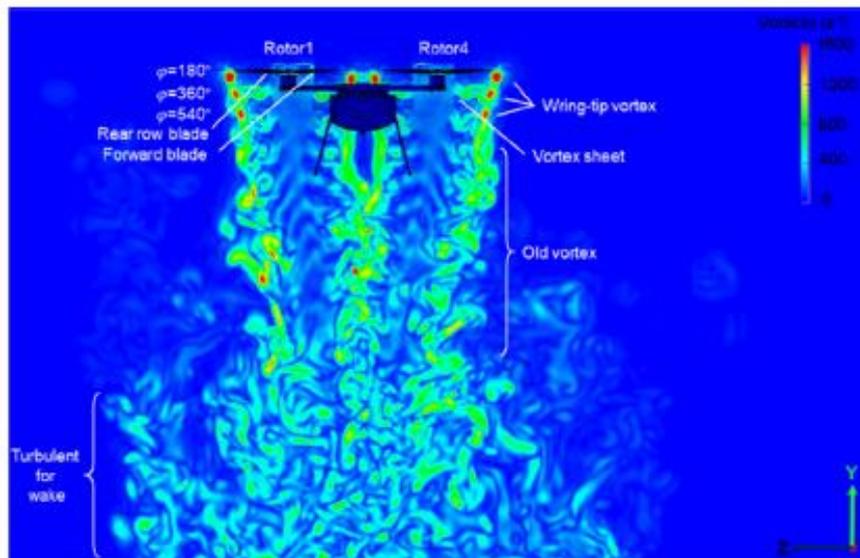


Fig. 66 Vorticità del fluido nella zona sottostante il drone. [19]

#### 4.2.4 Influenza del downwash sulla deposizione del droplet

Quanto introdotto in precedenza, pur facendo capire come i flussi di aria vengano a distribuirsi al di sotto del drone e possano quindi influire sulla deposizione delle goccioline, si riferiva al caso di volo stazionario. Tuttavia, durante il volo la distribuzione delle correnti che si vengono a creare, considerando anche che il drone per avanzare si debba inclinare e la sua posizione non sia più parallela al terreno, subisce l'effetto della velocità a cui il velivolo si sposta ed i getti di aria interferiscono fra di loro aumentandone il disordine. L'inclinazione assunta dal drone è un parametro che viene definito come *pitch-angle*.

Questo fenomeno è stato studiato da [19], dove i risultati ricavati tramite software, sono poi stati verificati e validati anche in questo caso sperimentalmente, con prove di laboratorio in una galleria del vento.

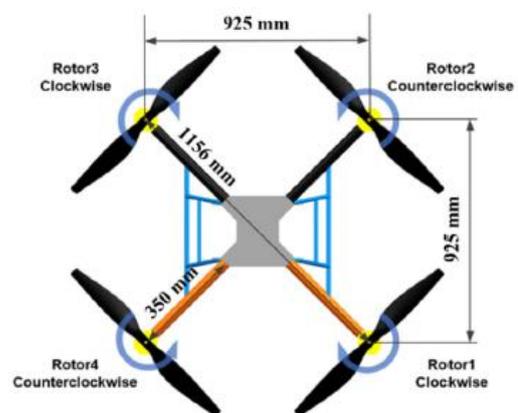


Fig. 67 Dimensioni del drone utilizzato durante le simulazioni. [19]

Il velivolo utilizzato per lo studio è un drone commerciale del peso a vuoto di 12,1 kg che è in grado di trasportare 10 L di liquido ed è dotato di 4 ugelli posti in linea, le cui dimensioni di massima sono riportate nella Fig.67.

Per le simulazioni, le eliche sono state scansionate tramite uno scanner 3D e ricostruite tramite software.

Le velocità assunte dai droni non sono elevatissime, in quanto pur potendosi muovere a velocità molto elevate, queste garantirebbero dei trattamenti inefficienti. Il campo di velocità esaminato è nel range di 1-7 m/s con inclinazioni che variano nell'intervallo 1-7°. Chiaramente più sarà alta la velocità a cui sta volando e maggiore sarà l'inclinazione assunta durante l'assetto di volo. Dalla Fig.68-69, che rappresenta i flussi per i due valori estremi di velocità, si può notare chiaramente come man mano che la velocità e l'inclinazione del drone aumentano, risulterà maggiore la complessità dei vortici che vengono a crearsi. Nel primo caso, si può notare che non ci sia una sostanziale differenza fra un drone che vola a bassa velocità ed uno in hovering. Infatti, i flussi sono molto simili a quelli del caso esaminato in precedenza e si conservano globalmente al di sotto del velivolo. Tuttavia, aumentando considerevolmente la velocità, si nota come la forma assunta dai flussi sia molto diversa dal caso di partenza. In particolare, per velocità superiori a 5 m/s si può notare la formazione di un flusso a *ferro di cavallo* nella parte posteriore del drone. Questo flusso molto caotico, ha sia un effetto positivo che uno negativo: aiuta a aspirare verso il centro le particelle più vicine alla fusoliera, tuttavia tende a spingere verso l'alto quelle più distanti aumentandone così le possibilità di drift.

Si vede come aumentano la velocità la parte disturbata dai vortici tenda ad assumere una forma allungata, raggiungendo anche lunghezze considerevoli di circa 5-6 m.

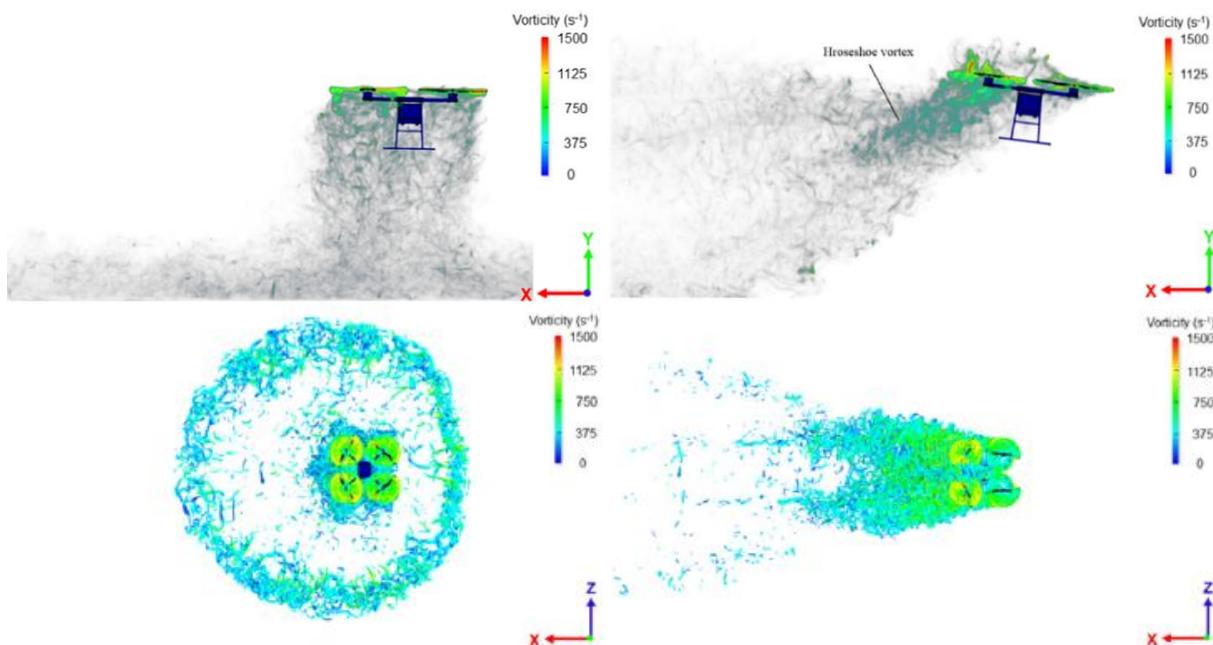


Fig. 68 Flussi generati ad una velocità di avanzamento di 1 m/s. [19]

Fig. 69 Flussi generati ad una velocità di avanzamento di 7 m/s. [19]

Considerando quindi il fatto che i flussi di aria vengano nettamente modificati in un range di velocità di avanzamento tutto sommato non molto ampio, proprio questo parametro può essere uno dei fattori chiave da studiare per ottimizzare il trattamento.

Infatti, il focus non va indirizzato solamente alla riduzione del drift, poiché trovandoci in una coltura che si sviluppa in altezza è necessario trattare in maniera ottimale sia gli strati superiori a diretto contatto con gli ugelli, sia quelli più in basso. Dovendo garantire l'uniformità del trattamento, è opportuno sfruttare le correnti d'aria generate dal drone, che creando una differenza di pressione fra le facce delle foglie e le fanno muovere aumentando così la penetrazione del prodotto. Considerando ciò, visto che più il drone si muove velocemente e più le palette devono aumentare il regime di rotazione, si è tentati di dire che ad una maggior velocità di avanzamento lo scuotimento delle foglie causato dai flussi di aria sia migliore. Invece non è proprio così: infatti analizzando il profilo di velocità assunto dall'aria a diverse velocità di avanzamento Fig. 70, si nota come corrispondentemente all'aumentare del regime di rotazione delle palette, le velocità in corrispondenza della fusoliera aumentino in senso assoluto, raggiungendo un valore massimo che si sposta sempre di più verso il corpo del drone. Si vede invece come spostandosi verso il terreno, invece, le velocità assunte dai vortici si attestino su valori più bassi

man mano che la velocità di avanzamento del drone aumenta. Tutto ciò fa capire come volando troppo velocemente, si causerebbe uno scuotimento molto violento degli strati superiori della pianta, che si trovano già più vicini agli ugelli, trovandosi ad avere gli strati inferiori molto sfavoriti vista la distanza maggiore rispetto ai precedenti e lo scuotimento inferiore delle foglie. Per quanto riguarda invece l'influenza delle correnti di aria, è noto che particelle al di sotto di una certa grandezza che si aggira sui  $200\ \mu\text{m}$ , siano più soggette ai fenomeni di drift rispetto a quelle più grandi.

I due parametri di volo, che influenzano maggiormente il movimento delle particelle da cui è formata la nube durante la spruzzatura quindi sono: la velocità di avanzamento e l'altezza a cui viene effettuato il trattamento. Il primo fattore perché per muoversi più velocemente, il drone necessita di generare più portanza e quindi i flussi di aria diventano più disordinati. Inoltre, la

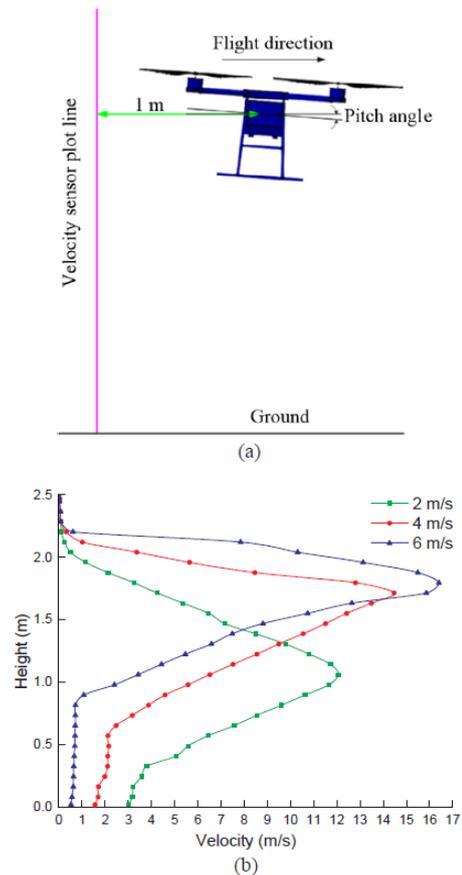


Fig. 70  
 (a) Posizionamento dei sensori di rilevazione delle velocità.  
 (b) Distribuzione della velocità dell'aria a diverse altezze, per diverse velocità di avanzamento. [19]

formazione del ferro di cavallo fa sì che in prossimità del velivolo si intensifichino le velocità delle varie correnti d'aria aumentando gli effetti del possibile drift. Il secondo perché volando ad una distanza troppo elevata dalle piante, le particelle debbano compiere un percorso più lungo e possano essere più facilmente influenzate dai fenomeni atmosferici che le portano a mancare il bersaglio.

Partendo quindi dalla nube generata da un ugello Lechler alimentato con acqua ad una pressione di 10 Mpa, che smaltisce una portata di 4 l/min, è possibile ottenere una distribuzione delle goccioline che è rappresentata nel grafico a fianco Fig.71. Da questo grafico, si nota subito come la nube sia un qualcosa di eterogeneo, dove la dimensione delle particelle varia di molto. Per questo si avrà che una certa parte di liquido verrà influenzata maggiormente dal vento durante la deposizione, mentre quella con le dimensioni maggiori raggiungerà più facilmente il bersaglio.

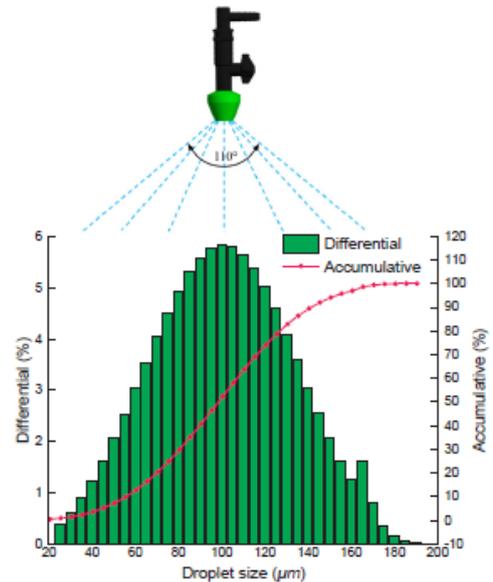


Fig. 71 Distribuzione differenziale e cumulativa delle goccioline prodotte dall'ugello Lechler. [19]

Partendo da questa distribuzione sono stati ricavati i tre

casi (a) (b) (c) che rappresentano la traiettoria seguita dalle particelle di acqua, per un'altezza di volo di 2 m, quando velocità di avanzamento aumenta.

Nel caso (a), quando il drone si muove ad una velocità di 2 m/s si nota che l'influenza del *downwash* è minima, infatti la traiettoria delle particelle che tendono prevalentemente ad andare verso il basso, è scarsamente influenzata dalle correnti. In questo caso prevale la componente di velocità impressa dall'ugello al liquido all'uscita dello stesso e la forza di gravità. Man mano che la velocità di avanzamento cresce ed i flussi di aria si fanno più marcati, le particelle assumono sempre di più un andamento caotico e come detto in precedenza, la formazione del ferro

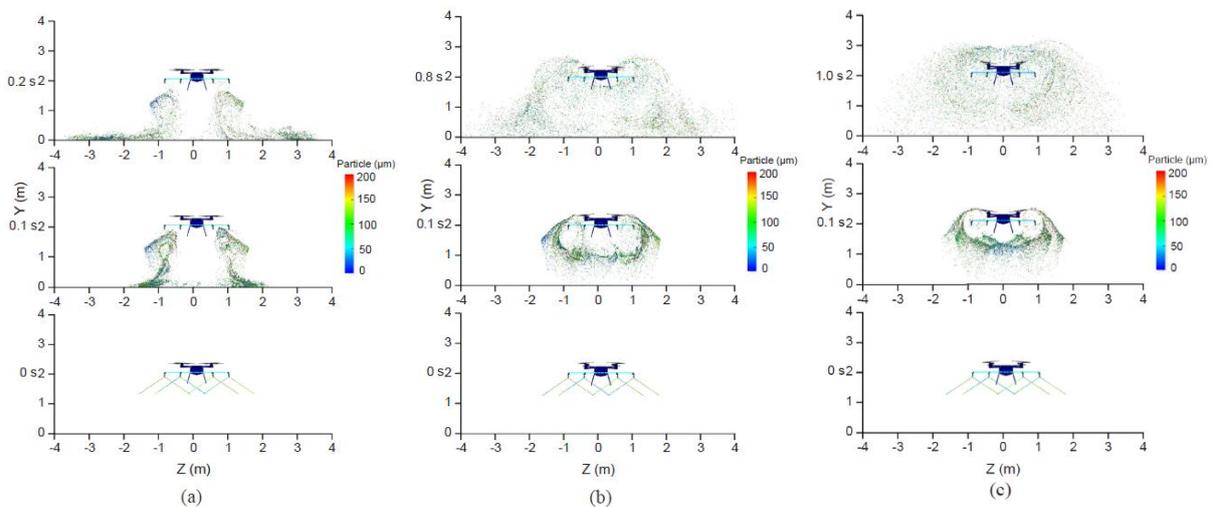


Fig.72 Distribuzione della nube per un'altezza di volo di 2m e velocità di avanzamento di: (a) 2 m/s, (b) 4 m/s, (c) 6 m/s. [19]

di cavallo, fa sì che quelle più piccole vengano spinte addirittura al di sopra del velivolo aumentando le possibilità di deriva e dispersione nell'ambiente.

Nelle prove sperimentali, sono stati analizzati anche l'influenza legata al diverso posizionamento della barra portaugelli e della posizione relativa dei vari ugelli ed è emerso che questi fattori abbiano una scarsa influenza sul processo. Si può concludere quindi, che i due fattori legati al movimento del drone che influenzano in maniera più marcata la deposizione del liquido ed il drift siano: l'*altezza* e la *velocità di volo*.

## 4.2.5 Possibili soluzioni per la mitigazione della deriva

### 4.2.5.1 Ugelli antideriva

Il drift è un effetto collaterale dei trattamenti chimici effettuati in agricoltura ed è considerato una delle maggiori cause di inquinamento per i corsi d'acqua, l'aria e il terreno. Il risultato è ancora peggiore quando vengono utilizzati atomizzatori per frutteto, in quanto dovendo avere una spruzzatura tridimensionale in colture come gli alberi da frutto e le viti, l'emissione viene assistita da una corrente d'aria che dirige il droplet sulle colture e aumenta la dispersione di questo nell'ambiente. Basti pensare che un leggero vento di appena 5km/h può riuscire a trasportare una goccia con un diametro di 20  $\mu\text{m}$  fino a circa 300 m di distanza.

Proprio per le considerazioni fatte in precedenza sulla grandezza delle gocce e l'influenza che questa ha sul drift, si può valutare l'impiego di quelli che vengono detti ugelli *antideriva*.

Questi ugelli sono simili a quelli normali idraulici, tuttavia permettono di generare a parità di portata, delle gocce di dimensioni

maggiori. Questo perché sono dotati oltre al foro di passaggio del liquido anche di una cavità dove per effetto *Venturi* viene a crearsi una depressione che aspira l'aria dall'atmosfera. Aria e liquido si incontrano poi nella *camera di miscelazione*, così le gocce che verranno a formarsi durante l'atomizzazione, ingloberanno anche una quantità di aria oltre al liquido.

Tutto ciò porta alla formazione, a parità di liquido, di gocce più grandi e meno soggette all'azione delle correnti d'aria, che una volta raggiunte le foglie tendono ad esplodere garantendo così una migliore penetrazione e copertura della coltura.

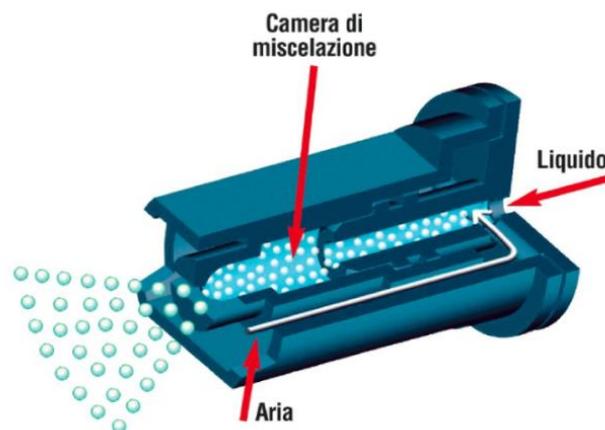


Fig. 73 Principio di funzionamento dell'ugello antideriva. [20]

Uno degli svantaggi per una possibile applicazione su un drone agricolo, è il fatto che per funzionare necessitano di pressioni lievemente superiori ai normali ugelli a cono destinati all'utilizzo di frutteto e vigneto. Inoltre, a causa della maggior complessità e tortuosità dei passaggi interni, questi ugelli sono più soggetti all'intasamento rispetto ai convenzionali. Il che implica, per garantirne un corretto funzionamento, intervalli di manutenzione più ravvicinati ed una maggior attenzione nell'applicazione: sia del corretto filtro interno, che di un filtro aggiuntivo prima dell'ugello stesso.

Una delle convinzioni comuni è che più fitta sia la nebbiolina generata dagli ugelli e maggiore sia l'efficacia del trattamento. Tuttavia non è così: infatti ad una nebbia fitta corrispondono goccioline piccole e se gli apparecchi non sono tarati a dovere, è possibile che le goccioline vengano trasportate al di là del filare che si sta trattando, contaminando il terreno e sprecando il prodotto utilizzato. Quanto detto è possibile notarlo dalla Fig.74.



Fig. 74 Dispersione della nube generata da una irroratrice convenzionale. [21]

La nube nella foto è data dal fatto che gli ugelli tradizionali, nel processo di atomizzazione e creazione dello spray, generino un ampio spettro dimensionale in cui sono incluse un elevato numero di gocce di dimensioni molto piccole. Grazie all'utilizzo degli ugelli ad induzione di aria, è possibile avere una riduzione delle goccioline extra fini di circa 20 volte. Dalla foto precedente appare chiaro inoltre, che un altro importante fattore da considerare, sia l'adattamento del trattamento che deve tenere conto delle varie fasi vegetative della pianta. Infatti, probabilmente l'immagine si riferisce ad un trattamento eseguito in primavera, durante le prime fasi della ripresa vegetativa delle viti, dove c'è la presenza della sola parte legnosa e le poche foglie presenti sono rade e non permettono una buona azione schermante. Quest'ultima considerazione è da tenere conto anche per le zone di buffer, infatti la vegetazione spontanea che si trova al bordo dei campi coltivati in estate, può costituire una barriera efficace contro l'inquinamento. Per fare un confronto fra i diversi ugelli e in quale misura essi siano affetti dal fenomeno della

deriva, è possibile esaminare il grafico riportato, che confronta tre tipi di ugelli: il tradizionale, quello a pre-camera e quello ad iniezione di aria.

Il grafico che è dato in funzione della velocità del vento e porta in ordinata i valori dell'indice di deriva, che sono calcolabili con opportune formule e danno indicazioni sulla deriva potenziale che si verifica.

Si nota subito come il *tradizionale* sia il peggiore dei tre in ogni condizione di vento e si

attesti su un indice abbastanza elevato. Si trovano poi quelli a *pre-camera*, i quali sono dotati di una camera dove viene dosata la miscela e la velocità del liquido viene ridotta, permettendo di ottenere gocce più grosse rispetto ad un ugello tradizionale.

Esaminando poi la curva riferita a quelli ad *iniezione di aria*, si nota come questi riescano a ridurre in maniera importante il fenomeno del drift, infatti soprattutto in condizioni di vento scarso i valori dell'indice sono molto bassi.

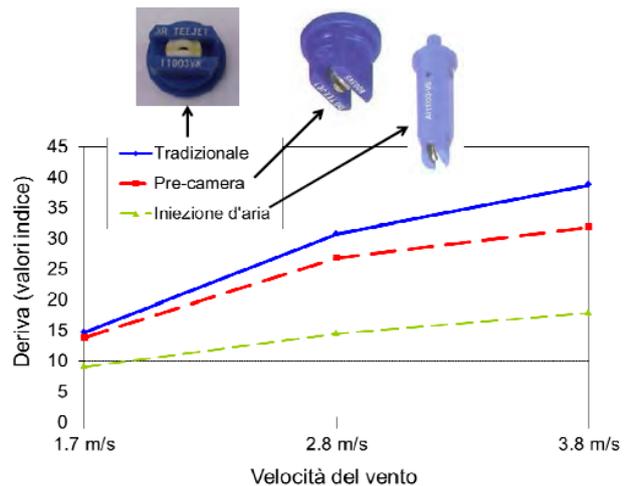


Fig. 75 Confronto fra diverse tipologie di ugello. [22]

#### 4.2.5.2 Gli ugelli rotativi

Poiché durante la spruzzatura, il drone genera delle correnti d'aria verso il basso, queste possono influenzare la deposizione delle goccioline sulle foglie. Visto che uno dei fattori principali che influenza la deriva delle goccioline è la loro grandezza, bisogna dotare il velivolo del giusto sistema di spruzzatura ed adottare il giusto setting di parametri, che permetta così di ottimizzare il processo.

Oltre ai normali *ugelli idraulici*, di cui si è parlato negli altri capitoli, esistono anche ugelli rotativi che permettono di avere una maggior efficienza di regolazione durante le varie fasi di volo. Dei primi citati, nei droni in commercio attualmente si utilizzano principalmente quelli piatti, che permettono di avere una buona velocità iniziale del liquido e gocce piuttosto grandi, quindi riuscire a compensare in una certa misura la presenza dei vortici

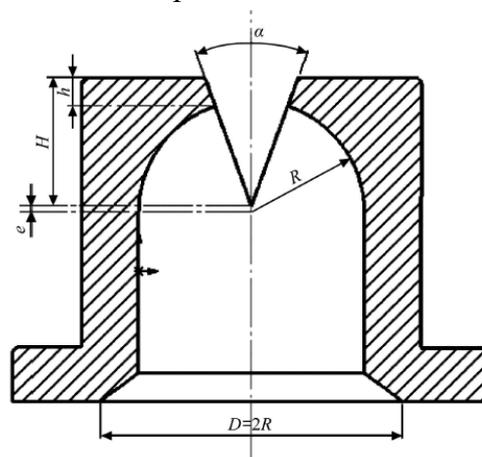


Fig. 76 Sezione di un ugello idraulico. [23]

d'aria. Il principio di funzionamento è basato sull'esistenza di un  $\Delta p$ , che costringe il liquido a

passare all'interno dell'ugello, dove questo verrà accelerato e giungendo nell'atmosfera, disintegrato in particelle infinitesime. L'ugello, com'è possibile vedere dalla Fig.76 ha dei parametri geometrici caratteristici che ne influenzano il processo di generazione del *droplet*.

Sono presenti in letteratura delle relazioni, che utilizzando i principi fondamentali della fluidodinamica riescono a fornire i coefficienti per il calcolo della portata, considerando i parametri geometrici. Tuttavia, a causa della complessità dei fenomeni che vengono a verificarsi internamente all'ugello, spesso sono affette da imprecisioni ed occorre poi una verifica tramite software di simulazione o sperimentalmente.

Una valida alternativa a questi, possono essere gli ugelli definiti come: “ Rotary atomization sprayer”. In questi ugelli il principio di funzionamento è completamente differente da quelli tradizionali utilizzati anche nell'agricoltura convenzionale. Da com'è possibile notare dalla Fig.77, il corpo dell'atomizzatore è nettamente più complesso di quello di un normale ugello. Infatti, è costituito da vari componenti, i principali sono: il *motore elettrico*, il *cono di distribuzione* del liquido e nella parte inferiore il *disco rotante*.

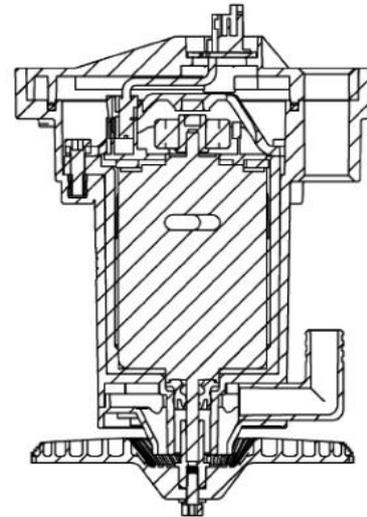


Fig. 77 Sezione dell'ugello rotativo. [23]

Il disco, che può essere anche palettato, è calettato solidalmente sull'albero del motore, il quale lo mette in rotazione. Il liquido, mosso da una pompa peristaltica arriva dall'alto, viene distribuito uniformemente nella parte centrale del disco e poi spinto verso la periferia dalle forze centrifughe che si instaurano, formando un film liquido che tende a disintegrarsi all'uscita dei canali formati dalle palette.

La *formazione del droplet* è quindi dovuta sia al moto rotatorio del disco, che all'attrito con l'aria. Infatti, il regime di rotazione è molto elevato ed il liquido esce dal disco ad elevate velocità. Questo processo porta quindi alla formazione di una nube di goccioline più o meno fini, di forma circolare, che assume una distribuzione più uniforme rispetto a quella degli ugelli tradizionali.

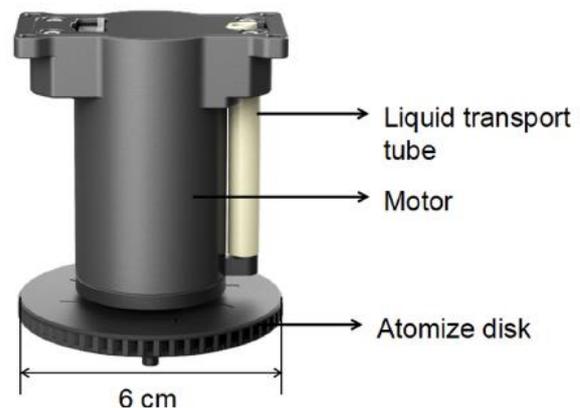


Fig. 78 Struttura esterna dell'atomizzatore. [23]

Questo particolare modo di generare la nebulizzazione del liquido può essere vantaggioso per l'applicazione con un *UAV*. Infatti, dovendo sorvolare le colture, il drone si trova a compiere un moto che non può essere in alcun modo uniforme. Infatti, sia nel caso si voglia trattare un campo coltivato, sia nel nostro caso: ci saranno momenti in cui il drone all'inizio del filare

accelera, decelerazioni quando arriva al fondo del filare e deve cambiare corsia, momenti in cui la spruzzatura deve essere stoppata e momenti in cui invece deve essere continua ed uniforme. Tutto ciò, visto che si lavora nell'agricoltura di precisione, introduce la necessità di regolare la quantità di liquido nei vari momenti di volo.

Quanto detto, semplificando la traiettoria di volo, può essere immaginato considerando un singolo filare, che può essere rappresentato come una linea retta Fig. 79. Dovendo spostarsi dal punto A al punto B, ci sarà un tempo compreso fra  $t_0$  e  $t_1$  dove partendo da fermo dovrà accelerare, un periodo di tempo fino a  $t_2$  in cui sarà nel bel mezzo del filare e poi trovandosi ad arrivare nella parte terminale ci sarà una decelerazione da  $t_2$  in poi.



Fig. 79 Traiettoria rettilinea seguita dal drone. [24]

Se durante il moto, la quantità di liquido spruzzata nell'unità di tempo si mantenesse costante, ci sarebbero zone dove si troverebbero accumuli e zone scarsamente trattate. Per evitare ciò, è necessario un sistema che permetta di poter adattare la spruzzatura momento per momento durante il volo, come è rappresentato nella Fig.80.

Durante l'accelerazione che porta il drone ad una velocità di crociera di circa 5 m/s, infatti, la quantità di liquido dovrà crescere man mano che la velocità aumenterà ed il contrario dovrà succedere nella fase finale fino ad arrestare il flusso di liquido

Utilizzando quindi i classici ugelli idraulici, che lavorano con pressioni che possono andare da 1 a circa 20 bar ed analizzando le tabelle riguardanti la portata smaltita in funzione della pressione di alimentazione e la dimensione delle gocce, si nota come per variare efficacemente questi parametri, si debba variare la pressione in un ampio range. Tutto ciò, con le pompe attualmente in commercio, dovendo ottimizzare il peso delle stesse, risulta difficile. Considerando infatti una pompa molto prestante, non si riesce ad arrivare a pressioni superiori ai 5-6 bar.

L'unico metodo applicabile, dove si riscontra una netta variazione delle portate e delle dimensioni delle goccioline, è cambiare la taglia degli ugelli: soluzione impensabile durante la spruzzatura e che comunque farebbe perdere molto tempo.

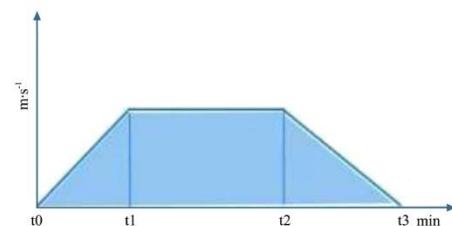


Figure 4 Speed vs time

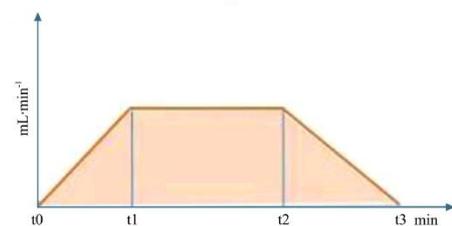


Fig. 80 Velocità e portata in funzione del tempo. [23]

Per sopperire a questo problema, si può pensare all'utilizzo degli *atomizzatori rotativi*. Infatti, in questi ultimi la regolazione della portata e della grandezza del doplet possono essere controllate con maggior efficacia. Agendo quindi sulla pompa che porta il liquido al disco, si può controllare la quantità di liquido spruzzata, mentre agendo sul regime di rotazione di quest'ultimo, che può andare da 0 rpm fino a 17000 rpm e oltre, è possibile avere un controllo sulle dimensioni delle gocce avendo sempre una buona uniformità della nube.

Dalla tabella sottostante è possibile notare l'influenza del regime di rotazione sulla dimensione delle gocce. Mantenendo infatti la portata costante, è possibile variando il regime di rotazione, ottenere droplet di dimensioni anche molto differenti con lo stesso spruzzatore.

In questo caso infatti, si può passare da avere: gocce XS che indica un VMD 503-665  $\mu\text{m}$ , a gocce F che hanno un VMD di 106-235  $\mu\text{m}$ .

Voltage/V	Rotation rate/rpm	Dv <sub>0.1</sub> <sup>b</sup> / $\mu\text{m}$	Dv <sub>0.5</sub> <sup>b</sup> / $\mu\text{m}$	Dv <sub>0.9</sub> <sup>b</sup> / $\mu\text{m}$	V < 150 <sup>c</sup> (%vol)	V < 100 <sup>c</sup> (%vol)	RS <sup>d</sup>	Droplet size category <sup>e</sup>
6.4	2000	251.4 (17.6)	591.2 (35.9)	1236.5 (52.0)	3.9 (0.4)	2.0 (0.0)	1.67 (0.00)	XC
7.9	2500	160.4 (26.7)	408.8 (59.4)	743.0 (167.1)	9.5 (0.2)	4.7 (2.0)	1.38 (0.17)	C
9.3	3000	111.7 (3.2)	290.6 (5.3)	512.2 (65.2)	17.0 (0.5)	7.7 (0.2)	1.37 (0.24)	M
10.5	4000	116.4 (1.5)	277.3 (9.4)	459.9 (31.8)	16.8 (0.8)	6.5 (0.6)	1.24 (0.09)	M
13.9	5000	102.5 (5.3)	219.6 (21.5)	332.8 (32.8)	25.6 (4.0)	9.8 (1.3)	1.04 (0.02)	M
16.3	6000	98.8 (5.6)	194.9 (10.2)	298.0 (11.6)	30.7 (4.2)	11.0 (2.4)	1.02 (0.02)	M
18.9	7000	88.9 (2.4)	175.5 (13.2)	272.1 (20.6)	38.3 (5.8)	15.5 (2.2)	1.03 (0.03)	F
21.1	8000	80.2 (2.1)	153.5 (6.6)	233.0 (9.7)	48.4 (4.0)	20.5 (1.7)	1.00 (0.02)	F
23.5	9000	76.7 (0.6)	139.8 (1.0)	210.7 (3.5)	60.8 (0.4)	25.1 (0.7)	1.03 (0.05)	F
25.9	10,000	73.7 (0.0)	123.2 (0.0)	200.4 (0.0)	68.3 (0.0)	31.2 (0.0)	1.03 (0.00)	F
28.5	11,000	71.4 (0.6)	120.1 (1.5)	182.7 (7.7)	74.3 (2.9)	31.6 (0.4)	0.93 (0.05)	F
31.1	12,000	66.3 (1.5)	111.6 (0.9)	186.6 (11.1)	77.0 (3.3)	39.7 (0.1)	1.08 (0.11)	F
33.5	13,000	65.2 (0.0)	107.9 (0.1)	156.6 (0.0)	87.0 (0.0)	41.9 (0.2)	0.85 (0.02)	F
36.1	14,000	62.3 (0.5)	104.0 (0.0)	157.4 (2.1)	87.1 (0.6)	45.8 (0.1)	0.91 (0.02)	F
38.6	15,000	63.3 (0.0)	100.8 (0.0)	145.4 (0.0)	92.4 (0.0)	49.0 (0.1)	0.82 (0.03)	F
41.4	16,000	62.0 (0.4)	96.2 (0.2)	137.8 (0.8)	94.9 (0.2)	55.1 (0.3)	0.79 (0.01)	F
44.2	17,000	59.0 (0.7)	93.7 (1.2)	131.9 (2.1)	96.5 (0.4)	58.4 (1.6)	0.78 (0.00)	F

Note: The droplet size was tested at a flow rate of 0.54 L/min.

<sup>a</sup> XAG company.

<sup>b</sup> D<sub>v,m</sub>-The droplet diameter ( $\mu\text{m}$ ) at which ( $m \times 100$ ) % of the spray volume contains droplets at the given size and below.

<sup>c</sup> <100/150  $\mu\text{m}$ -The percent of the spray volume containing droplets 100/150  $\mu\text{m}$  in diameter and below.

<sup>d</sup> RS-relative span.

<sup>e</sup> Spray classifications based on ASAE S572.1 guidelines: VF, very fine; F, fine; M, medium; C, coarse; VC, very coarse; XC, extremely coarse.

Fig. 81 Dimensioni caratteristiche delle gocce in funzione del regime di rotazione per una portata costante. [23]

Proprio grazie a questa caratteristica di poter variare agevolmente sia la portata che le dimensioni delle goccioline, una volta fissati i parametri che ottimizzano il trattamento, potrebbero essere validamente applicati sia per controllare la giusta *dosatura* del fitofarmaco sia per limitare il fenomeno della *deriva*.

## 4.2.6 Orientazione degli ugelli nel processo di spruzzatura

La riduzione dell'inquinamento creato dai pesticidi è un fattore molto importante per quanto riguarda la vite, in quanto i trattamenti annuali sono molto frequenti.

Se per esempio si prende la Francia, il sistema più utilizzato è quello degli spruzzatori pneumatici. Tuttavia, la maggior parte di questi non soddisfano i requisiti minimi richiesti dalle normative francesi per quanto riguarda il *drift*.

La differenza principale nella spruzzatura in un campo coltivato e un frutteto/vigneto è che nel primo caso gli ugelli sono montati su una barra e agiscono in verticale, mentre nel secondo possono spruzzare orizzontalmente oppure addirittura verso l'alto. Ciò quindi rende necessario indagare come il *droplet* si comporti e la sua eventuale dispersione nella zona circostante.

Soprattutto nell'applicazione di un drone, dove le correnti d'aria che disturbano la corretta deposizione delle goccioline possono essere anche molto rilevanti, è opportuno indagare come la corretta orientazione dell'ugello possa o meno garantire un miglior risultato. Infatti, si potrebbe pensare di montare gli ugelli sotto al drone con una certa inclinazione, in modo da garantire che parte del liquido nebulizzato che a causa del *downwash* andrebbe a depositarsi sul terreno, riesca invece a colpire le piante.

L'influenza che ha l'orientazione dell'ugello e la velocità del liquido all'uscita dallo stesso, sulla deposizione del fitofarmaco sul bersaglio, è stata indagata nello studio [42], dove sono stati esaminati tre ugelli utilizzati in vigneto. Gli ugelli esaminati sono: Lechler IDK 90-01 C, CoorsTek TVI 80-0050, Teejet TXA 800067. In particolare, l'ultimo dei tre ugelli è stato preso in considerazione per una possibile applicazione su drone.

Durante i test sono stati alimentati con opportune pressioni, in moto da garantire tutti e tre la stessa portata di liquido di 0,37 l/min ed uniformare così i dati ottenuti.

Per il Teejet TXA, questa portata corrisponde ad una pressione di alimentazione di 570 kPa, che è molto vicina a quelle raggiunte nel circuito utilizzato durante le simulazioni effettuate nel capitolo 6.

Inoltre, poiché nelle prime fasi vegetative, i trattamenti tramite trattore vengono effettuati senza l'ausilio del ventilatore, anche in questo caso di studio non sono presenti correnti d'aria.

I due setting di spruzzatura sono quelli presentati in Fig.82: dove i primi test vengono fatti con l'ugello in verticale, mentre i secondi con l'ugello posto in orizzontale. In entrambi i casi i dati sulle particelle e la loro velocità, vengono raccolti con un *PDPA* posto a 40 cm dall'uscita dell'ugello, che potrebbero rappresentare lo spazio che intercorre fra lo spruzzatore e la coltura nel caso reale.

I tre ugelli creano particelle di dimensioni diverse, in particolare la loro dimensione è massima nell' IDK e minima nel TXA.

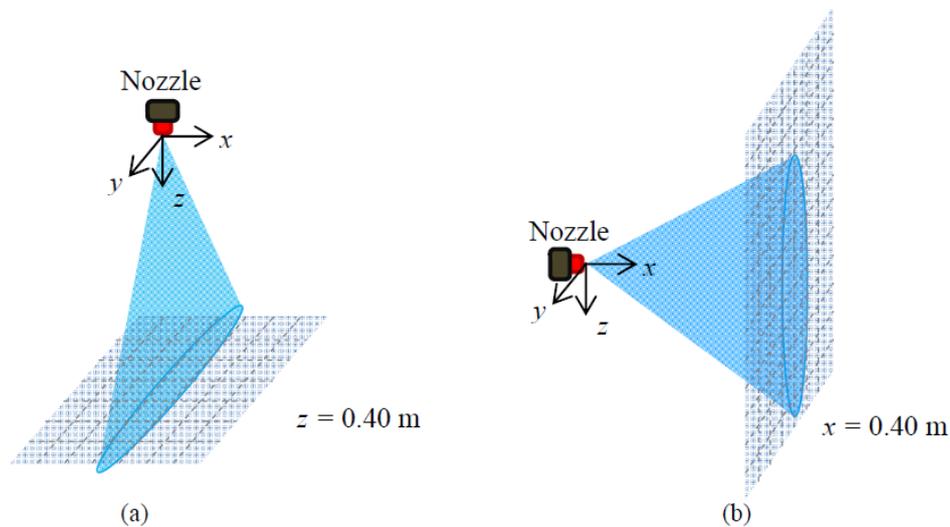


Fig. 82 Setting utilizzati durante i test sulla spruzzatura. [42]

Dai dati raccolti, riassunti nei grafici Fig.83, dalle due prove è emerso che la distribuzione delle particelle raccolte a 40 cm dall'uscita dell'ugello non è significativamente influenzata dall'orientazione dello stesso. Infatti, se si analizzano i dati, si nota come le distribuzioni volumiche nei due casi siano confrontabili. In particolare, il droplet è stato diviso in tre classi dimensionali: *nero* per  $d > 500 \mu\text{m}$ , *puntinatura fitta*  $100 \mu\text{m} \leq d \leq 500 \mu\text{m}$ , *puntinatura rada*  $d < 100 \mu\text{m}$ .

L'unica differenza è data dal fatto che nell'orientazione orizzontale alcune delle particelle più piccole abbiano la tendenza a cadere sul terreno e quindi non raggiungano l'obiettivo, infatti analizzando i grafici a torta si nota come la frazione delle goccioline più leggere si riduca in tutti e tre i casi.

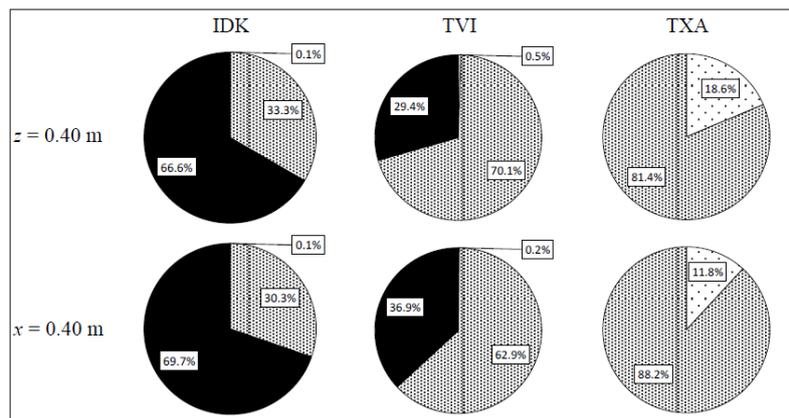


Fig. 83 Distribuzione volumica delle dimensioni delle goccioline nelle varie prove. [42]

L'orientazione dell'ugello ha invece un'influenza maggiore per quanto riguarda la velocità assiale con cui il liquido raggiunge l'ipotetico bersaglio posto a 40 cm di distanza. Infatti, è facile intuire che se la spruzzatura è fatta in orizzontale, le particelle che uscite dall'orifizio non possiedono una velocità sufficiente, cadono sul terreno invece di raggiungere la pianta.

Proprio per questa ragione infatti, gli atomizzatori destinati ai vigneti e frutteti che vengono trainati da trattore, sono dotati di ventilatore che genera un flusso di aria diretto verso il filare, che aiuta le particelle a raggiungere il bersaglio.

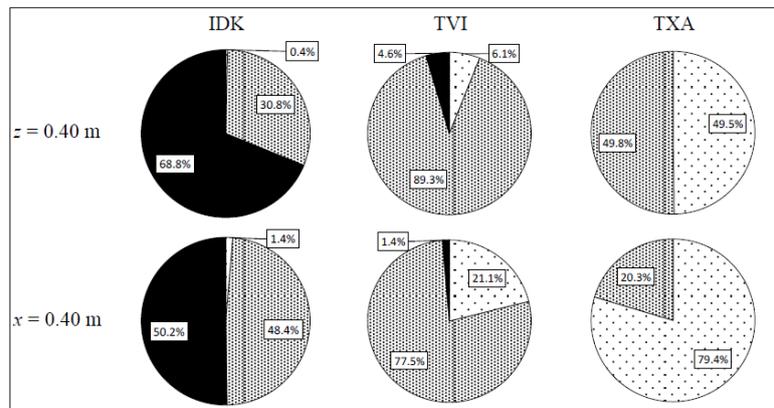


Fig. 84 Distribuzione volumica delle velocità delle goccioline nelle varie prove. [42]

Analizzando in questo caso il grafico Fig.84 dove vengono riassunti i risultati, considerando che anche in questo caso esistono tre classi di velocità: *nero* per  $v > 5$  m/s, *puntinatura fitta*  $1$  m/s  $\leq v \leq 5$  m/s, *puntinatura rada*  $v < 1$  m/s. Si nota come nel caso verticale si ottenga una frazione più grande di particelle che hanno una maggior velocità, infatti in una disposizione di questo tipo, viene accentuato l'effetto benevolo della gravità che tende ad agire sulla velocità assiale. Spostandosi nel caso orizzontale e confrontandolo con il precedente, si nota un aumento della frazione di particelle con velocità inferiori. Questo effetto è tanto più marcato, quanto più le particelle tendono ad essere piccole. Infatti, l'aumento più grande lo si ha nel TXA, dove la frazione di particelle con una velocità inferiore ad 1 m/s incrementa da un valore del 50% ad un 80 % nel caso orizzontale.

Supponendo poi, che per essere efficaci, le particelle debbano possedere un sufficiente diametro e velocità, è possibile analizzare la percentuale sul volume di droplet che effettivamente svolgerà la sua funzione. Come spartiacque si è scelto un diametro di 100  $\mu$ m ed una velocità di 1 m/s Fig.85.

Per gli ugelli IDK e TVI, che producono particelle più grandi, si nota come una grande percentuale raggiunga il bersaglio. Infatti, nel caso peggiore che è quello con orientazione orizzontale, si arriva al 78,8 %. La situazione invece cambia per l'ugello TXA, infatti quest'ultimo genera intrinsecamente una nube di goccioline con diametri inferiori ai primi due e si nota come già nel caso verticale la frazione di particelle che possiedono proprietà sufficienti sia piccola, infatti raggiunge il 36,2%. Spostandosi poi nel caso orizzontale, addirittura la percentuale di particelle si riduce fino al 16 %. Si capisce quindi come anche in questo caso, le *dimensioni del droplet* generato dal processo di atomizzazione, rivesta un ruolo primario nell'ottimizzazione del processo e che siano da preferire gocce di dimensioni superiori.

Quindi anche l'inclinazione degli ugelli rispetto alla verticale potrebbe portare dei miglioramenti nella deposizione. Infatti, spruzzando con l'ugello totalmente in verticale, considerando sia l'azione della gravità che quella del *downwash*, si rischierebbe che parte della nube venga sospinta verso il basso finendo per cadere sul terreno. Tuttavia, questa è solo un'ipotesi la cui validità dovrà poi essere verificata in campo.

Nozzle brand	Orientation	Volume rate of droplet with $d < 100 \mu\text{m}$ or $u < 1 \text{ m/s}$	Volume rate of droplet with $d \geq 100 \mu\text{m}$ and $u \geq 1 \text{ m/s}$
Lechler IDK 90-01 C	Vertical ( $z = 0.4 \text{ m}$ )	0.4%	99.6%
	Horizontal ( $x = 0.4 \text{ m}$ )	1.4%	98.6%
CoorsTek TVI 80-0050	Vertical ( $z = 0.4 \text{ m}$ )	6.3%	93.7%
	Horizontal ( $x = 0.4 \text{ m}$ )	21.2%	78.8%
Teejet TXA 80-0067	Vertical ( $z = 0.4 \text{ m}$ )	63.8%	36.2%
	Horizontal ( $x = 0.4 \text{ m}$ )	84.0%	16.0%

Fig. 85 Distribuzione volumica dello spray divisa nelle due classi dimensionali. [42]

In agricoltura tradizionale quindi, dove sia la pressione di alimentazione che il *tempo di svuotamento* del serbatoio non sono un problema, sarebbero da preferire i primi due ugelli analizzati. Proprio questo è uno dei principali problemi su cui ci si scontra volendo applicare un drone nei trattamenti in vigneto. Infatti, a causa delle ridotte dimensioni dei velivoli attualmente in commercio, la quantità di liquido trasportabile è di circa 10-15 L e le pompe di cui sono dotati, a causa dei consumi e dei pesi ridotti che devono avere, riescono a raggiungere pressioni di poco superiori ai 5 bar.

Considerando quindi il Lechler IDK 90-01 C, seguendo il consiglio di Salvarani che ha sconsigliato di alimentare questo tipo di ugelli con pressioni inferiori a 3 bar, consultando il catalogo si nota che la portata smaltita da questo ugello a 3,5 bar, che rappresenta il valore minimo per evitare di avere spruzzi anomali, si attesti sui 0,42 l/min. Questo valore permette ad un drone dotato di 4 ugelli di svuotare un serbatoio da 10l in circa 6 minuti. Tempo che risulta essere troppo breve per un'ottimizzazione del trattamento. Va inoltre considerato che per l'applicazione il dott. Minuto, Salvarani e Abbà [12] avevano consigliato ugelli a cono perché più adatti all'impiego su vigneto, mentre questo tipo di ugello è a fessura.

Per quanto riguarda il CoorsTek TVI 80-0050, che è un ugello a cono vuoto, non è applicabile in quanto le pressioni di funzionamento sono troppo elevate, infatti a catalogo viene indicata come pressione ottima di funzionamento 10 bar.

Rimane quindi il Teejet TXA 80-0067, le cui caratteristiche sono riportate nel capitolo 3.2.

Considerato comunque che gli ugelli a cono e cono vuoto senza induzione di aria producono una nube piuttosto fine, se paragonati con quelli a ventaglio, potrebbe essere valutata anche l'applicazione di questi ultimi facendo delle prove in campo e verificandone i risultati.

# CAPITOLO 5: Circuito idraulico

## 5.1 Introduzione

Per la realizzazione del circuito idraulico è stata svolta una ricerca in letteratura riguardante i droni commerciali ed il loro funzionamento, per capire la logica sulla quale si basano e così cercare di progettare al meglio il circuito ed il sistema che lo regola.

Nella Fig.86 sottostante, è possibile analizzare uno schema a blocchi rappresentativo dei vari componenti da cui è costituito un drone, dal quale è possibile analizzare la logica seguita nel suo funzionamento.

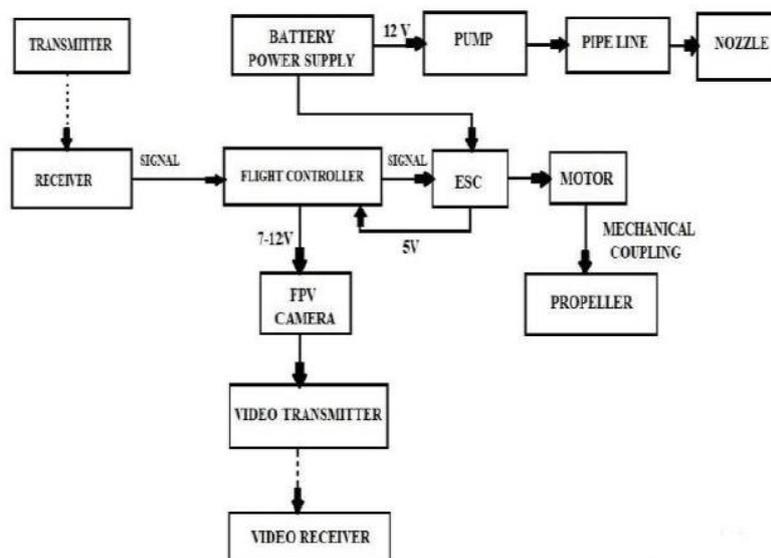


Fig. 86 Diagramma a blocchi riguardante la logica di funzionamento di un drone agricolo. [24]

Il velivolo viene comandato da terra per mezzo di un radiocomando, definito come *transmitter*. Il segnale generato dal radiocomando, che in spazi liberi può raggiungere distanze considerevoli nell'ordine del chilometro, viene captato dal ricevitore che genera un segnale, il quale viene inviato al *flight controller*.

Nel *flight controller*, il segnale ricevuto viene processato tenendo conto di sensori quali accelerometri e giroscopi, che forniscono informazioni sulla posizione del drone in un preciso istante. Il segnale elaborato arriva quindi all'unità *ESC* (*Electronic Speed Controller*) la quale rappresenta un componente fondamentale per riuscire a controllare un velivolo multirottore. La sua funzione è quella di collegare i motori al controllore di volo fornendogli la giusta alimentazione e regolandone la velocità. In particolare, per garantire la stabilità in volo ogni motore deve essere dotato di un suo *ESC* in quanto nel medesimo istante possono avere regimi di rotazione differenti. Collegata al controllore di volo si trova poi la *FPV camera* dove *FPV* sta per *First Person View*. Il segnale video generato viene processato dal *video transmitter* che lo invia poi al *video receiver*, in

modo che l'operatore possa ricevere in tempo reale immagini dal drone come se si trovasse a bordo dello stesso.

Collegata con la batteria, si trova poi la pompa, che pesca il liquido dalla tanica posta sotto al drone e lo manda agli ugelli in pressione. La portata smaltita dalla pompa può essere controllata da terra tramite il radiocomando che interviene cambiando il regime di funzionamento.

A bordo del drone sono montati poi vari sensori che servono: sia ad evidenziare eventuali ostacoli garantendo così la sicurezza in volo, sia a misurare le grandezze fisiche riguardanti il circuito idraulico in modo da poter identificare eventuali avarie ed ostruzioni degli ugelli.

I circuiti impiegati per l'equipaggiamento di un drone da com'è possibile vedere dalla Fig.87, sono costituiti da una tanica di capacità variabile, la cui forma è studiata in modo da non generare risacche ed essere svuotata fino in fondo ottimizzando la quantità di liquido. Sono commercializzate in formati standard, i più diffusi sono il formato da 10l e 16 l.

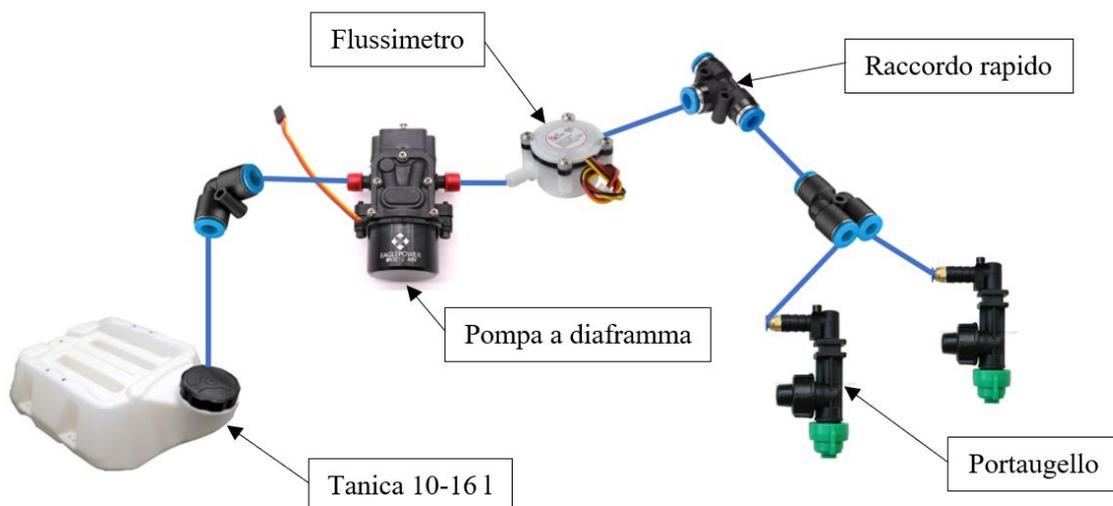


Fig. 87 Possibile componentistica impiegata per la realizzazione di un circuito idraulico.

Il tubo di aspirazione della pompa che pesca nella tanica deve essere dotato di un filtro, in modo da evitare che eventuali impurità entrino nel circuito e possano creare malfunzionamenti.

Le pompe che vengono utilizzate sono essenzialmente quelle a diaframma, alimentate a diversi voltaggi, infatti si trovano sul mercato modelli che operano a 12, 24 e 48 V.

I vari componenti della parte idraulica sono collegati da tubi in materiale polimerico raccordati con raccordi di diverso tipo: sia con attacchi rapidi che con fascette stringitubo.

Gli ugelli vengono montati su speciali supporti portaugello, che vengono utilizzati anche in agricoltura tradizionale e sono forniti dalla ditta costruttrice.

Per quanto riguarda il controllo, il circuito può essere dotato di una scheda elettronica programmabile in grado di raccogliere i dati derivanti dalla parte sensoristica ed intervenire sul circuito idraulico regolando la spruzzatura.

## 5.2 Componentistica

Per quanto riguarda la parte idraulica, si è scelto di adottare della componentistica utilizzata anche in campo pneumatico. In particolare, la scelta è ricaduta sulla componentistica *Festo*, poiché la casa produttrice garantisce i componenti scelti anche per l'utilizzo con liquidi.

Il diametro esterno preso in considerazione per tubi e raccordi è 8 mm, in quanto permette di adattarsi alle bocche di aspirazione/mandata delle varie pompe commerciali ed è in grado di fornire una sezione sufficiente, in base alle portate che devono essere smaltite.

Il modello di tubo scelto è un tubo in TPE, il serie *PUN-H-8* neutro: è dotato di un'elevata flessibilità che lo rende adatto all'utilizzo in catene portacavi con elevate frequenze di funzionamento, è adatto ai raccordi di tipo QS, ha una pressione di esercizio compresa fra 0,95-10 bar, resiste all'idrolisi, può operare a temperature comprese fra -35-60 °C.

### 5.2.1 Serbatoio

La scelta del serbatoio è ricaduta su uno commerciale adatto ad essere impiegato su diverse tipologie di droni agricoli. In particolare, la forma è studiata per adattarsi alla fusoliera del drone e contenere le varie componenti del circuito idraulico.



Fig. 88 Tanica di dimensioni standard. [25]

Caratteristiche:

- Design che previene la formazione di moti ondosi durante il volo.
- Slot superiore rientrante, per contenere la batteria ed evitare schizzi indesiderati su di essa.
- Apertura superiore grande dotata di filtro. L'inclinazione è stata studiata per facilitare le operazioni di riempimento.



Fig. 89 Tappo per il riempimento con filtro a maglia. [25]

- Apertura inferiore dotata di tappo a vite, fornito con raccordo rapido e filtro a maglie in acciaio per la cattura delle impurità.
- Dotata di scala graduata che indica il livello di riempimento.
- Forma inferiore affusolata, per evitare il ristagno del liquido.
- Dotata di dadi filettati per l'applicazione di accessori.
- Capacità totale: 11,4 l.
- Peso: 1 kg.

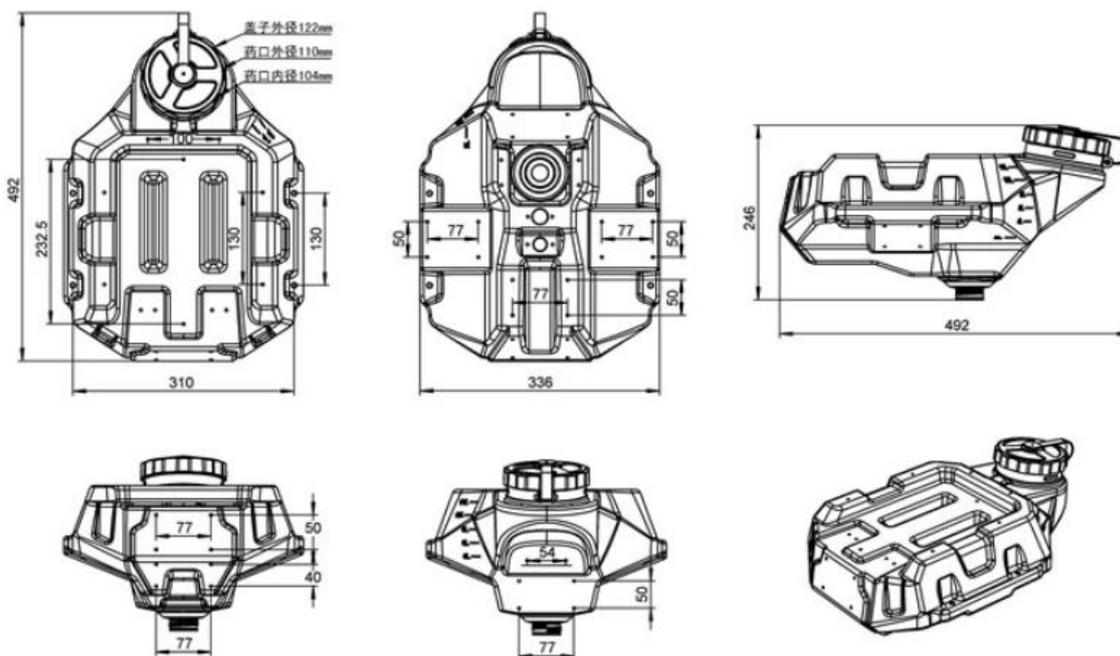


Fig. 90 Ingombri di massima della tanica. [25]

## 5.2.2 Raccordi utilizzati

I raccordi sono stati scelti dal catalogo Festo [26] selezionandoli in base alla praticità, in quanto l'*attacco rapido QS* consente un rapido montaggio e smontaggio delle varie parti di circuito rendendolo modulabile, considerando però anche il peso dei componenti, puntando prevalentemente su componenti in *PBT* in quanto permettono una riduzione del peso rispetto a quelli in acciaio.

L'azienda fornisce a catalogo i dati tecnici del componente e i modelli CAD 3D di cui ci si è serviti per effettuare un'analisi tramite *Solidworks* della struttura interna del componente, in modo da riuscire a ricavare i dati geometrici utilizzati per le successive simulazione tramite il software *Amesim*.

### 5.2.2.1 Raccordo a gomito QLS-3/8-8

Raccordo con innesto rapido e filetto, l'innesto QS è adatto a tubi di diametro 8 mm mentre il filetto è 3/8". Una volta avvitato può essere orientato a 360°. Viene utilizzato nel tappo inferiore della tanica, per collegare la stessa al tratto di aspirazione della pompa.



Fig. 91 Raccordo QLS-3/8-8. [26]

Caratteristiche:

- E' in grado di alloggiare tubi da 8 mm.
- Filetto maschio R 3/8".
- Ha un range di pressioni da -0.95 a 14 bar.
- Temperatura di funzionamento: -10 a 80 °C.
- Peso: 31 g.

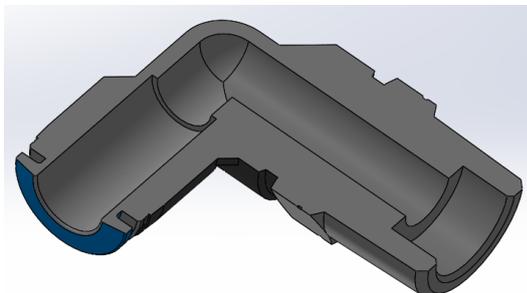


Fig. 92 Sezione del raccordo QLS-3/8-8. [26]

Analizzando il componente tramite il modello 3D, è possibile ricavare i dati geometrici interni che sono utilizzati per definire i componenti su Amesim, in modo da tenere conto delle perdite concentrate nelle singole parti di circuito.

Sono stati ricavati:

- Diametro nominale: 6,7 mm.
- Raggio di raccordo: 6,6 mm.



Fig. 93 Particolare del tappo inferiore della tanica. [25]

La figura a lato rappresenta il componente montato sul tappo inferiore della tanica, il quale dovrà essere forato. Per garantire una maggior stabilità è stato previsto un dado piatto posto internamente, nella parte che comunica con il liquido, in modo che nei ripetuti smontaggi il componente sia più saldo e non si creino giochi che potrebbero poi portare a perdite, visto che viene avvitato nella plastica.

Per evitare gocciolamenti indesiderati, durante il montaggio dovrà essere prevista l'applicazione di una guarnizione e eventualmente del teflon sulla filettatura.

### 5.2.2.2 Raccordo a L QSL-8

È un raccordo ad innesto rapido in cui entrambe le bocche alloggiano un tubo da 8mm. È molto versatile in quanto può essere montato in qualsiasi posizione. È dotato di una molla di ritegno in acciaio inox, che non corrode o danneggia il tubo. È utilizzato per i collegamenti con la pompa.



Fig. 94 Raccordo QLS-8. [26]

Caratteristiche:

- E' in grado di alloggiare tubi da 8 mm.
- Ha un range di pressioni da -0.95 a 14 bar.
- Temperatura di funzionamento: -10 a 80 °C.
- Peso: 11 g.

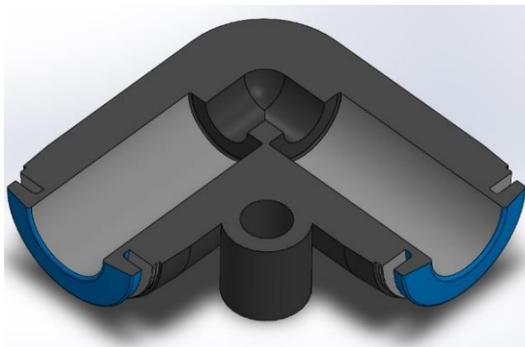


Fig. 95 Sezione raccordo QLS-8. [26]

Dalla vista in sezione ricavata tramite Solidworks è possibile notare una riduzione interna del diametro, rispetto ai canonici 5,7 mm interni previsti da un tubo da 8 mm.

Valutando il disegno sono stati ricavati i seguenti dati per la geometria ristretta:

- Diametro nominale: 4,6 mm.
- Raggio di raccordo interno: 4,7 mm.

### 5.2.2.3 Raccordo a T QST-8

È un raccordo a T in cui tutte le porte alloggiavano tubi da 8 mm, che offre una grande flessibilità e rapidità di installazione grazie all'attacco ad innesto. Viene utilizzato per la diramazione principale del tubo che arriva dalla mandata della pompa.



Fig. 96 Raccordo QST-8. [26]

Caratteristiche:

- E' in grado di alloggiare tubi da 8 mm.
- Ha un range di pressioni da -0.95 a 14 bar.
- Temperatura di funzionamento: -10 a 80 °C.
- Peso: 16 g.

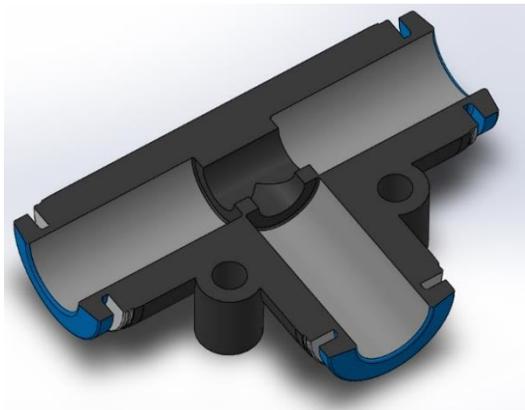


Fig. 97 Sezione raccordo QST-8. [26]

Anche in questo caso, sezionando il componente è possibile notare come il diametro interno si riduca a 5 mm, al posto dei 5,7 mm interni del tubo da 8mm.

### 5.2.2.4 Raccordo a Y QSY-8

È un raccordo ad Y con innesti rapidi che alloggiavano tubi da 8 mm, è stata scelta questa forma perché permette di adattarsi meglio rispetto al raccordo a T alla forma dei bracci del drone. Viene utilizzato per la diramazione finale del tubo che poi arriva agli ugelli.



Fig. 98 Raccordo QSY-8. [26]

Caratteristiche:

- E' in grado di alloggiare tubi da 8 mm.
- Ha un range di pressioni da -0.95 a 14 bar.
- Temperatura di funzionamento: -10 a 80 °C.
- Peso: 16 g.

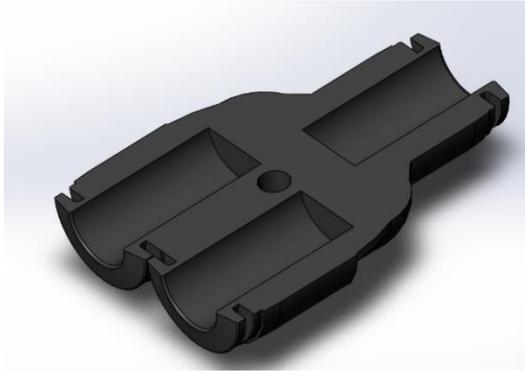


Fig. 99 Sezione raccordo QSY-8. [26]

Purtroppo, in questo caso, il componente 3D fornito da Festo presenta una geometria interna semplificata. Quindi consultando il catalogo, che fornisce un diametro nominale pari a 4,6 mm, è stato ipotizzato che i raggi di raccordo interni fossero uguali a quelli del componente QSL-8 e quindi pari a 4,7 mm.

## 5.2.3 Portaugelli

### 5.2.3.1 Portaugelli serie QJ300

	CODICE SINGOLO	PER IL DIAMETRO INTERNO DEL PORTAGOMMA
	19349-211-406-NYB	3/8 pollice
	19349-211-540-NYB	1/2 pollice
	19349-211-785-NYB	3/4 pollice
	CODICE DOPPIO	PER IL DIAMETRO INTERNO DEL PORTAGOMMA
	19350-212-406-NYB	3/8 pollice
	19350-212-540-NYB	1/2 pollice
	19350-212-785-NYB	3/4 pollice
	CODICE TRIPLO	PER IL DIAMETRO INTERNO DEL PORTAGOMMA
	19351-213-406-NYB	3/8 pollice
	19351-213-540-NYB	1/2 pollice
	19351-213-785-NYB	3/4 pollice

Fig. 100 Varie tipologie di portaugelli. [14]

Portaugello dotato del sistema Teejet, per l'attacco rapido dell'ugello tramite l'apposita ghiera con corpo resistente alla corrosione. Presenta la valvola *antigoccia* con *TeeJet ChemSaver* che si apre ad una pressione di 0,7 bar. La membrana interna può essere in *EPDM* o in *Viton* a seconda delle esigenze del cliente.

Sono disponibili con il portagomma singolo, doppio e triplo per tubi con un diametro interno di 3/8", 1/2", 3/4".

Possono operare ad una pressione massima di 9 bar.

Vengono ancorati alla barra portaugelli, tramite appositi supporti fornite da Teejet in vari modelli per adattarsi alle varie forme delle barre portaugelli adattandosi alle esigenze dell'utilizzatore.

Il peso della singola unità è pari a 40g (0,07 LBS), a cui si devono poi aggiungere il peso delle fascette in acciaio per fermare il tubo, quello del supporto e della ghiera portaugello.

Essendo componenti utilizzati in ambito agricolo tradizionale, in cui le portate smaltite possono essere molto elevate, sono dimensionati di conseguenza, quindi le perdite di carico con le portate che si devono garantire nell'impiego con un drone sono molto piccole.



Fig. 101 Portaugello con i vari componenti da cui è costituito. [27]

PERDITA DI CARICO (bar) A DIVERSE PORTATE (l/min)										
2 l/min	3 l/min	4 l/min	5 l/min	7,5 l/min	10 l/min	15 l/min	20 l/min	25 l/min	30 l/min	40 l/min
-	0,02	0,03	0,05	0,11	0,20	0,44	0,78	1,22	1,76	3,12

Fig.102 Tabella delle perdite introdotte dal portaugello in funzione della portata. [14]

### 5.2.3.2 Portaugelli e ghiera ad innesto rapido



Fig. 103 Varie tipologie di portaugelli ad innesto rapido. [14]

Grazie ad una serie di accessori, al posto della ghiera portaugello è possibile montare altri raccordi sia rettilinei che a 90° come quelli della Fig.103. Questo sistema unisce alla praticità dell'innesto rapido, un peso leggermente ridotto rispetto al precedente, in quanto il modello *QJ114401* compreso di ghiera portaugello pesa 23g (0,05 LBS). Poiché a catalogo non vengono indicate le perdite di carico, si è ipotizzato che fossero uguali a quelle del portaugello serie QJ 300.

I portaugelli Teejet sono inoltre dotati di un sistema a ghiera che consente una rapida sostituzione.



Fig. 104 Ghiera Quick TeeJet unificata. [14]

Gli attacchi che collegano la ghiera al portaugello e conseguentemente le scanalature sono unificati, tuttavia a seconda dell'ugello, poiché la forma varia da modello a modello, sono previste diverse ghiera standardizzate di vari colori per aiutare il riconoscimento. Per evitare perdite, fra portaugello ed ugello stesso è interposta una guarnizione che può essere in *EPDM* oppure in *Viton*. La pressione massima di utilizzo consentita da questo sistema è di 20 bar.

Come detto prima esiste poi un set di ghiera che consentono, al posto dell'ugello di montare vari raccordi a seconda delle necessità dell'utilizzatore.



Fig. 105 Ghiera unificata Teejet adatta ad ugello di tipo TXA e AITX. [14]

## 5.2.4 Flussimetro Sea YF-S401

Il flussimetro è costituito da un corpo in PVC, un rotore palettato ed un sensore ad effetto Hall. Il flusso di acqua fa muovere il rotore, la cui velocità di rotazione è proporzionale al valore della portata. Il sensore effetto Hall quindi emette un segnale ad impulsi corrispondente al regime di rotazione.

Caratteristiche tecniche:

- Tensione di alimentazione max: 5-12V DC.
- Resistenza all'acqua: 3,5 bar.
- Gamma della portata: 0,3-6 l/min.
- Pressione max:  $\leq 8$  bar.
- Diametro di ingresso: 4 mm.
- Diametro di uscita: 7 mm.
- Corrente di esercizio: 15 mA (DC 5V).
- Impulso di uscita ad alto livello:  $>4.5$  VDC (DC tensione di ingresso 5 V).
- Impulso di uscita a basso livello:  $<0.5$  VDC (DC tensione di ingresso 5 V).
- Peso: 30 g.
- Precisione:  $\pm 5\%$ .
- Portata/impulsi: 1 l = 5880 onde quadre.



Fig. 106 Flussimetro Sea YF-401. [28]

È opportuno installarlo in verticale, non eccedendo i  $5^\circ$  di inclinazione in quanto potrebbe portare ad una lettura sbagliata.

La frequenza delle pulsazioni prodotte dal sensore è legata alla portata dalla relazione:

$$F = 98 \cdot Q(\text{l/min})$$

È adatto ad essere utilizzato con microcontrollori come *Arduino*, in particolare il cavo rosso va collegato con l'alimentazione 5V, quello nero con il GND e quello giallo ad un ingresso digitale.

## 5.2.5 Pompe

Per quanto riguarda l'alimentazione del circuito, sono state prese in considerazione le pompe a diaframma alimentate in corrente continua 12-24 V, in quanto sono pompe di dimensioni e peso contenuti, che permettono però buone prestazioni in termini di portata e pressione. Si è fatta attenzione a scegliere pompe che potessero essere regolate variando la tensione oppure con il *PWM*, in quanto alcune sono dotate di filtri per evitare disturbi elettromagnetici e non possono essere regolate se non per laminazione.

Il focus è stato rivolto principalmente alla pressione che la pompa scelta riesce a garantire, in quanto tutte quelle analizzate generalmente soddisfano il requisito della portata.

Durante l'analisi dei vari modelli in commercio, tuttavia è sorta una problematica, in quanto con la maggior parte delle pompe che si trovano sul mercato sui siti di hobbistica e modellistica non viene fornita la caratteristica della pompa, ma solo i dati tecnici riferiti alla massima pressione e portata raggiungibili.

Analizzando i datasheet che riportano le prestazioni delle varie pompe adatte all'impiego su drone e confrontandoli con pompe di taglia superiore che equipaggiano piccoli trattori e quad, sono sorti dei dubbi sulle reali prestazioni delle prime rispetto a quelle dichiarate dal costruttore. Infatti, soprattutto per quanto riguarda la pressione, sono dichiarati valori che difficilmente si possono realmente raggiungere con una pompa di quel tipo.

Indagando quindi in letteratura, fortunatamente questo problema si è presentato precedentemente ad un gruppo di ricercatori, i quali volendo effettuare uno studio riguardante la spruzzatura effettuata tramite droni ed avendo avuto le stesse perplessità riguardo alle reali prestazioni fornite dalle pompe, hanno ricavato sperimentalmente le varie caratteristiche [29].

In particolare, per valutare i parametri di spruzzatura di alcuni ugelli, è stato costruito un apparato di misurazione dove le caratteristiche P-Q delle pompe sono state ottenute tramite un flussimetro (Model IOG ¼", flow range: 0.44–8.3 LPM, Badgermeter, Neuffen, Germany) ed un sensore di pressione (ETM-375-500A, Kulite with 1% accuracy, Kulite Co. Ltd., Leonia, New Jersey, USA). I segnali elettrici generati dai sensori, opportunamente convertiti, sono stati raccolti da un computer presente nel laboratorio.

Ci si è quindi serviti dei dati forniti da questo studio per ricostruire le varie curve dei vari modelli di pompa, in quanto digitalizzandoli sono stati poi utilizzati con il software Amesim per capire se la pompa scelta fosse in grado di soddisfare i requisiti di pressione e portata richiesti dal circuito per funzionare in maniera corretta.

### 5.2.5.1 Singflo Flo-2203a 12V



Caratteristiche dichiarate:

- Portata max: 2,6 l/min.
- Pressione max: 70 psi (4,83 bar).
- Alimentazione: DC 12 V.
- Controllo: voltage control.
- Corrente max: 2,1 A.
- Peso: 0,67 kg.
- Bocca aspirazione: 3/8".
- Bocca mandata: 3/8".

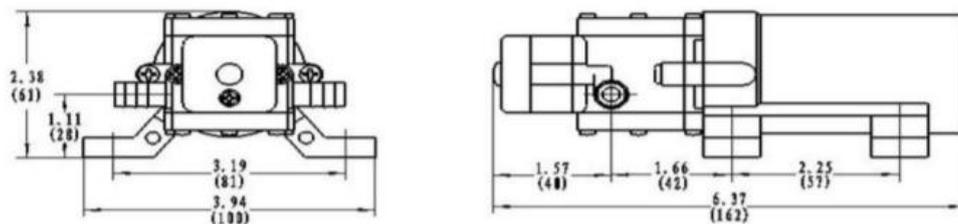


Fig. 107 Pompa Singflo Flo-2203a 12V e dimensioni di massima in cm. [30]

Da come è possibile notare dal grafico Fig.108 che rappresenta la caratteristica della pompa ricavata sperimentalmente, si può notare come la portata massima che la pompa è in grado di garantire è del 9% inferiore a quella dichiarata dal costruttore, mentre per quanto riguarda il valore massimo di pressione è molto simile a quello fornito nel datesheet.

Esaminando la caratteristica, considerando che gli ugelli adatti a vigneto e frutteto presi in considerazione, per funzionare correttamente devono essere alimentati ad una pressione di almeno 3-3,5 bar, si nota come questa pompa sia in grado di fornire portate molto piccole per valori di pressione superiori a quelli minimi richiesti.

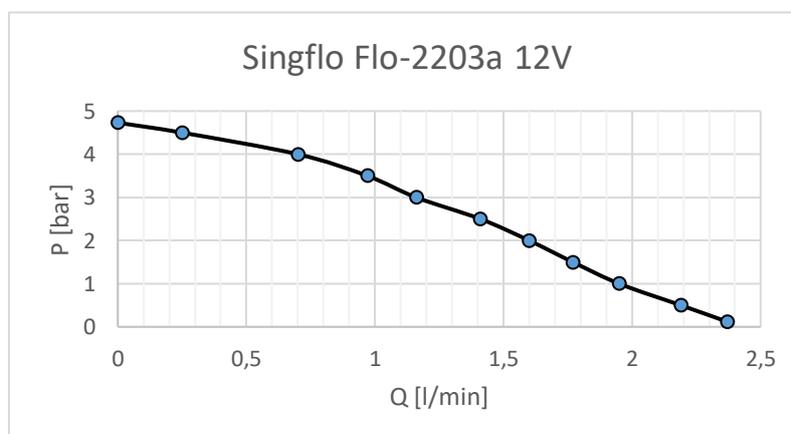


Fig. 108 Caratteristica della pompa Singflo Flo-2203. [29]

### 5.2.5.2 BPP-25 JMRR Co. LTD. 22-25V



Fig. 109 Pompa BPP-25 JMRR Co. LTD. [31]

Caratteristiche dichiarate:

- Portata max: 3,5 l/min.
- Pressione max: 10 bar.
- Alimentazione: DC 22-25 V.
- Controllo: PWM control.
- Potenza max: 25 W.
- Peso: 0,298 kg.
- Bocca aspirazione: 3/8".
- Bocca mandata: 3/8".
- Dimensioni: 91 x 70 x 46 mm.

Analizzando il grafico che rappresenta la caratteristica sperimentale della pompa, si può notare come la pressione massima raggiunta nelle prove sia di molto inferiore rispetto ai 10 bar dichiarati, così come anche la portata si ferma a 2,2 l/min invece dei 3,5 l/min forniti dal catalogo.

Anche se le caratteristiche fornite dal costruttore non rappresentano appieno la realtà, tuttavia questa pompa non è da scartare a prescindere, infatti la sua caratteristica è ben distribuita e viste le dimensioni e il peso ridotti, si può valutare l'applicazione in configurazione multipla.

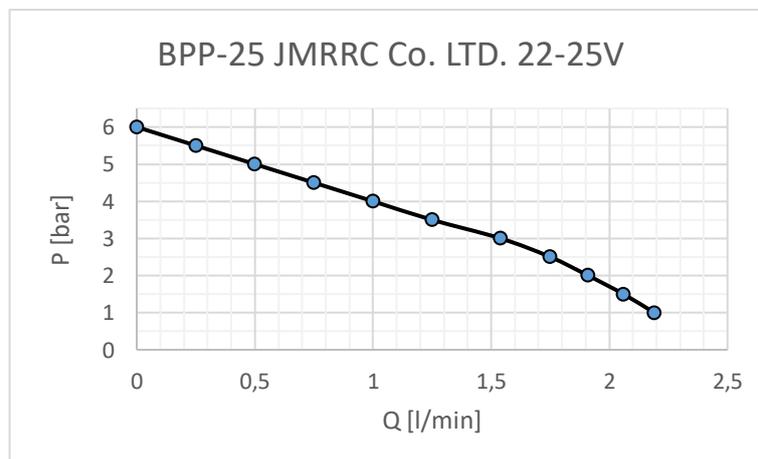


Fig. 110 Caratteristica della pompa BPP-25 JMRR Co. LTD. [29]

### 5.2.5.3 ProPumps Co. 12V



Fig. 111 Pompa ProPumps Co. [32]

Caratteristiche dichiarate:

- Portata max: 5,5 l/min.
- Pressione max: 9 bar.
- Alimentazione: DC 12 V.
- Controllo: voltage control.
- Potenza max: 80 W.
- Peso: 1 kg.
- Bocca aspirazione: 3/8".
- Bocca mandata: 3/8".
- Dimensioni: 165 x 95 x 60mm.

Valutando la caratteristica sperimentale della pompa Fig.112, si nota come questa sia molto ripida ed i dati indicati a catalogo siano molto distanti dalla realtà. Infatti, per garantire la pressione minima per il funzionamento corretto degli ugelli ci si deve spostare su portate piccolissime, molto lontane da quelle che devono essere garantite durante la spruzzatura.

Visto il peso di 1 kg, confrontando le prestazioni con quelle della BPP-25 JMRRC, si può concludere che si tratti di una pompa abbastanza scadente e per nulla adatta ad essere equipaggiata su un drone.

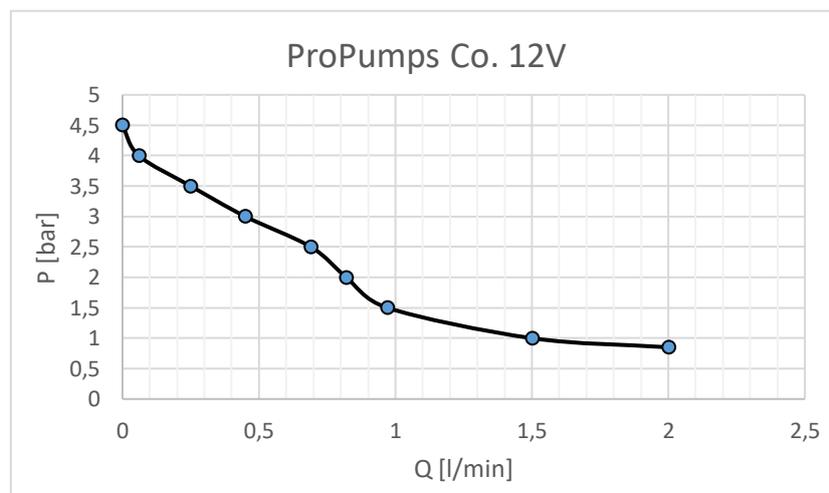


Fig. 112 Caratteristica della pompa ProPumps Co. [29]

### 5.2.5.4 22 series Seaflo 12/24V



Fig. 113 Pompa Seaflo serie 22. [33]

Caratteristiche dichiarate SFDP1-013-100-22:

- Portata max: 5 l/min.
- Pressione max: 100 psi (6,9 bar).
- Alimentazione: DC 12 V.
- Controllo: PWM control.
- Corrente max: 5 A.
- Peso: 1,1 kg.
- Bocca aspirazione: 3/8".
- Bocca mandata: 3/8".

Caratteristiche dichiarate SFDP2-013-100-22:

- Portata max: 5 l/min.
- Pressione max: 100 psi (6,9 bar).
- Alimentazione: DC 24 V.
- Controllo: PWM control.
- Corrente max: 2,6 A.
- Peso: 1,1 kg.
- Bocca aspirazione: 3/8".
- Bocca mandata: 3/8".

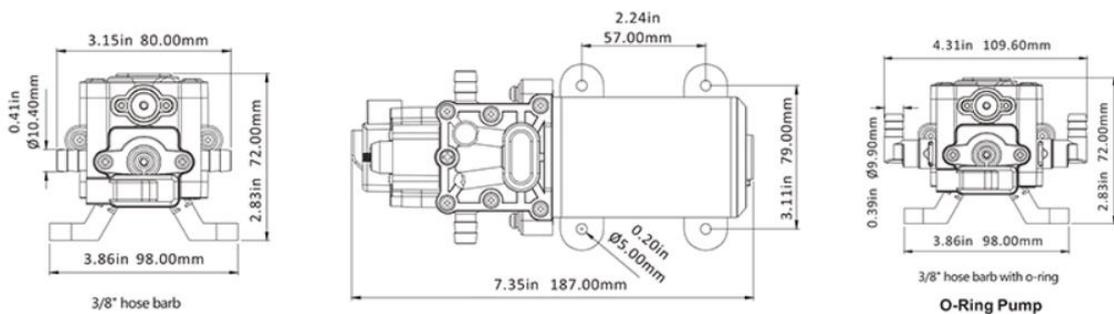


Fig. 114 Pompa Seaflo serie 22 misure di massima. [33]

La pompa 22 series è commercializzata da Seaflo, come dichiarato dal costruttore è adatta a vari utilizzi fra cui l'impiego nel circuito idraulico dei droni agricoli.

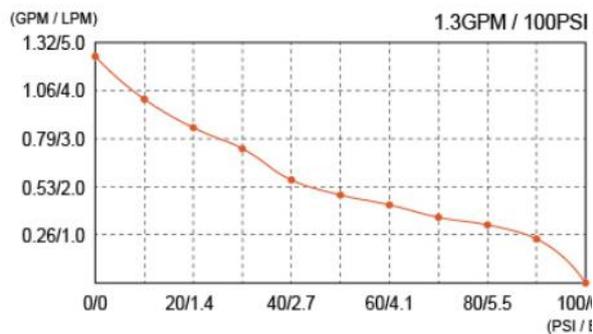


Fig. 115 Caratteristica del modello scelto a 12 V. [33]

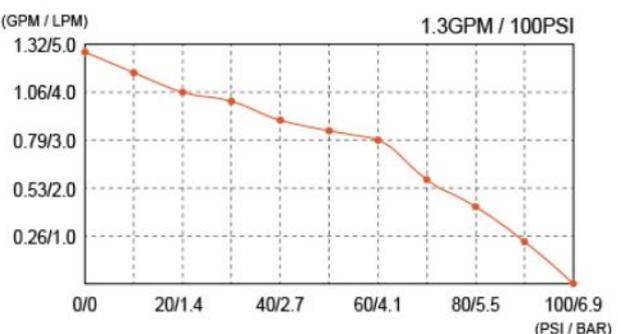


Fig. 116 Caratteristica del modello scelto a 24 V. [33]

A differenza degli altri produttori, oltre le specifiche tecniche, sul sito vengono fornite le caratteristiche sia in forma grafica che tabellata riguardanti i vari modelli. Infatti, per la 22 series oltre ai due modelli presi in considerazione ne esistono altri 3 che presentano prestazioni differenti in termini di pressione e portata massima.

È dotata di pressostato regolabile, che permette l'accensione e lo spegnimento automatici in corrispondenza dei valori impostati. Inoltre, non richiede accorgimenti specifici all'avvio, in quanto può lavorare a secco ed è autoadescante.

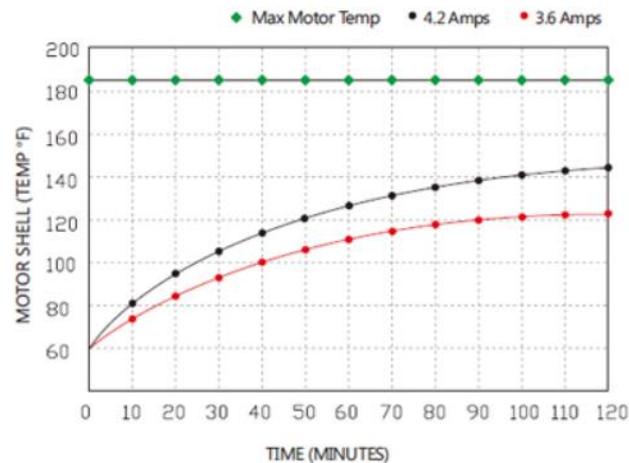


Fig. 117 Temperatura raggiunta in funzione dei minuti di funzionamento. [33]

È adatta per essere impiegata in cicli intermittenti e come si può osservare dal grafico Fig.117, considerando che sul drone si prevede un utilizzo continuativo inferiore ai 10 minuti, le temperature raggiunte sono di molto inferiori a quella massima di esercizio.

Sul sito, sono presenti come regolazioni possibili *Switch & By pass*, avendo contattato il produttore tramite mail ci è stato risposto che è possibile anche la regolazione tramite *PWM* stando comunque attenti a non far lavorare la pompa ad un numero di giri troppo basso in quanto ciò può portare il motore a surriscaldarsi.

Valutando le caratteristiche di entrambe le pompe, tutte e due potrebbero soddisfare il fabbisogno richiesto dal circuito, tuttavia è da preferire quella a 24 V poiché permette di avere una maggiore densità di energia.

## 5.2.6 Valvole

Per la regolazione della portata smaltita dal circuito, si è scelta una elettrovalvola a due vie la cui sezione può essere variata tramite PWM (pulse width modulation).

Mantenendo l'alimentazione della pompa invariata si agisce laminando alla mandata. In particolare, intervenendo sulla valvola, questa introduce perdite addizionali nel circuito, quindi la pendenza della caratteristica di quest'ultimo aumenta ed il punto di funzionamento della pompa si sposta verso portate inferiori.

La scelta della valvola deve essere accurata, in quanto avere un orifizio piccolo e perdite troppo elevate porterebbe ad avere malfunzionamenti nel circuito, al contrario scegliendo una valvola troppo grande non si potrebbe avere una regolazione efficace.

Sono state prese in considerazione vari tipi di elettrovalvola. Il problema principale è stato quello di trovare un modello che soddisfacesse i requisiti in termini di pressione e portata smaltita, infatti benchè in campo pneumatico il mercato proponga una vasta scelta di queste valvole, in quello idraulico trovarne una adatta allo scopo è più difficile.

Le valvole proporzionali in grado di gestire i liquidi spesso sono di dimensioni generose, in quanto devono sopportare elevatissime pressioni ed essere in grado di smaltire alte portate, il che le rende inadatte ad essere applicate alla regolazione del circuito.

Sono state analizzate quindi le valvole di vari produttori, fra i quali: SMC, Camozzi, Asco Numatic, Duplomatic, Slanzi e Burkert. La scelta è poi ricaduta su Burkert ed SMC, infatti sono gli unici produttori a commercializzare valvole di dimensioni non eccessive, che però riescano a contenere le perdite introdotte nel circuito e garantire una pressione agli ugelli adeguata.

### 5.2.6.1 Burkert 2873

È una valvola proporzionale che può essere controllata in *PWM* ed è particolarmente adatta ai sistemi di controllo in anello chiuso. Il corpo, a seconda dell'impiego, può essere in acciaio oppure ottone. Le tenute invece possono essere in FKM o EPDM. È fornita in varie gamme dimensionali, che possono sopportare come indicato dalla tabella diverse pressioni nominali e differenziali.



Caratteristiche tecniche:

- Tensione nominale cc: 24V.
- Potenza massima: 9 W.
- Corrente massima: 420 mA.
- Frequenza PWM: 1200 Hz.
- Tempo di attuazione: <20 ms.
- Viscosità massima: 21 cTs.
- Peso: 339 g.

Fig. 118 Valvola Burkert 2873. [34]

Rispetto alle altre valvole trovate sul mercato la Burkert 2873 permette un peso abbastanza contenuto. Tuttavia, la sua applicazione deve essere valutata tramite le simulazioni, in quanto il circuito durante il funzionamento si trova ad operare a pressioni, seppur di poco, superiori ai 5 bar che, consultando la tabella, non permettono di andare oltre la taglia in cui l'orifizio  $A_0 = 2 \text{ mm}$  a cui corrisponde un  $K_{vS} = 0,100$ .

Volendo spingere la valvola al limite si può valutare anche l'impiego di quella con  $A_0 = 2,5 \text{ mm}$  e  $K_{vS} = 0,150$ .

Circuit function	Orifice	Port connection	$K_{vs}$ value water <sup>1,2</sup>	Nominal pressure <sup>2)</sup>	Maximum differential pressure
	[mm]				
A, proportional control valve 2/2 way Direct-acting Normally closed	0.8	Sub-base FK01	0.018	16	8
		G 1/8	0.018	16	8
		NPT 1/8	0.018	16	8
	1.2	Sub-base FK01	0.040	12	6
		G 1/8	0.040	12	6
		NPT 1/8	0.040	12	6
	1.5	Sub-base FK01	0.060	10	5
		G 1/8	0.060	10	5
		NPT 1/8	0.060	10	5
	2.0	Sub-base FK01	0.100	8	4
		G 1/8	0.100	8	4
		NPT 1/8	0.100	8	4
		G 1/4	0.100	8	4
		NPT 1/4	0.100	8	4
	2.5	Sub-base FK01	0.150	5	2.5
		G 1/4	0.150	5	2.5
NPT 1/4		0.150	5	2.5	
NPT 1/4		0.150	5	2.5	
3.0	Sub-base FK01	0.220	3.5	1.75	
	G 1/4	0.220	3.5	1.75	
	NPT 1/4	0.220	3.5	1.75	
4.0	Sub-base FK01	0.320	2	1	
	G 1/4	0.320	2	1	
	NPT 1/4	0.320	2	1	

Fig. 119 Caratteristiche della valvola Burkert 2873. [34]

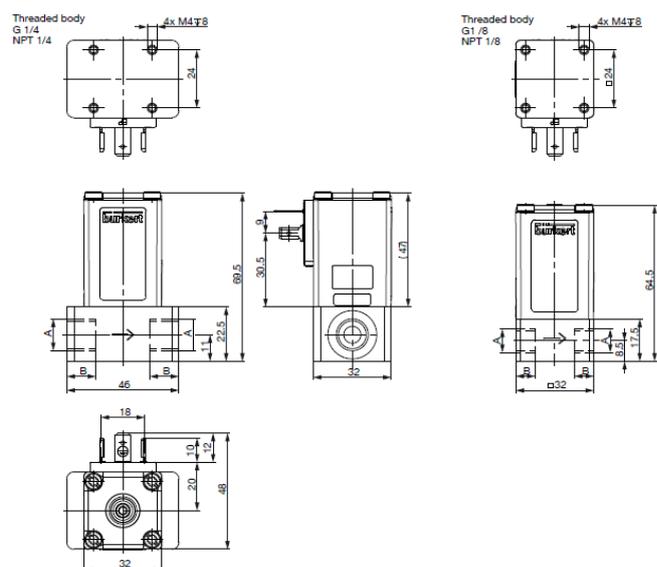


Fig. 120 Dimensioni della valvola Burkert 2873. [34]

### 5.2.6.2 Burkert 2875

Poiché con la precedente valvola scelta, a causa della pressione di funzionamento del circuito non si può andare oltre alla taglia con  $A_0 = 2 \text{ mm}$ , che presenta un coefficiente di scarico molto piccolo a causa della tortuosità del condotto interno, si deve valutare anche l'applicazione di una valvola di grandezza maggiore.

Valutando il catalogo quindi, è stata scelta la 2875, che è una valvola che presenta sezioni interne più grandi, dove si riscontrano tuttavia anche dimensioni maggiori rispetto alla precedente.



Caratteristiche tecniche:

- Tensione nominale cc: 24V.
- Potenza massima: 16 W.
- Corrente massima: 750 mA.
- Frequenza PWM: 900 Hz.
- Tempo di attuazione: <25 ms.
- Viscosità massima: 21 cTs.
- Peso: 889 g.

Fig. 121 Valvola Burkert 2875. [34]

Analizzando la tabella Fig. 123 che riporta le caratteristiche di funzionamento, si nota che questa valvola è dotata di un orifizio interno di dimensioni maggiori rispetto alla 2873 che permette quindi di ridurre le perdite, infatti da come si può notare anche i coefficienti di scarico si attestano su valori maggiori.

Il principale svantaggio sono le dimensioni, infatti nell'ottica di ottimizzare il peso, introdurre per la regolazione

una valvola di dimensioni così elevate riduce notevolmente la capacità di carico di liquido nella tanica.

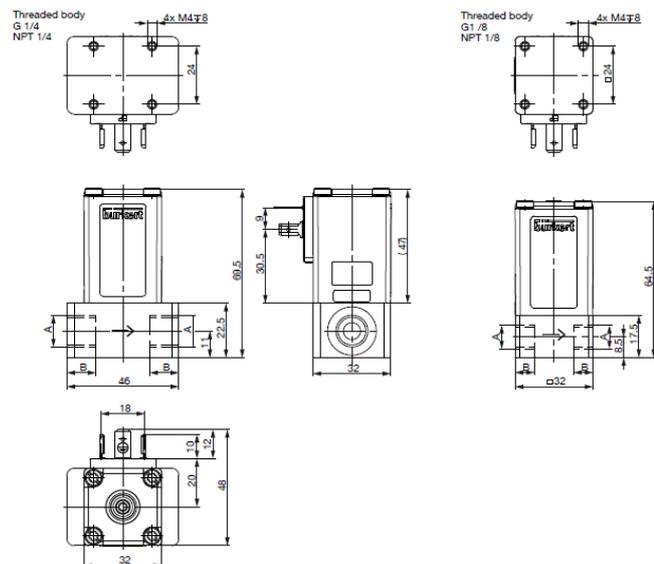


Fig. 122 Dimensioni della valvola Burkert 2875. [34]

Si sono prese in considerazione, per la valutazione della valvola che sia in grado di fornire la regolazione migliore, quelle con orifizio  $A_0 = 3 \text{ mm}$  e quella con  $A_0 = 4 \text{ mm}$ .

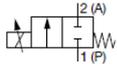
Circuit function	Orifice	Port con- nection	$K_{vs}$ value	Nominal	Maximum
	[mm]		water <sup>1)</sup>	pressure <sup>2)</sup>	differential
			[m <sup>3</sup> /h]	[bar]	pressure
					[bar]
<b>A, proportional control valve</b> 2/2 way Direct-acting Normally closed 	2	G 3/8	0.12	25	12.5
		NPT 3/8	0.12	25	12.5
	3	G 3/8	0.25	10	5
		NPT 3/8	0.25	10	5
	4	G 3/8	0.45	8	4
		NPT 3/8	0.45	8	4
		G 1/2	0.45	8	4
		NPT 1/2	0.45	8	4
	6	G 1/2	0.80	4	2
		NPT 1/2	0.80	4	2
	8	G 1/2	1.10	2	1
		NPT 1/2	1.10	2	1
	9,5	G 1/2	1.40	0.7	0.35
		NPT 1/2	1.40	0.7	0.35

Fig. 123 Caratteristiche della valvola Burkert 2875. [34]

Sul catalogo Burkert viene fornito il valore di conversione per calcolare il  $C_v$ , che viene richiesto dal software *Amesim* per le simulazioni. In particolare:  $C_v = \frac{K_{vs}}{0,857}$

Valvola	Orifizio D[mm]	$K_{vs}$	$C_v$
<b>2873</b>	<b>2</b>	<b>0,100</b>	<b>0,116</b>
<b>2873</b>	<b>2,5</b>	<b>0,150</b>	<b>0,173</b>
<b>2875</b>	<b>3</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>
<b>2875</b>	<b>4</b>	<b>0,45</b>	<b>0,52</b>

Fig.124 Tabella con i coefficienti delle valvole e relative conversioni.

Teoricamente le valvole si potrebbero controllare variando la tensione c.c., tuttavia nella realtà la presenza dell'attrito statico potrebbe provocare malfunzionamenti compromettendo la sensibilità della valvola ed aumentando l'isteresi.

Si può sopperire a ciò regolando la valvola tramite quello che viene chiamato comunemente controllo *PWM*. Infatti, in questo caso l'otturatore è sottoposto a brevi e veloci oscillazioni che mantengono l'attrito di scorrimento costante.

Grazie all'elettronica di controllo con questo sistema si agisce sul segnale di ingresso modulando la larghezza di impulso.

Questo permette di ottenere una tensione costante dove la corrente effettiva nella bobina dipende dal rapporto tra la durata dell'impulso positivo  $t_1$  e l'intero periodo  $T$ , che viene definito come *duty cycle*.

Più il valore di quest'ultimo parametro aumenta, più aumenterà anche la corrente effettiva nella bobina.

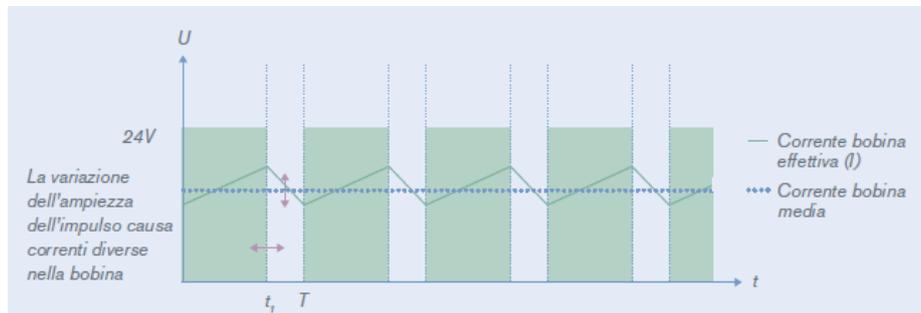


Fig. 125 Rappresentazione del segnale di controllo PWM. [34]

Come detto in precedenza e da come viene consigliato dal costruttore della valvola, bisogna fare particolare attenzione alla scelta della giusta valvola.

Infatti, scegliendo una valvola con un orifizio sovradimensionato si rischia che una parte della corsa dell'otturatore rimanga inutilizzata, in quanto si raggiungono i valori di portata completa già con una minima apertura della valvola.

Scegliendo invece un orifizio troppo piccolo si corre il rischio di non riuscire a garantire il valore di portata completa neppure a valvola completamente aperta.

Per una corretta regolazione dell'impianto quindi è buona norma che la perdita di carico introdotta dalla valvola sia la più alta del circuito, quindi circa il 30-50% delle perdite dell'intero circuito dovrebbero essere introdotte da questo componente.

Un sistema di controllo ad anello chiuso costruito utilizzando queste valvole è il seguente Fig.126. Un misuratore di portata manda la *feedback* del valore di portata reale al controllore *PID*, che lo confronta con quello di *set-point* e di conseguenza genera il segnale di controllo che pilota l'elettrovalvola.

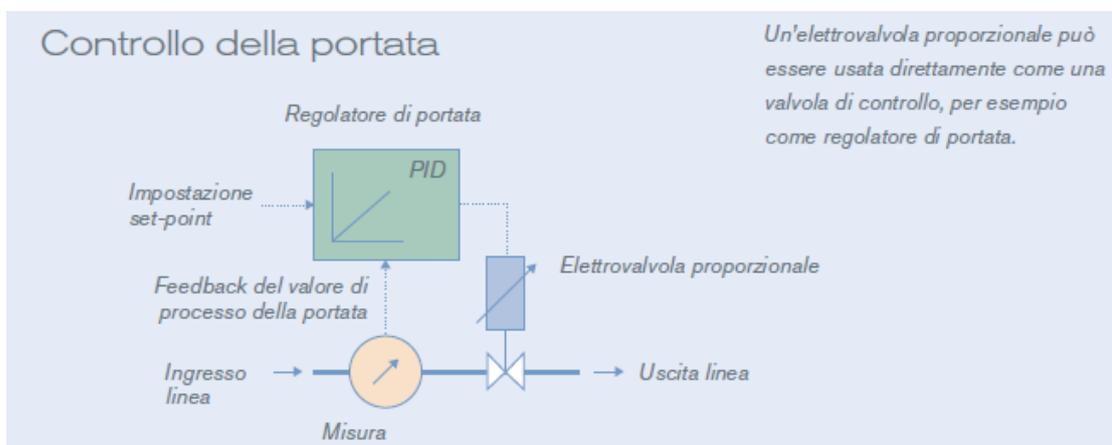


Fig. 126 Sistema di controllo della portata in anello chiuso. [34]

### 5.2.6.3 Valvola SMC VDW

Un'alternativa alle valvole Burkert potrebbe essere rappresentata dal modello VDW di SMC, in quanto questa azienda produce molti componenti per la pneumatica e l'idraulica di dimensioni molto ridotte, infatti con la valvola dotata di corpo in resina permette un risparmio notevole sul peso del componente.

La valvola utilizzato è di taglia 2, la quale può essere dotata di attacco rapido, tuttavia sfortunatamente il diametro massimo alloggiabile è di 6mm, mentre i tubi scelti per il circuito sono da 8 mm, quindi è stata scelta quella con attacco femmina M5 al quale dovrà essere montato un raccordo dritto con filettatura M5 ed attacco rapido per tubo da 8 mm.



Fig. 127 Valvole SMC VDV con attacco rapido e filettatura. [35]

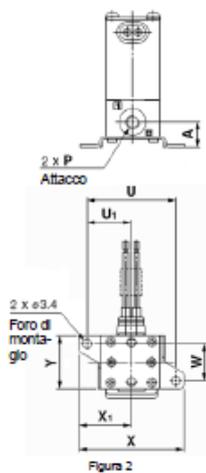
Caratteristiche tecniche (taglia 2):

- Tensione nominale cc: 24 V.
- Massima pressione di esercizio: 10 bar.
- Peso: 80g.
- Assorbimento: 3W.

Si può notare dai dati forniti a catalogo

Fig.129, che per quanto riguarda la massima pressione di esercizio e le pressioni differenziali applicabili, la valvola rientra nel range utilizzato durante la spruzzatura.

Poiché la valvola VDW scelta è costruita in tre formati differenti, per la scelta del modello che più si adattasse alle esigenze del circuito sono state effettuate, utilizzando i dati forniti dal costruttore a catalogo, varie simulazioni su Amesim. In quanto è necessario scegliere una valvola che non introduca troppe perdite, ma che non abbia una sezione di passaggio troppo elevata, in quanto renderebbe impossibile la regolazione.



Taglia	Attacco P	A (mm)	Montaggio squadretta (mm)					
			U	U <sub>1</sub>	W	X	X <sub>1</sub>	Y
1	ME (M5)	9.5	28	14	11	34	17	17
2	ME (M5)	9.5	33	16.5	14	39	19.5	20

Fig. 128 Dimensioni della valvola VDW. [35]

#### Tipo corpo resina

Taglia	Attacco	Diametro orifizio [mm]	Modello	Caratteristiche di portata		Massima pressione differenziale di esercizio [MPa]	Peso [g]
				AV	Conversione Cv	Attacco pressurizzato 1	
1	M5	1.0	VDW12	0.96	0.04	0.9	45
	ø3.2 Raccordo istantaneo	1.6		1.70	0.07	0.4	
	ø4 Raccordo istantaneo	1.6		1.70	0.07	0.7	
2	M5	1.6	VDW22	4.30	0.18	0.4	80
	ø4 Raccordo istantaneo	2.3		7.20	0.30	0.2	
	ø6 Raccordo istantaneo	3.2					

Fig. 129 Tabella riferita alle caratteristiche delle varie taglie della valvola VDW. [34]

## CAPITOLO 6: Simulazioni

---

### 6.1 Simulazioni sul circuito idraulico con Simcenter Amesim

#### 6.1.1 Il Software

Dopo aver scelto i vari componenti, per studiare il funzionamento del circuito, è stato utilizzato il software commerciale Simcenter Amesim. Il quale è un programma multidominio dotato di varie librerie riguardanti molteplici aspetti dell'ingegneria, pronte all'uso, che permettono di simulare i vari componenti riuscendo ad interfacciare, come nel nostro caso: la parte di controllo, quella elettrica e quella idraulica.

Si è partiti inizialmente con un approccio molto basilare, in quanto non conoscendo il software e le sue potenzialità, si è presentata la necessità di studiare i vari componenti delle librerie singolarmente, poichè ognuno di essi è fornito di vari sottomodelli che si adattano alle varie problematiche e che richiedono diversi dati di ingresso.

Partendo in questo modo si è potuto analizzare il comportamento di ogni componente in modo da poter ottimizzare il setting dei vari parametri ed avere un confronto dei risultati ottenuti con la realtà.

Partendo quindi dall'analizzare un singolo ugello alimentato da varie pressioni si è poi arrivati al circuito finale comprendente: la tanica, la pompa, la sensoristica, i raccordi, le tubazioni, gli ugelli e la parte di controllo.

#### 6.1.2 Simulazione su ugelli semplici e scelta del sottomodello

Si è partiti come detto in precedenza da un circuito molto semplice, che permettesse di analizzare i vari componenti e mettesse in luce le varie problematiche di ognuno di essi.

Per la caratterizzazione degli ugelli spruzzatori, si è costruito il circuito in Fig. 130.

Partendo da sinistra in alto si può notare il blocco *fluid properties* (A), che permette di impostare le varie caratteristiche del fluido studiato, sotto si trova il *piecewise linear signal source* (B) che permette di generare un segnale adimensionale *null* variabile nel tempo, che viene tradotto dal blocco *presc* (C) in segnale di pressione.

Spostandosi verso destra, si incontra poi il *flowratesensor* (D) che legge la pressione presente sulla linea e la traduce in un segnale adimensionale *null*, poi utilizzabile per eventuali controlli. Infine, si trova l'*ugello* (E), che è collegato con un *serbatoio* (F) posto ad 1 bar, il quale rappresenta l'ambiente dove il flusso nebulizzato sfocia.

Per collegare i vari componenti si possono scegliere vari tipi di tubature, in particolare la linea azzurra semplice rappresenta dei collegamenti ideali, quella doppia una tubatura reale, mentre il tratto campito definito *hosepipe* (G) modella un tubo flessibile.

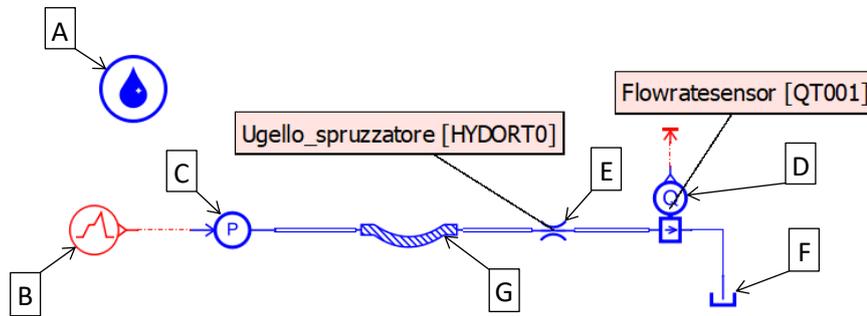


Figura 130 Circuito semplice utilizzato per studiare il comportamento dell'ugello.

Per quanto riguarda i condotti, in tutte le simulazioni si è impostata una rigidità infinita delle pareti, in quanto le pressioni in gioco non sono così elevate da portare ad una deformazione del tubo che potrebbe inficiare il corretto funzionamento del circuito. Per quanto riguarda la scabrezza interna del tubo, da manuale si è ricavato per i tubi utilizzati un  $\epsilon=0,02$  mm. Si è scelto il valore massimo in modo da essere più cautelativi, anche se comunque le perdite distribuite risultano essere molto piccole.

Nel modello costruito per le prove sulle diverse tipologie di ugello, per uniformarsi il più possibile al circuito finale, considerando le dimensioni del drone, è stato scelto un tubo flessibile lungo 80 cm. Inoltre, da come si può vedere dal disegno, il collegamento fra i vari componenti non è diretto, ma per evitare disturbi, è stato previsto un tratto di tubo rigido lungo 1 cm, dello stesso diametro dei tubi flessibili.

Per quanto riguarda la modellazione dell'ugello, il programma fornisce 5 modelli differenti, che permettono la caratterizzazione del comportamento tramite l'inserimento di diversi parametri.

In particolare, le cinque tipologie fanno riferimento a:

- $C_q$ : si imposta il valore massimo del coefficiente e la geometria dell'orifizio.
- $K_v$ : si imposta il valore massimo del coefficiente.
- $C_v$ : si imposta il valore massimo del coefficiente.
- $Q/dp$ : si imposta il valore di portata (l/min) e la corrispondente caduta di pressione (bar).
- Zeta: si imposta la geometria ed il coefficiente di caduta di pressione minima  $\zeta$ .

Vista la caratterizzazione degli ugelli fatta nel capitolo 3, partendo dai dati forniti da catalogo, si è deciso di partire utilizzando la modalità  $C_q$ . Tuttavia, da come è possibile notare dalle tabelle presenti nel capitolo 3.2.1, il coefficiente di scarico, a causa dei fenomeni che si verificano all'interno dell'ugello, nel range di utilizzo di quest'ultimo ha un'elevata variabilità.

Per verificare se il sottomodello HYDORF0 scelto fosse corretto, si sono fatte delle simulazioni prendendo in considerazione l'ugello TXA800067VK che ha un:

- $C_{Dmax} = 0,30$  e un  $C_{Dmed} = 0,22$ .

Si è impostata una pressione crescente che aumentasse da 2 a 10 bar in 16 secondi, dando così il tempo al fluido di assestarsi, in quanto non era d'interesse studiare i transitori che si verificano.

Tuttavia, confrontando i dati reali con quelli restituiti da Amesim: prendendo sia il valore massimo del coefficiente, che quello medio, si è notata una discrepanza anche notevole fra il valore di portata calcolato con il software e quello ricavato sperimentalmente dal costruttore dell'ugello.

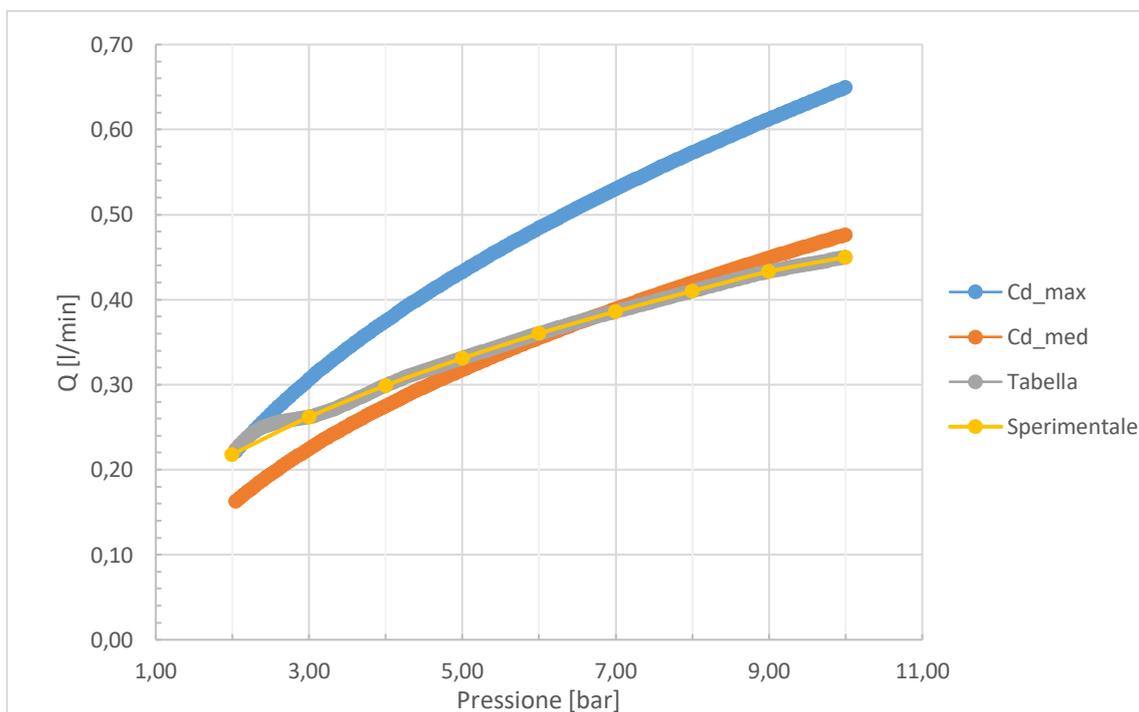


Figura 131 Confronto fra le diverse portate dell'ugello TXA800067VK fra dati ricavati sperimentalmente e via software.

Quindi è stato cambiato il sottomodello con HYDORT0, il quale permette di inserire tramite un file di testo [A.1] i valori di portata in funzione del salto di pressione e della temperatura del liquido. Si sono quindi inseriti i vari punti della caratteristica sperimentale presa da catalogo,

considerando comunque che il software interpola i punti mancanti con un'interpolazione lineare o cubica.

Dal grafico Fig. 131, in questo caso, si può notare come ci sia una perfetta corrispondenza fra la caratteristica dell'ugello ricavata sperimentalmente ed i valori restituiti dal software. L'oscillazione iniziale che si vede a 2,5 bar è probabilmente dovuta al transitorio che si verifica nel circuito costruito per la simulazione dal costruttore di ugelli.

Vista quindi la bontà dei dati ottenuti, il sottomodulo è stato scelto per le successive simulazioni eseguite sulle varie parti di circuito.

### 6.1.3 Verifica delle prestazioni garantite dalle pompe scelte

Avendo selezionato varie pompe commerciali (capitolo 5.2.5) di cui si hanno a disposizione le caratteristiche, è stato costruito un circuito simile a quello montato sul drone, che permettesse di valutare il punto di funzionamento in progetto delle varie pompe potendo così valutare quale fosse la più adatta per l'impiego.

In particolare Fig.132, la struttura del circuito è costituita da un tubo di aspirazione lungo 20 cm, collegato tramite il raccordo a 90° montato sul tappo inferiore della tanica.

Alla mandata si trovano tre sensori, che permettono di misurare: portata, pressione e liquido totale mandato dalla pompa. Sono collegati a quest'ultima da un tratto di tubo rigido lungo 1 cm.

Il tratto compreso fra la pompa e la prima giunzione a T è lungo 35 cm, diviso in un tratto da 10 cm prima del raccordo a 90° e 25 cm quello successivo.

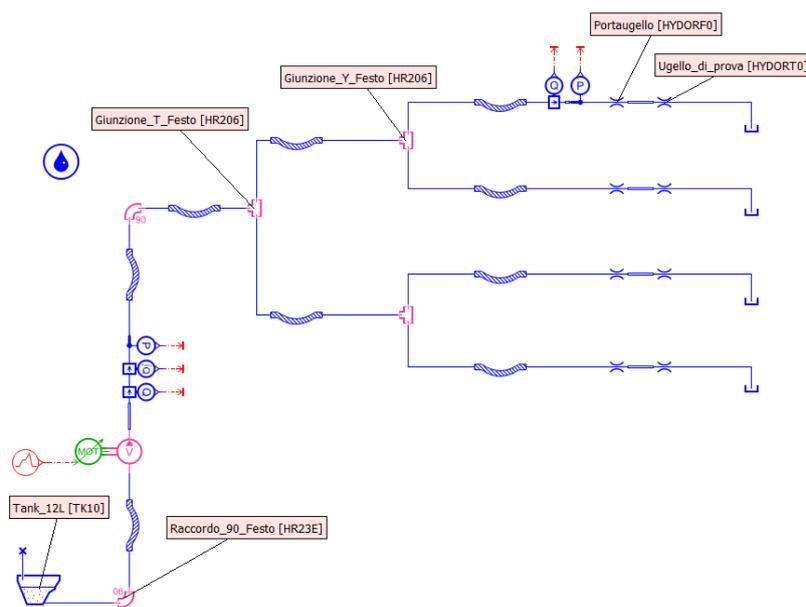


Fig. 132 Circuito utilizzato per verificare le prestazioni garantite dalle pompe scelte.

Il circuito prosegue poi dividendosi in 4 bracci, dove in ognuno di questi viene montato un ugello per la spruzzatura. Questi sono lunghi in totale 80 cm: divisi in un tratto da 40cm compreso fra le due giunzioni a T ed il successivo, sempre da 40 cm, compreso fra la giunzione e l'ugello.

Nel braccio superiore sono stati introdotti un misuratore di portata e uno di pressione, per monitorare le condizioni di alimentazione del singolo ugello. Si è inoltre tenuto conto della presenza dei portaugelli, in quanto anche questo componente introduce delle perdite di carico.

Il serbatoio è stato maggiorato, fino ad arrivare a 12 l in quanto era necessario avere una tolleranza per effettuare delle prove sui tempi di svuotamento, poiché il programma genera un segnale di errore se la pompa funziona a vuoto. Si è quindi potuto valutare anche i tempi impiegati dalle varie pompe per raggiungere la quota di 10 l pompati.

L'ugello montato durante la simulazione è il TXA800067VK, in quanto rappresenta una taglia media fra i possibili scelti e potrebbe essere il più adatto allo scopo, poiché con la portata che è in grado di smaltire si riesce a svuotare il serbatoio nei tempi prestabiliti.

Per quanto riguarda la pompa, in Amesim è possibile inserire i vari punti di funzionamento della stessa a vari regimi di rotazione. Il software procede poi a ricavarli i punti mancanti tramite interpolazione ricostruendo la sua caratteristica. In particolare: è stato utilizzato il sotto-modello  $q_v = f(dp, \omega)$ , che permette di inserire i punti fornendo la portata smaltita in funzione della pressione e del regime di rotazione [A.2].

Le pompe durante la simulazione sono state fatte funzionare al massimo delle prestazioni.

Il tempo di simulazione è stato settato su 500s, in quanto per ottimizzare le batterie di un drone di questa grandezza si deve cercare di svuotare il serbatoio da 10l in un tempo di circa 7 minuti. Dal grafico sottostante Fig.133, che rappresenta la portata mandata dalla pompa nel circuito, si può notare come le prestazioni migliori siano garantite dalle due pompe *Seaflo 22 series* sia nella versione a 12V che in quella a 24 V. In particolare, la prima è in grado di garantire una portata, in condizioni di progetto, di 1,33 l/min ad una pressione di 5,1 bar, mentre la seconda 1,40 l/min ad una pressione di 5,7 bar.

La scelta ricade quindi su quella a 24V, in quanto a parità di peso è in grado di garantire prestazioni migliori che danno la possibilità di regolare la portata smaltita dal circuito.

Per quanto riguarda le altre pompe analizzate invece, si può notare come i valori di portata garantiti siano di molto inferiori alle due precedentemente citate.

Inoltre, poiché gli ugelli TXA ed AITX necessitano per il corretto funzionamento di essere alimentati con una pressione non inferiore ai 3,5-4 bar, si nota come la pompa "1" e la "3" non siano in grado di soddisfare questo requisito Fig.134. Per quanto riguarda la pompa *JMRRC BPP25*, è in grado di garantire una portata di 1,15 l/min ed una pressione di 3,7 bar. Poiché il

peso rispetto alle Seaflo è molto contenuto si potrebbe valutare l'applicazione in configurazione multipla.

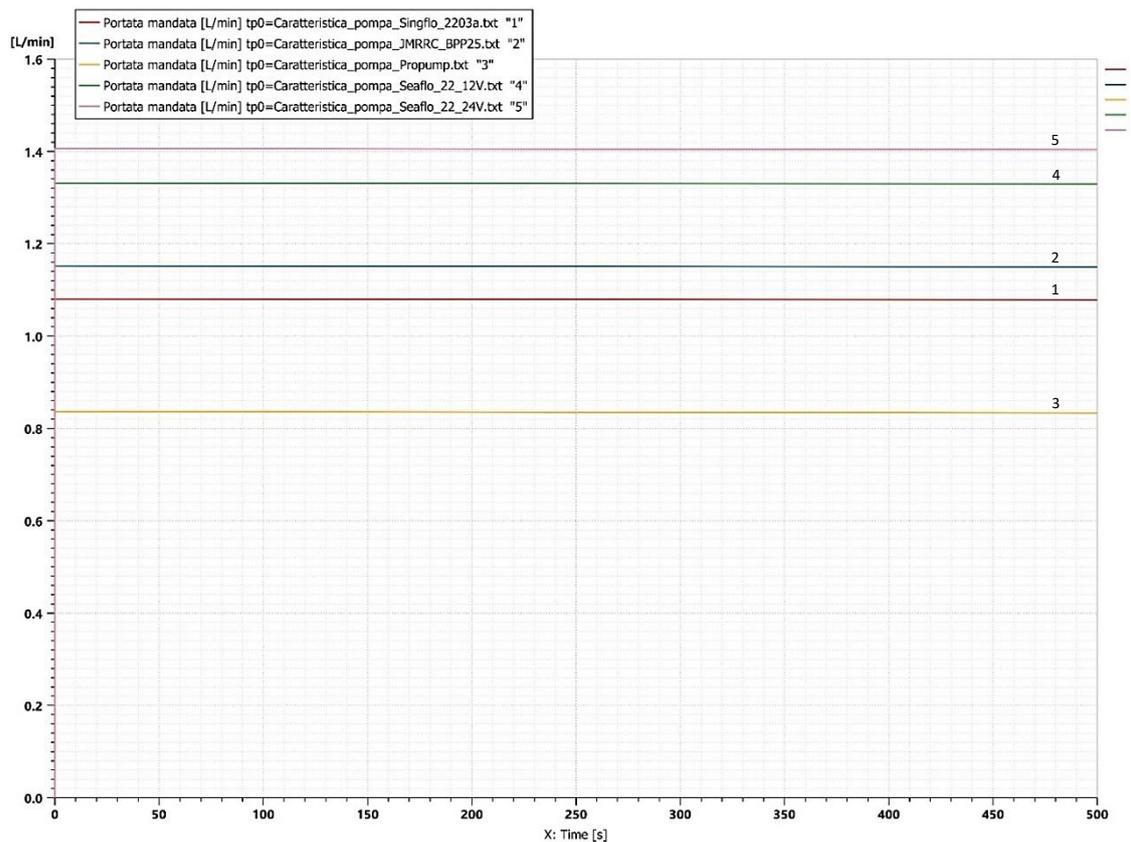


Fig.133 Portate in l/min garantite dalle diverse pompe con ugelli Teejet TXA800067VK.

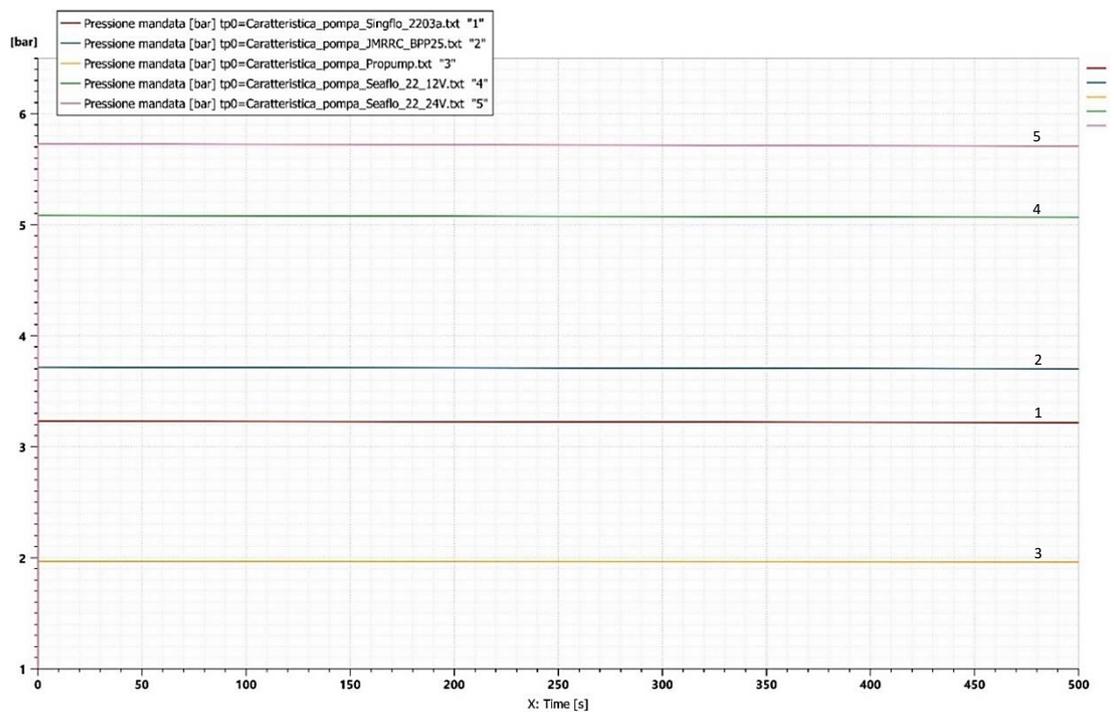


Fig.134 Pressioni in bar garantite dalle diverse pompe con ugelli Teejet TXA800067VK.

Per la valutazione della quota totale di liquido spostato dalle varie pompe si può fare riferimento al grafico sottostante Fig. 135, che rappresenta il volume di pesticida pescato dal serbatoio in funzione del tempo trascorso. Si nota come lo svuotamento del serbatoio avvenga nel tempo prestabilito solo per le due pompe Seaflo. In particolare, in condizioni di progetto la versione a 12V permette uno svuotamento in 451 s, infatti nei 500s della simulazione permette di spruzzare 11,1 l totali. Quella a 24V invece permette lo svuotamento in 427s, con 11,7 l pompati in 500 s

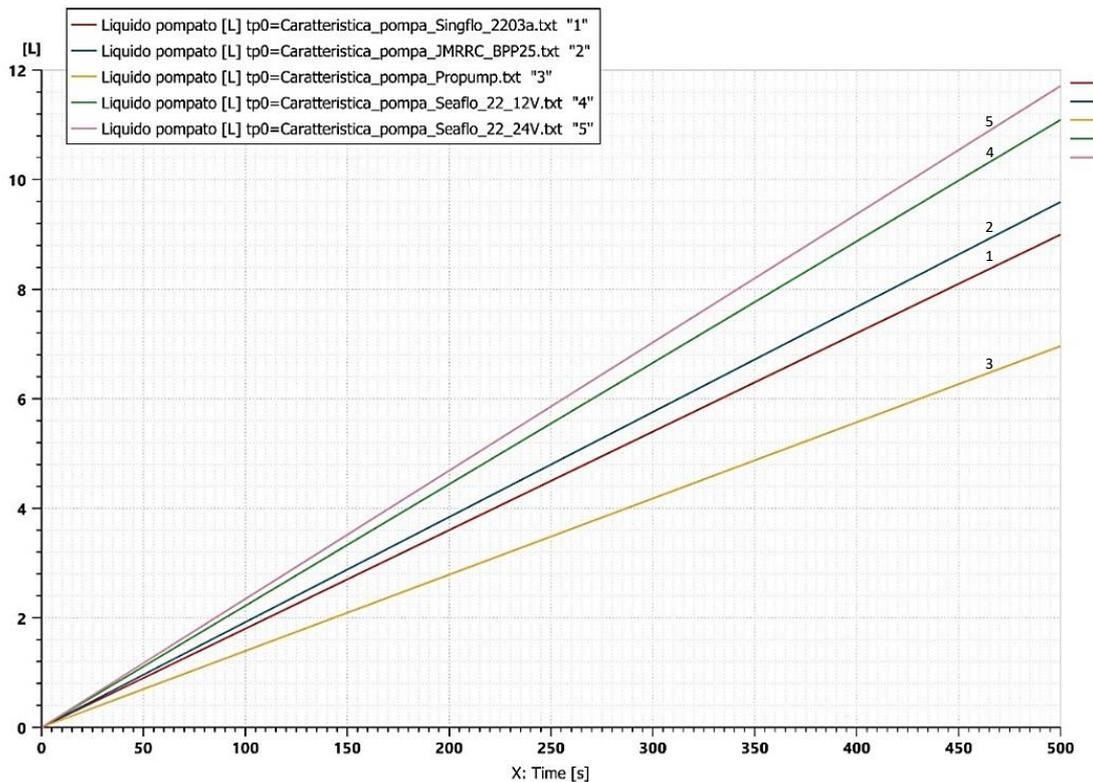


Fig. 135 Liquido totale pompato dalle varie pompe in funzione del tempo.

Grazie poi ai sensori montati sul braccio superiore del circuito, è stato possibile determinare la portata smaltita da ogni singolo ugello e la pressione a cui si trova ad essere alimentato Fig.137. Con le due pompe prese in considerazione è possibile avere una portata smaltita per singolo ugello, da come è possibile notare dal grafico Fig.136, rispettivamente di 0,33 l/min e 0,35 l/min.

Per quanto riguarda la pressione, poiché le portate in gioco sono limitate e quindi il liquido si muove a velocità non troppo elevate, le cadute di pressione che si hanno durante il percorso che la miscela si trova ad affrontare sono trascurabili e non inficiano il processo di spruzzatura. Per esempio, nel tratto di mandata il liquido ha una velocità di 0,82 m/s.

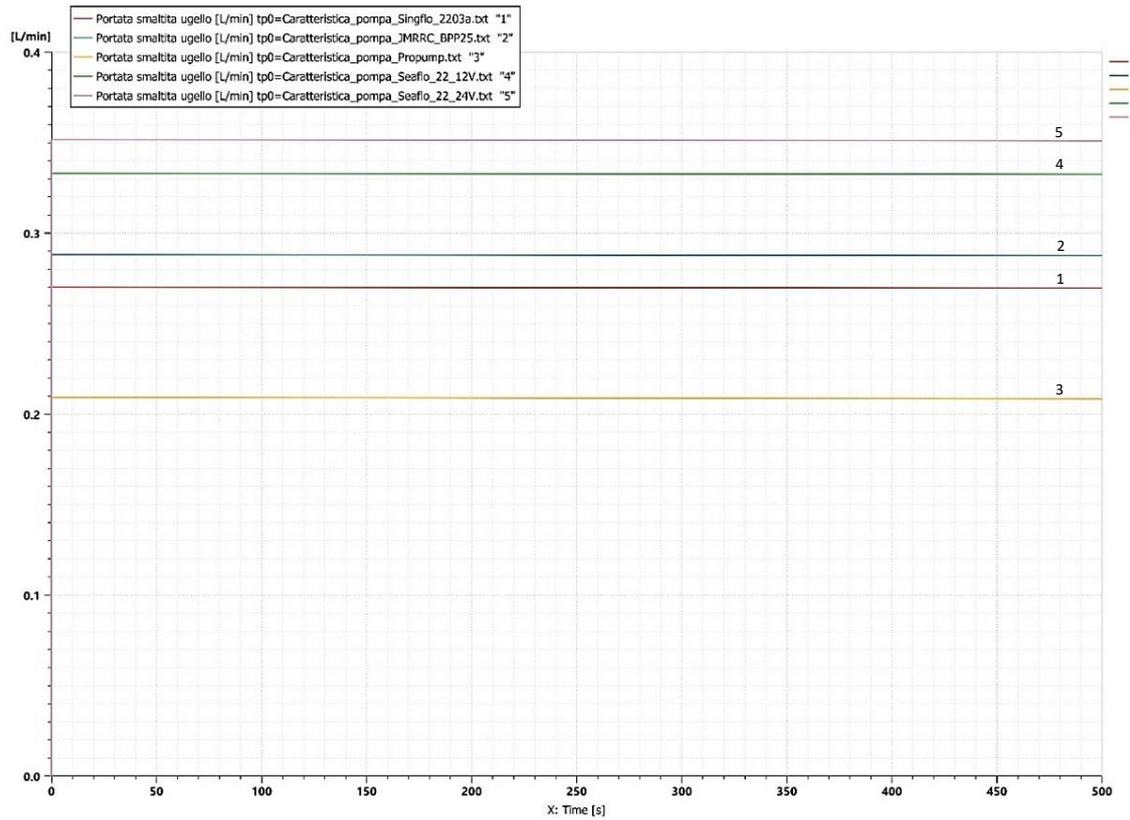


Fig. 136 Portata smaltita dal singolo ugello TXA800067VK con le varie pompe scelte.

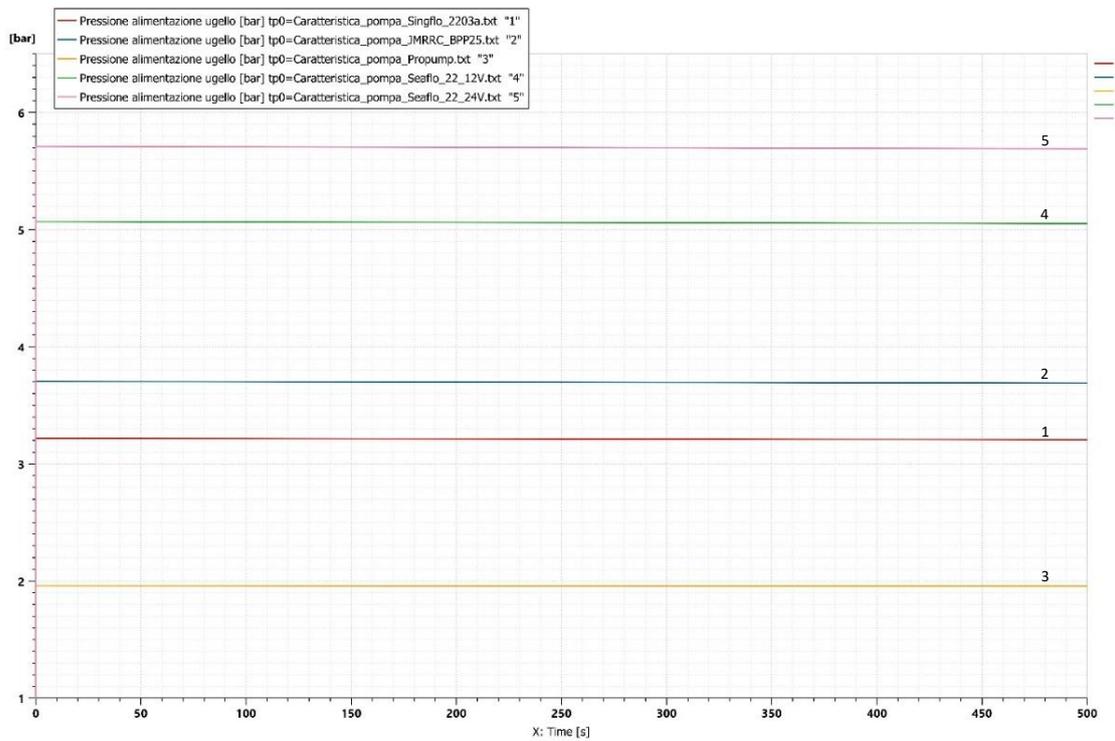


Fig. 137 Pressione di alimentazione del singolo ugello TXA800067VK con le varie pompe scelte.

Nelle tabelle sottostanti sono riassunti i valori di alimentazione che le varie pompe riescono a garantire nei diversi tipi di ugelli introdotti nel capitolo 3.2.1.

<b>TXA800050VK</b> <b>Modello pompa</b>	<b>Q ugello</b> <b>[l/min]</b>	<b>P ugello</b> <b>[bar]</b>	<b>Svuotamento</b> <b>[s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,215	3,70	695
BPP-25 JMRRRC Co. LTD. 22-25V	0,227	4,18	660
ProPumps Co. 12V	0,177	2,42	845
22 series Seaflo 12V	0,262	5,85	570
22 series Seaflo 24V	0,266	6,03	560

<b>TXA800067VK</b> <b>Modello pompa</b>	<b>Q ugello</b> <b>[l/min]</b>	<b>P ugello</b> <b>[bar]</b>	<b>Svuotamento</b> <b>[s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,269	3,21	555
BPP-25 JMRRRC Co. LTD. 22-25V	0,287	3,68	520
ProPumps Co. 12V	0,208	1,96	720
22 series Seaflo 12V	0,332	5,05	450
22 series Seaflo 24V	0,351	5,70	425

<b>TXA8001VK</b> <b>Modello pompa</b>	<b>Q ugello</b> <b>[l/min]</b>	<b>P ugello</b> <b>[bar]</b>	<b>Svuotamento</b> <b>[s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,356	2,44	420
BPP-25 JMRRRC Co. LTD. 22-25V	0,388	2,93	385
ProPumps Co. 12V	0,228	1,69	660
22 series Seaflo 12V	0,430	3,68	350
22 series Seaflo 24V	0,497	5,02	300

<b>TXA80015VK</b> <b>Modello pompa</b>	<b>Q ugello</b> <b>[l/min]</b>	<b>P ugello</b> <b>[bar]</b>	<b>Svuotamento</b> <b>[s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,410	1,84	365
BPP-25 JMRRRC Co. LTD. 22-25V	0,475	1,97	315
ProPumps Co. 12V	0,242	1,49	615
22 series Seaflo 12V	0,547	2,58	275
22 series Seaflo 24V	0,699	4,28	215

<b>AITX 8001VK Modello pompa</b>	<b>Q ugello [l/min]</b>	<b>P ugello [bar]</b>	<b>Svuotamento [s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,307	2,85	485
BPP-25 JMRR Co. LTD. 22-25V	0,358	3,16	420
ProPumps Co. 12V	0,194	2,17	770
22 series Seaflo 12V	0,435	3,61	345
22 series Seaflo 24V	0,499	5,01	300

<b>AITX 80015VK Modello pompa</b>	<b>Q ugello [l/min]</b>	<b>P ugello [bar]</b>	<b>Svuotamento [s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,345	2,54	435
BPP-25 JMRR Co. LTD. 22-25V	0,403	2,80	350
ProPumps Co. 12V	0,210	1,94	710
22 series Seaflo 12V	0,478	3,13	315
22 series Seaflo 24V	0,696	4,28	215

<b>XR8001 Modello pompa</b>	<b>Q ugello [l/min]</b>	<b>P ugello [bar]</b>	<b>Svuotamento [s]</b>
Singflo Flo-2203a 12V	0,355	2,44	420
BPP-25 JMRR Co. LTD. 22-25V	0,387	2,95	385
ProPumps Co. 12V	0,267	1,39	560
22 series Seaflo 12V	0,430	3,67	350
22 series Seaflo 24V	0,508	4,97	295

Analizzando le tabelle introdotte, che riassumono i dati delle varie simulazioni eseguite cambiando gli ugelli nel circuito in Fig.132, è possibile notare come in generale le pompe che riescono a garantire le migliori prestazioni siano le due Seaflo.

In particolare, con gli ugelli Teejet TXA e AITX, i quali per funzionare correttamente necessitano di pressioni di circa 3,5-4 bar sono le uniche a garantire una pressione sufficiente nell'ottica anche di introdurre una regolazione della portata smaltita.

La situazione invece cambia con l'ultimo ugello analizzato, infatti trattandosi di un ugello a ventaglio, per il funzionamento necessita di pressioni comprese fra 1 e 4 bar.

Quindi, in questo caso, analizzando sia il tempo di svuotamento della tanica che la pressione raggiunta in progetto, potrebbe essere utilizzata anche la pompa JMRRRC.

I tempi di svuotamento, si riferiscono ad una tanica da 10 l, che per ottimizzare il consumo delle batterie del drone, dovrebbe attestarsi in un tempo di circa 450 s.

#### 6.1.4 Circuito con pompe in configurazione multipla

Poichè la pompa BPP-25 JMRRRC Co. LTD. 22-25V permette di ottenere delle buone prestazioni, considerando il peso molto contenuto, è possibile pensare ad un'applicazione multipla.

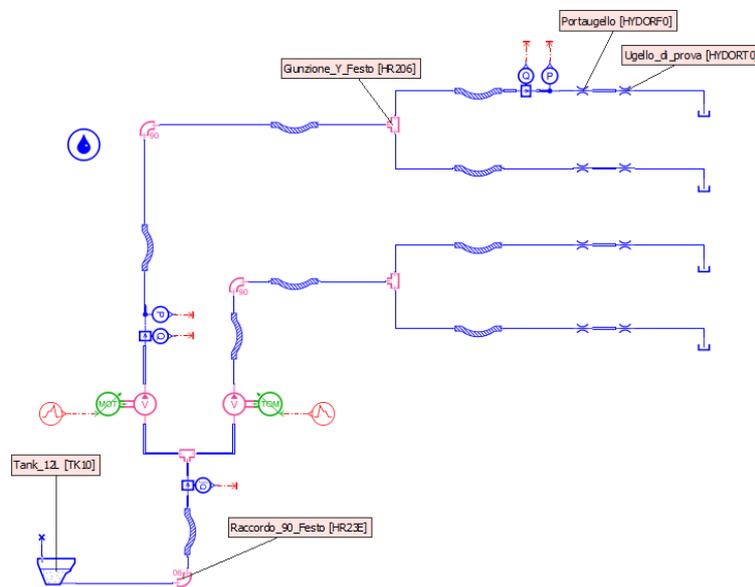


Fig. 138 Circuito utilizzato per le simulazioni con due pompe.

Infatti, utilizzando due pompe JMRRRC, la quale pesa circa 300g ad unità si potrebbe risparmiare 500 g rispetto all'applicazione della pompa Seaflo.

È stato quindi costruito il modello riportato, dove ogni pompa alimenta un braccio del circuito e quindi solo due ugelli invece di quattro.

Le lunghezze dei tratti di tubo sono rimaste invariate, in quanto il circuito prevede un tratto di aspirazione lungo 20 cm, il tratto di mandata prima del raccordo a 90° è lungo 10 cm ed i due tratti da 40 cm prima e dopo il raccordo ad Y, formano così un braccio di lunghezza totale pari ad 80 cm.

Il sensore per la misurazione del liquido totale pompato è stato posizionato nel tratto di aspirazione, in modo da avere la quota totale di prodotto mosso dalle pompe.

Grazie a questa configurazione è possibile avere al singolo ugello i seguenti parametri di alimentazione e tempi di svuotamento della tanica da 10 l:

Modello ugello	Q ugello [l/min]	P ugello [bar]	Svuotamento [s]
<b>Teejet TXA800050VK</b>	0,245	5,01	610
<b>Teejet TXA800067VK</b>	0,321	4,70	465
<b>Teejet TXA8001VK</b>	0,454	4,15	330
<b>Teejet TXA80015VK</b>	0,627	3,43	240
<b>Teejet AITX8001VK</b>	0,495	3,98	300
<b>TeejetAITX80015VK</b>	0,584	3,60	255
<b>Teejet XR8001</b>	0,458	4,13	325

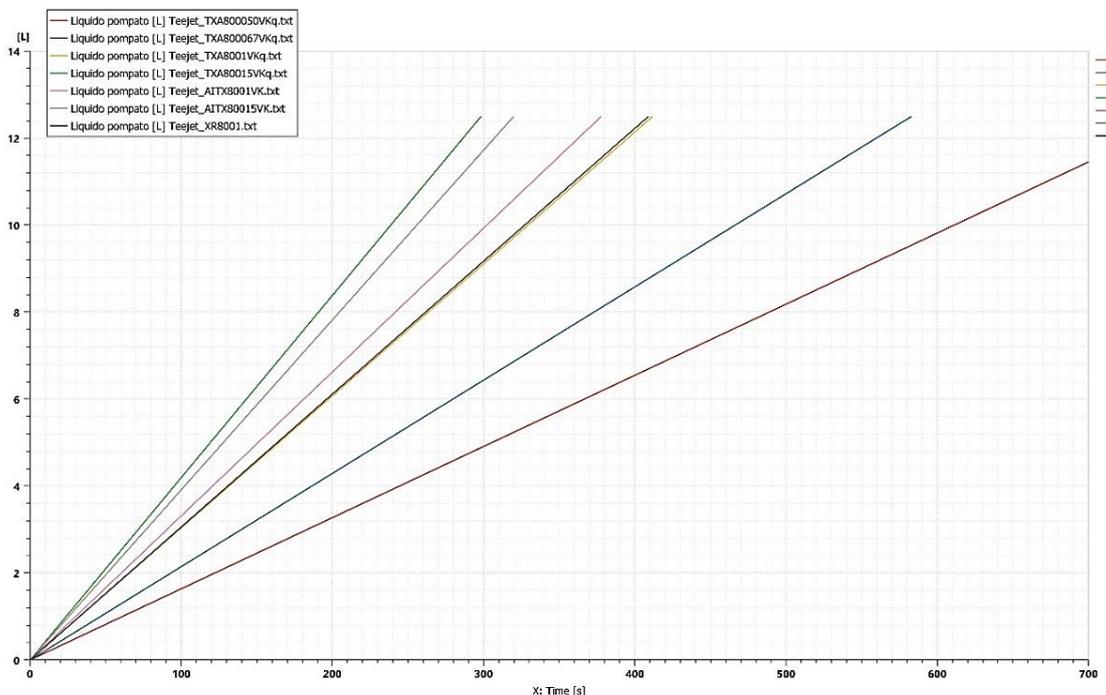


Fig. 139 Liquido totale pompato con diversi ugelli in funzione del tempo.

Anche in questo caso, si può notare come il TXA800067VK, sia l'ugello migliore per fra quelli a cono della serie TXA, infatti permette di svuotare il serbatoio nei tempi prestabiliti. Guardando la taglia inferiore allunga di troppo il tempo, arrivando a circa 10 minuti. Mentre per quanto riguarda le taglie superiori del TXA e i modelli AITX, anche in una configurazione multipla, le pompe non sono in grado di fornire un valore sufficiente di pressione agli ugelli, poiché per garantire lo svuotamento nel tempo ottimale si dovrebbe andare ad introdurre una regolazione che ridurrebbe la pressione al di sotto dei 3,5 bar.

Per quanto riguarda l'XR8001, il quale lavora a pressioni più basse, questa configurazione è in grado di garantire una pressione superiore a quella massima di funzionamento dell'ugello e

tempi di svuotamento inferiori a quelli prefissati, quindi questa soluzione potrebbe essere applicata.

Considerando poi il tempo di svuotamento della tanica da 10 l, per fare un confronto con le precedenti configurazioni di pompe analizzate, nel caso dell'ugello TXA800067VK con due pompe JMRRC avviene in 465 s, contro i 425 della pompa Seaflo 24 V.

Facendo una considerazione di carattere energetico invece, in questo ultimo circuito analizzato, in progetto la pompa JMRRC assorbe 0,95 A che considerando l'alimentazione a 24 V sono pari a 23 W di potenza.

Per quanto riguarda la Seaflo 24 V assorbe invece 2,76 A, corrispondenti ad una potenza assorbita di 66 W.

Utilizzando la configurazione a due pompe, comporterebbe un risparmio di 20 W. Tuttavia, i due dati non sono perfettamente confrontabili, in quanto anche con questa ultima configurazione di circuito, si riescono ad ottenere prestazioni inferiori in termini di pressione e portata smaltita rispetto alla Seaflo.

## 6.1.5 Test preliminari su valvole di regolazione

Poiché l'attività di spruzzatura da parte del drone è influenzata da diversi parametri quali: la quantità di prodotto da spargere per unità di superficie, la velocità di avanzamento, l'accelerazione, la presenza di ostacoli e aree da non trattare. È necessario prevedere un sistema di regolazione grazie al quale si possa intervenire sulla portata a seconda delle situazioni in cui ci si trova.

In particolare, si è cercato tramite l'utilizzo di un modello semplificato Fig. 140, di analizzare con il software l'influenza sulla portata smaltita e sulle pressioni in gioco, in seguito all'introduzione di una valvola per la regolazione del flusso e le varie cadute di pressione annesse al variare della sezione di passaggio.

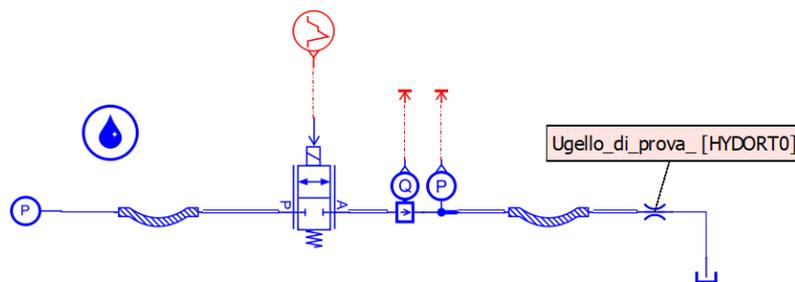


Fig. 140 Circuito semplificato per le prove di regolazioni con valvola a due vie.

Si è quindi costruito un circuito semplice ad un ugello, alimentato da una sorgente di pressione ideale, dotato di un flussimetro ed un misuratore di pressione e regolato tramite una valvola a due vie pilotata da un segnale variabile nel tempo.

Il circuito, per avvicinarsi il più possibile al comportamento di quello montato sul drone è composto da due parti di tubo di gomma lunghe 40 cm. Le varie parti poi sono collegate come nel caso precedente da un tratto di tubo rigido lungo 1 cm.

Le valvole utilizzate nelle simulazioni sono quelle presentate nel capitolo 5.2.6, dove sono specificati i dati tecnici. In particolare, sono stati provati i vari diametri degli orifizi a cui sono associati vari coefficienti, per capire quale fosse la taglia di valvola più adatta allo scopo.

Per quanto riguarda la pressione di alimentazione, è stata fissata a 6 bar, in quanto questo valore di pressione rappresenta il limite massimo raggiungibile dalle pompe prese in considerazione.

Il tempo totale della simulazione è di 10 secondi. Ogni 2 secondi il segnale che pilota la valvola varia riducendo la sezione di passaggio come segue:

- 0-2 s  $\rightarrow A_0=100\%$
- 2-4 s  $\rightarrow A_0=80\%$
- 4-6 s  $\rightarrow A_0=60\%$
- 6-8 s  $\rightarrow A_0=40\%$
- 8-10 s  $\rightarrow A_0=20\%$

Si sono analizzate le varie valvole Burkert, con differenti taglie di ugello, per capire come venissero influenzati i vari parametri in gioco al variare delle caratteristiche interne della valvola e dell'ugello. Gli  $A_0$  e i  $C_v$ , corrispondenti ai tre diversi diametri dell'orifizio interno della valvola sono rispettivamente:

- $A_1 = 3,14 \text{ mm}^2$   $C_{v1} = 0,116$
- $A_2 = 4,90 \text{ mm}^2$   $C_{v2} = 0,173$
- $A_3 = 7,01 \text{ mm}^2$   $C_{v3} = 0,290$

### 6.1.5.1 Ugello Teejet TXA800050VK

Viene riportata nel grafico sottostante Fig.141, la riduzione della sezione nel tempo per le tre valvole analizzate. Il suo andamento è lo stesso per tutti e tre gli ugelli analizzati.

Si può notare che avendo applicato una riduzione in percentuale, la curva riferita alla valvola con orifizio di sezione maggiore decresca molto più rapidamente delle altre due.

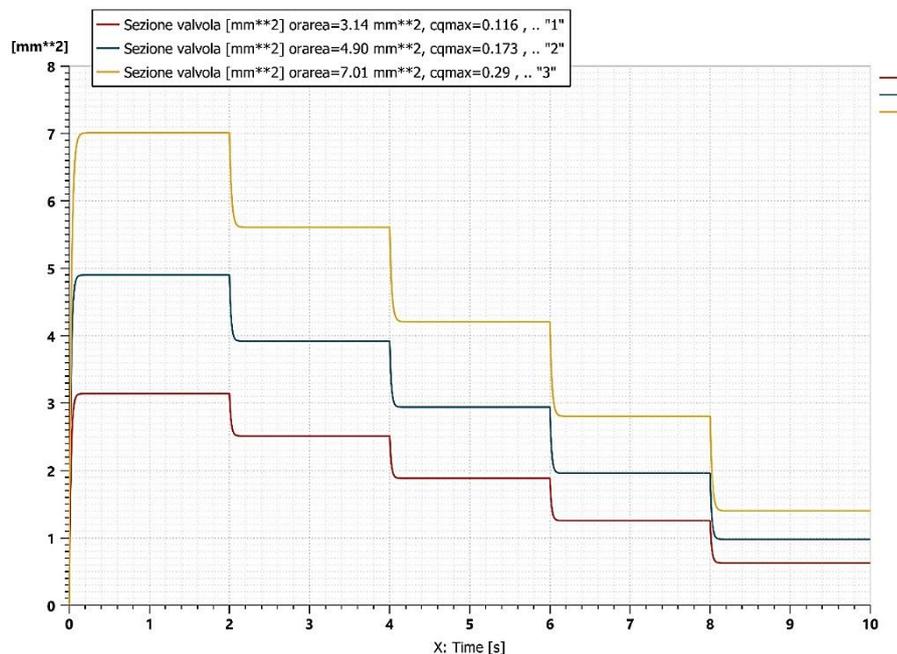


Fig. 141 Riduzione della sezione di passaggio in funzione del tempo.

Per quanto riguarda le simulazioni effettuate montando l'ugello TXA800050VK, il quale ha un orifizio di uscita pari a 0,86 mm si ottengono i seguenti grafici sotto riportati.

Analizzando il grafico della portata che viene smaltita Fig.142, partendo dalla valvola di dimensioni inferiori che ha un orifizio con un diametro circa doppio rispetto a quello dell'ugello, considerando tuttavia anche il passaggio tortuoso che il liquido deve compiere all'interno della stessa, la riduzione della portata rispetto al valore che ci si aspetterebbe alimentando l'ugello a 6 bar è più marcata.

Infatti, analizzando anche il grafico riferito alla pressione che l'ugello vede a monte Fig.143 con la valvola completamente aperta, si introduce una caduta di pressione di circa 0,7 bar che è abbastanza elevata, tuttavia tollerabile, il che la rende accettabile per la regolazione del circuito.

Passando poi alla seconda valvola analizzata vediamo come la riduzione di portata che si verifica nel circuito quando la valvola è completamente aperta è minima, infatti la caduta di pressione introdotta dal componente si attesta sul decimo di bar. Per quanto riguarda poi la variazione della portata e della pressione a monte dell'ugello durante la simulazione completa si può notare, come in questo caso, questa sia la valvola che permetta di regolare meglio il circuito variando i parametri senza introdurre perdite troppo elevate. Infatti, con la prima si arriverebbe a pressioni inferiori ai 3,5 bar che provocano malfunzionamenti negli ugelli

Infine, è stata analizzata la valvola di taglia maggiore. Si nota come le curve riferite a quest'ultima abbiano un andamento piatto rispetto alla variazione percentuale di sezione. In particolare, è curioso notare come la valvola sia totalmente inefficace fino a quando la sua sezione di passaggio non viene ridotta a dimensioni paragonabili alla sezione di uscita dell'ugello.

Infatti, il componente che impone la caratteristica del circuito è quello con la perdita maggiore.

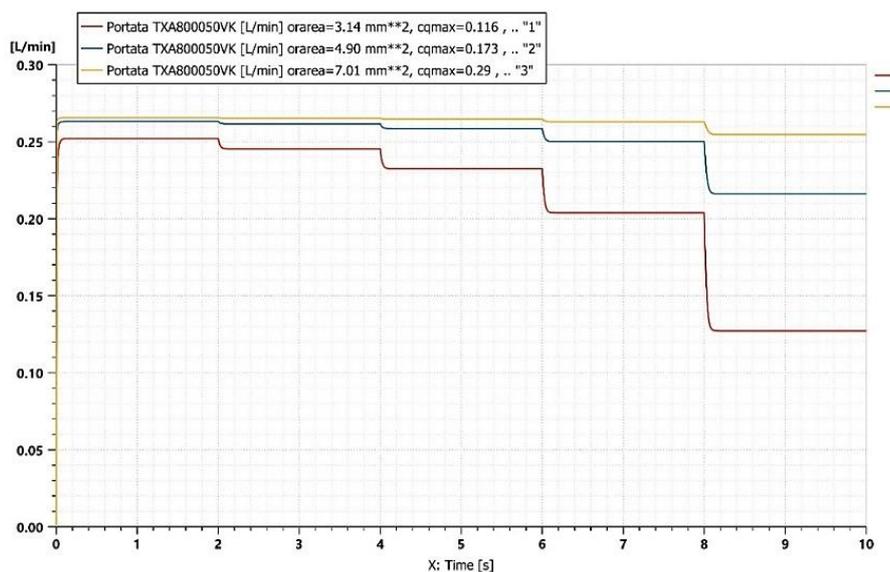


Fig. 142 Portata smaltita dall'ugello al ridursi della sezione della valvola.

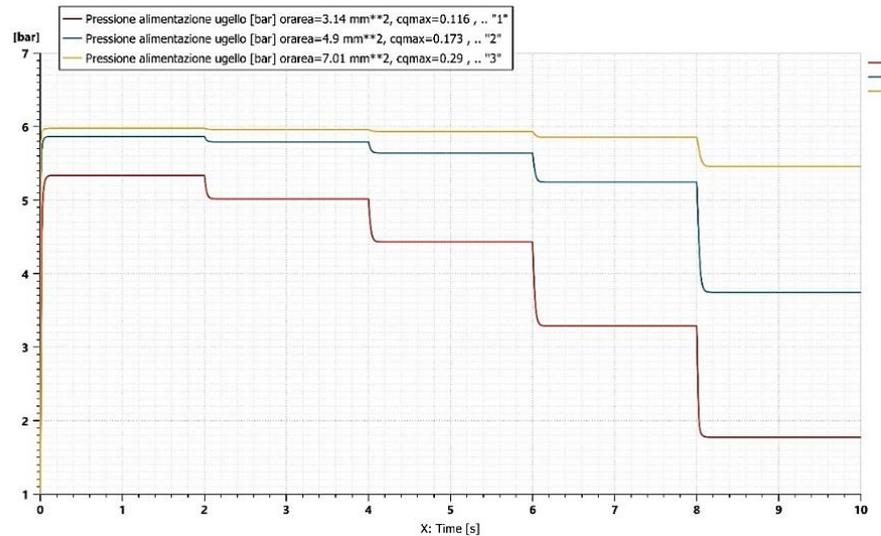


Fig. 143 Pressione di alimentazione dell'ugello al ridursi della sezione della valvola.

### 6.1.5.2 Ugello Teejet TXA800067VK

L'ugello TXA800067VK è quello di taglia media rispetto ai tre ugelli adatti ai trattamenti in frutteto e vigneto TXA scelti. Il suo orificio di uscita misura 1,04 mm.

Si può notare dai grafici riportati che i valori di portata, com'è lecito aspettarsi trattandosi di un ugello di taglia superiore rispetto al precedente, siano superiori. Proprio a causa delle maggiori portate che la valvola deve smaltire, le perdite introdotte da quest'ultima sono più rilevanti rispetto all'ugello analizzato precedentemente.

Anche in questo caso la valvola con area di passaggio di  $3,14 \text{ mm}^2$  introduce già a sezione  $A_0=100\%$  perdite che risultano inaccettabili per il corretto funzionamento del circuito Fig.145, quindi la si esclude da un possibile impiego nel circuito.

In particolare, dai grafici sottostanti risulta che la regolazione migliore la si possa ottenere dalla valvola "2", in quanto quella di taglia massima ha una sezione troppo grande rispetto a quella dell'ugello e risulta quasi ininfluenza nella regolazione.

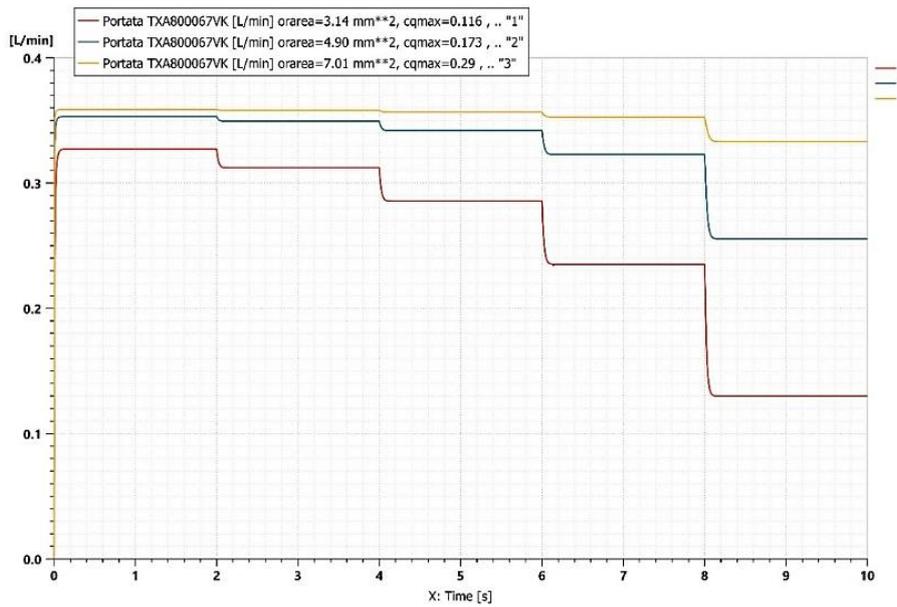


Fig.144 Portata smaltita dall'ugello al ridursi della sezione della valvola.

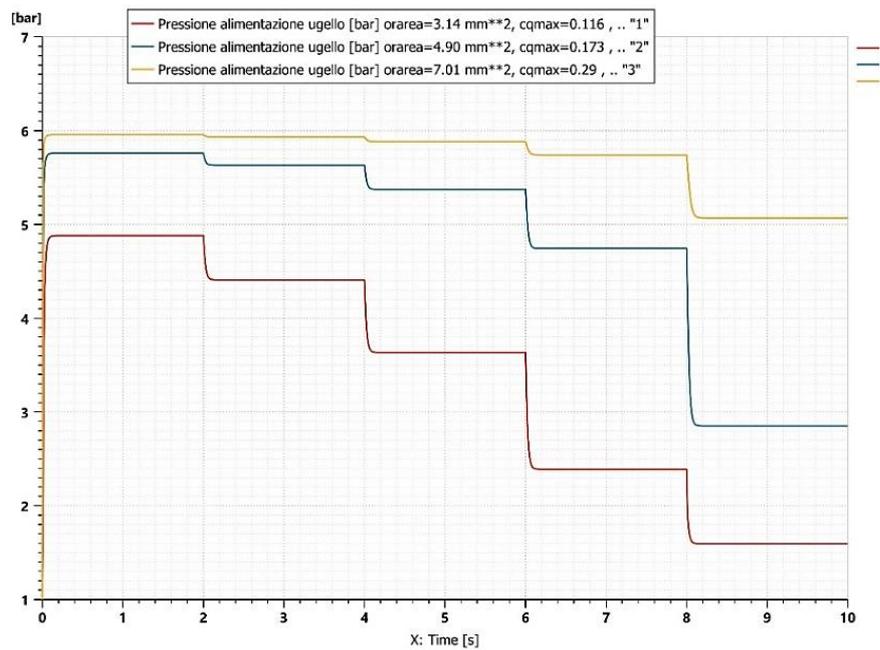


Fig. 145 Pressione di alimentazione dell'ugello al ridursi della sezione della valvola.

### 6.1.5.2 Ugello Teejet TXA8001VK

Con una sezione di uscita di 1,19 mm il TXA8001VK è l'ugello della serie TXA con le dimensioni maggiori fra quelli presi in considerazione. Come nei casi precedenti la valvola "1" viene esclusa a priori dalla scelta in quanto risulta troppo piccola già nell'applicazione nel circuito ad un ugello.

Si può notare in questo caso, essendo passati ad un ugello di taglia superiore, come il campo di regolazione ottenuto con la valvola "2" e "3" venga esteso. In particolare, con questo ugello la valvola di dimensioni maggiori cominci ad essere efficace nella variazione di portata Fig.146.

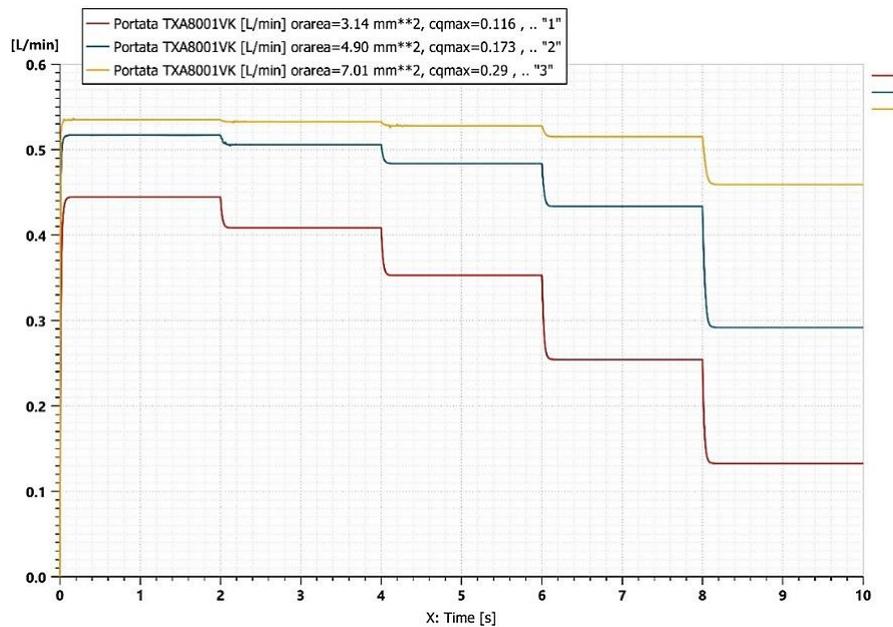


Fig.146 Portata smaltita dall'ugello al ridursi della sezione della valvola.

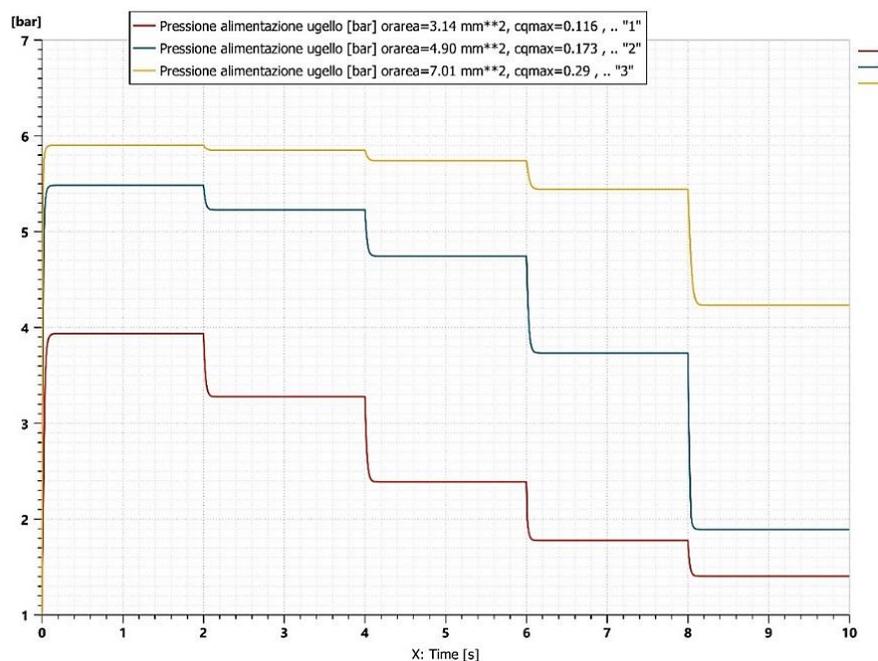


Fig. 147 Pressione di alimentazione dell'ugello al ridursi della sezione della valvola.

Da ciò si può intuire come in un circuito a 4 ugelli, dove le portate cominciano ad essere rilevanti, possa essere applicata quest'ultima o quella di taglia superiore ottenendo così un buon range di regolazione.

### 6.1.6 Valvole di regolazione nel circuito idraulico

Per la scelta finale riguardo alla valvola da applicare per le regolazioni, è stato utilizzato un modello di circuito che si avvicinasse il più possibile a quello del drone Fig.148. In particolare si è adottata una configurazione a 4 ugelli, tubi flessibili e raccordi come nel caso reale.

A differenza delle simulazioni precedenti, dove si usava una sorgente di pressione ideale, si è passati ad una pompa a diaframma. La pompa scelta è la 22 series Seaflo 24V, la quale in condizioni di progetto consente, nel medesimo circuito in cui sono montati i TXA800067VK, di ottenere in assenza di valvola una portata di 1,40 l/min ed una pressione di 5,71 bar.

Le prove vengono effettuate prevalentemente per studiare l'applicazione della regolazione con gli ugelli TXA e AITX. Infatti, non avrebbe senso utilizzare una pompa così prestante ed in grado di arrivare a livelli tali di pressione per poi doverla ridurre, per garantire il funzionamento degli ugelli XR che funzionano al di sotto dei 4 bar.

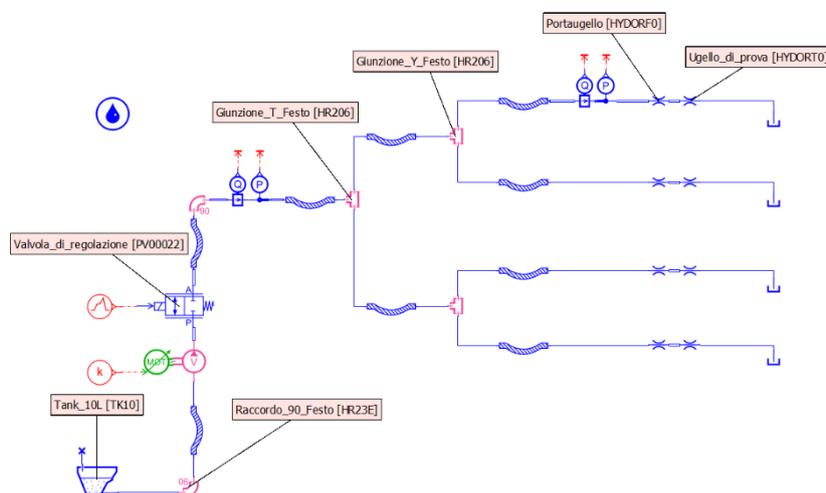


Fig. 148 Circuito utilizzato per i test sulla regolazione tramite valvola proporzionale a due vie.

La pompa durante la simulazione viene controllata da un segnale costante  $k$ , che la fa lavorare ad un regime di rotazione costante, che rappresenta il massimo delle prestazioni raggiungibili. Il tempo scelto per la simulazione è pari a 10s e come nel caso precedente la valvola viene pilotata da un segnale variabile in ingresso che ogni 2 s ne riduce la sezione dal 100% fino al 20%.

Nella prima simulazione sul circuito introdotto, vengono testate le valvole Burkert che sono presenti al capitolo 5.2.6. Tuttavia, questi componenti hanno un peso notevole ed avendo una capacità di carico limitata, rischiano di ridurre notevolmente la quantità di liquido trasportabile, riducendo così il tempo di spruzzatura.

Per questo motivo, sono state prese in considerazione altre valvole con un peso inferiore.

In particolare, avendo considerato vari costruttori, la scelta è ricaduta sulle SMC.

Visto che le sezioni di passaggio interne ed i coefficienti, per il modello SMC di valvola scelto, sono molto simili a quelle precedentemente analizzate, si è deciso di evitare la parte di prove preliminari e passare subito alle simulazioni nel circuito definitivo. Infatti, si sarebbero ottenuti dei risultati molto simili a quelli esposti nel capitolo precedente.

Di seguito vengono riportati i valori ottenuti per i diversi tipi di valvole Burkert e SMC.

### 6.1.6.1 Valvole Burkert

Chiaramente chiudendo la valvola, verranno introdotte più perdite nel circuito e quindi il punto di funzionamento della pompa si sposterà verso pressioni maggiori, che corrisponde ad avere una portata inferiore alla mandata. Ciò è possibile individuarlo nei due grafici Fig. 150 e Fig.152, infatti man mano che la valvola si chiude, la pressione a monte della stessa tende ad avere un andamento crescente, mentre la portata nel circuito ha un andamento decrescente.

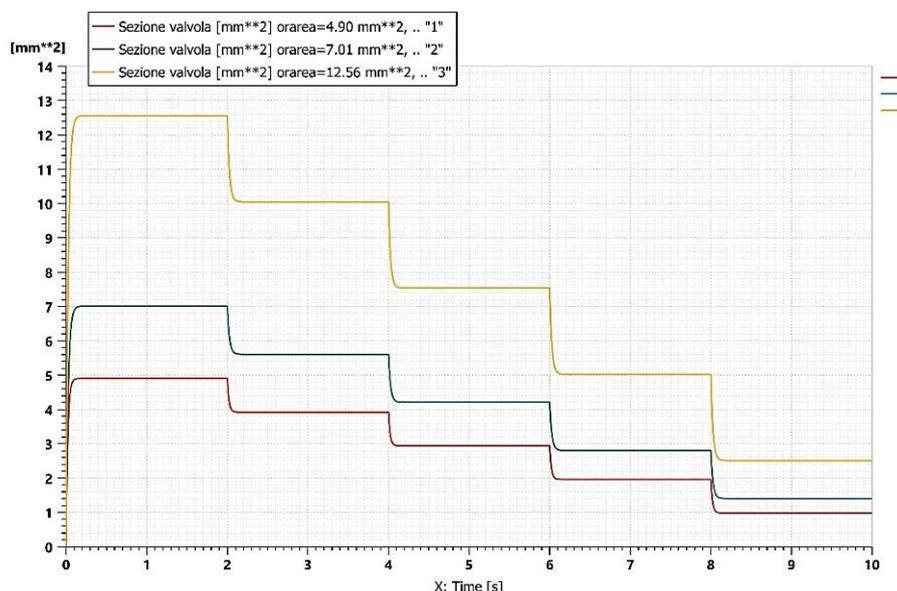


Fig. 149 Riduzione della sezione in funzione del tempo.

Esaminando gli andamenti riguardanti le pressioni e le portate, si nota subito come a causa delle perdite introdotte dalla valvola 1 questa non possa essere impiegata, infatti è sottodimensionata. Ciò lo si può capire dal fatto che già a 0 s, quando la sezione si mantiene ancora al 100%, il

salto di pressione introdotto sia dell'ordine dei 2 bar, che garantiscono in queste condizioni una pressione appena sufficiente per il corretto funzionamento degli ugelli

Analizzando poi i grafici Fig.150-151 per quanto riguarda la scelta fra la valvola "2" e la "3" si nota come la prima introduca una caduta di pressione già a 0 s, quando la valvola è completamente aperta, mentre nella seconda sia quasi nulla. Come si è detto nel capitolo riguardante i componenti, per il corretto funzionamento del circuito, la valvola di regolazione dovrebbe essere il componente del circuito che introduce più perdite e queste dovrebbero essere il 30-50% di quelle totali del circuito. Proprio per questa ragione la valvola 3 non va bene per essere montata nel circuito, in quanto è sovradimensionata. Ciò lo si nota dal fatto che la riduzione di portata che avviene restringendo la sezione si mantiene su valori piccoli fino a 8s dove si ha che la sezione di passaggio è il 20% di  $A_0$ .

Per queste ragioni, la scelta è ricaduta sulla valvola "2", poiché anche se da completamente aperta introduce delle perdite, queste sono ampiamente accettabili e l'applicazione della valvola permette di avere nel circuito una pressione di alimentazione massima degli ugelli di 5,18 bar a cui corrisponde una portata smaltita di 1,34 l/min. Valori che sono perfettamente in linea con quelli cercati.

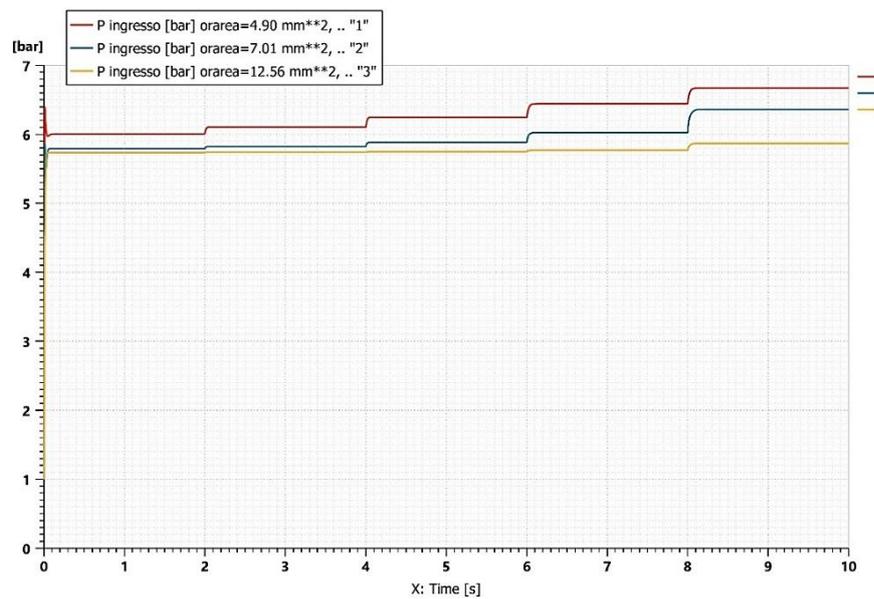


Fig. 150 Pressione di ingresso nelle valvole di regolazione.

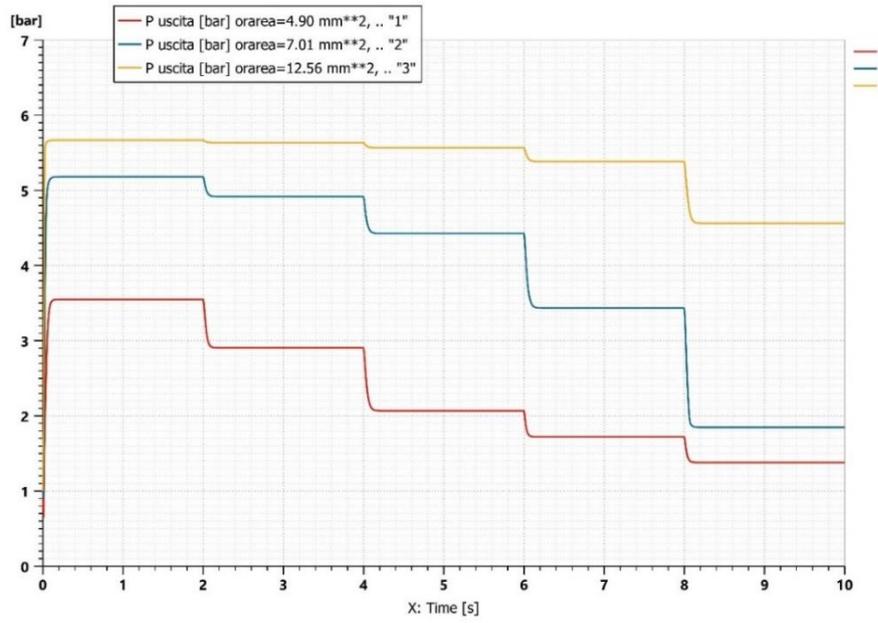


Fig. 151 Pressione di uscita dalle valvole di regolazione.

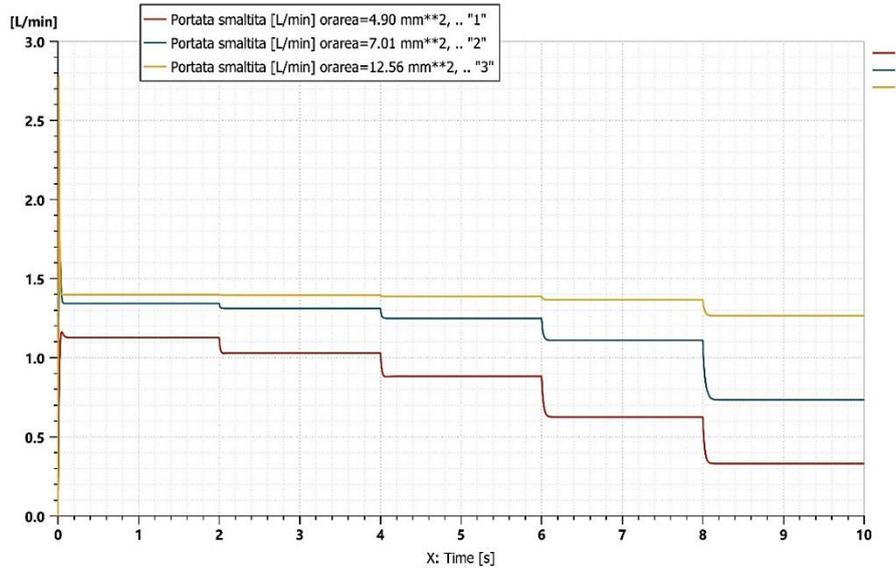


Fig. 152 Portata totale smaltita dal circuito in base alla riduzione della sezione della valvola.

### 6.1.6.2 Valvole SMC

Poiché le valvole precedentemente testate, in particolare quella che permette di regolare in maniera ottimale il circuito, da com'è possibile notare dal capitolo 5.2.6, hanno pesi e dimensioni generose, per cercare di ottimizzare la capacità di liquido trasportabile si è ricercata un'alternativa che consentisse di ridurre il peso e gli ingombri.

Sono quindi state eseguite, utilizzando lo stesso circuito introdotto in precedenza, le stesse simulazioni svolte sulle valvole Burkert per capire quale fosse la taglia della valvola VDW più adatta a regolare in maniera ottimale il circuito.

Gli  $A_0$  e i  $C_v$  corrispondenti ai due diversi diametri dell'orifizio interno della valvola sono rispettivamente:

- $A_1 = 4,30 \text{ mm}^2$   $C_{v1} = 0,18$
- $A_2 = 7,20 \text{ mm}^2$   $C_{v2} = 0,30$

La valvola con  $A_0 = 1,70 \text{ mm}^2$  e  $C_v = 0,07$  è stata esclusa a priori dalle simulazioni, in quanto dai dati raccolti in precedenza sarebbe sicuramente risultata sottodimensionata.

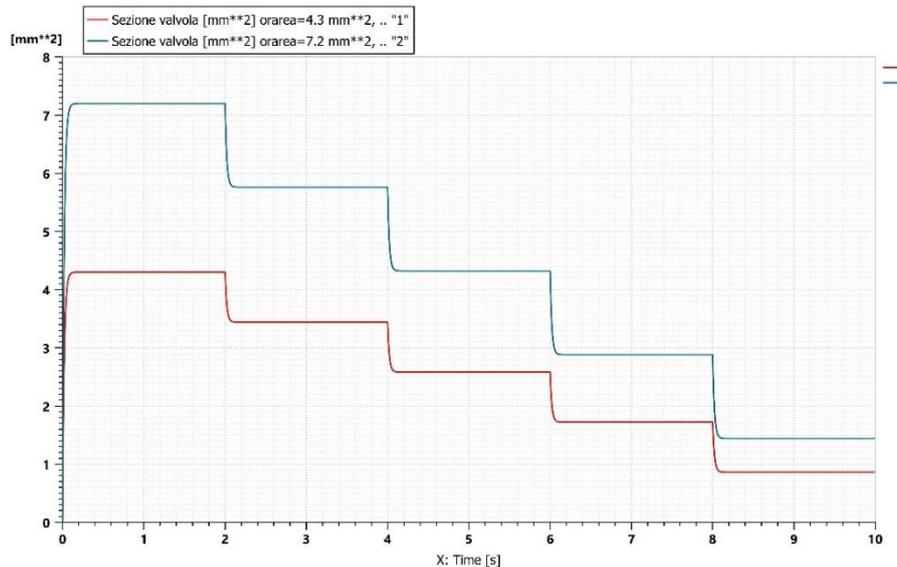


Fig. 153 Riduzione della sezione in funzione del tempo.

Si nota subito, come riducendo la sezione di passaggio, le pressioni a monte della stessa crescono Fig.154. Poiché introducendo più perdite, la caratteristica del circuito diventa più ripida ed il punto di funzionamento della pompa si porta verso sinistra erogando portate inferiori.

In particolare, della pressione di ingresso, si può vedere come la curva riguardante la valvola con sezioni di passaggio più piccole sia più spostata verso l'alto su pressioni maggiori, in quanto

offre maggior resistenza al passaggio del liquido. Ciò è dovuto al fatto che le perdite introdotte da quest'ultima siano superiori a quelle introdotte dalla valvola "2".

Analizzando poi il grafico riguardante la pressione a valle della valvola Fig.155, si nota subito come la caduta di pressione introdotta dalla valvola "1" sia eccessiva già quanto la sezione è al 100%. Infatti, il  $\Delta p = 2,4 \text{ bar}$  porta ad avere una pressione di alimentazione degli ugelli di circa 3,3 bar, che non garantisce il corretto funzionamento degli stessi.

Quindi si esclude l'utilizzo del modello "1" in una possibile applicazione con gli ugelli a cono. Mentre per quanto riguarda il modello "2", a valvola completamente aperta la perdita introdotta sia di circa  $\Delta p = 0,45 \text{ bar}$ . Ciò va bene, poiché rappresenta un valore idoneo ad avere una buona regolazione.

Tuttavia, con l'ugello montato, da come è possibile notare dal grafico Fig.155, la sezione della valvola non può essere ridotta più del 40% di  $A_0$ , in quanto si rischierebbe di finire sotto ai 3,5 bar ed avere ugelli malfunzionanti.

Nel complesso, questo tipo di valvola con l'ugello scelto per le simulazioni si può applicare al circuito volendo regolarlo in questo modo.

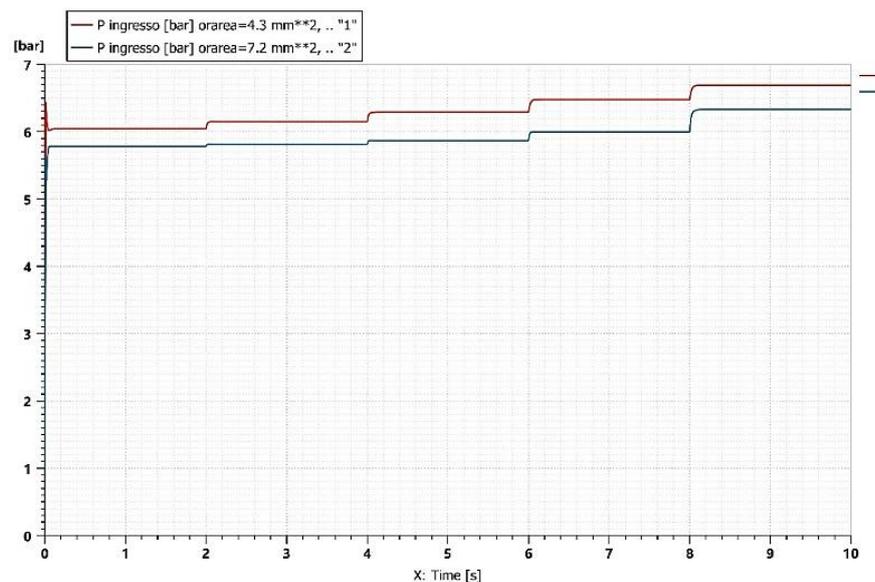


Fig. 154 Pressione di ingresso dalle valvole di regolazione.

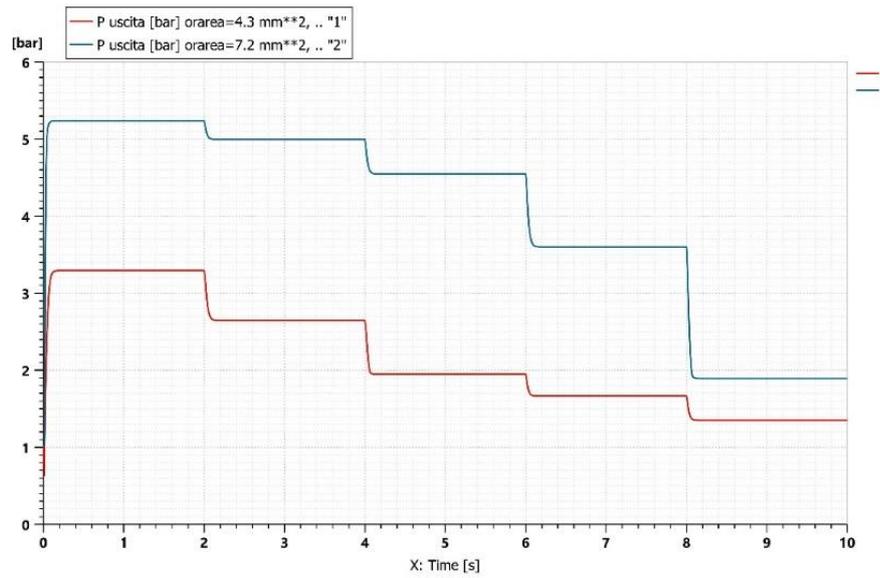


Fig. 155 Pressione di uscita dalle valvole di regolazione.

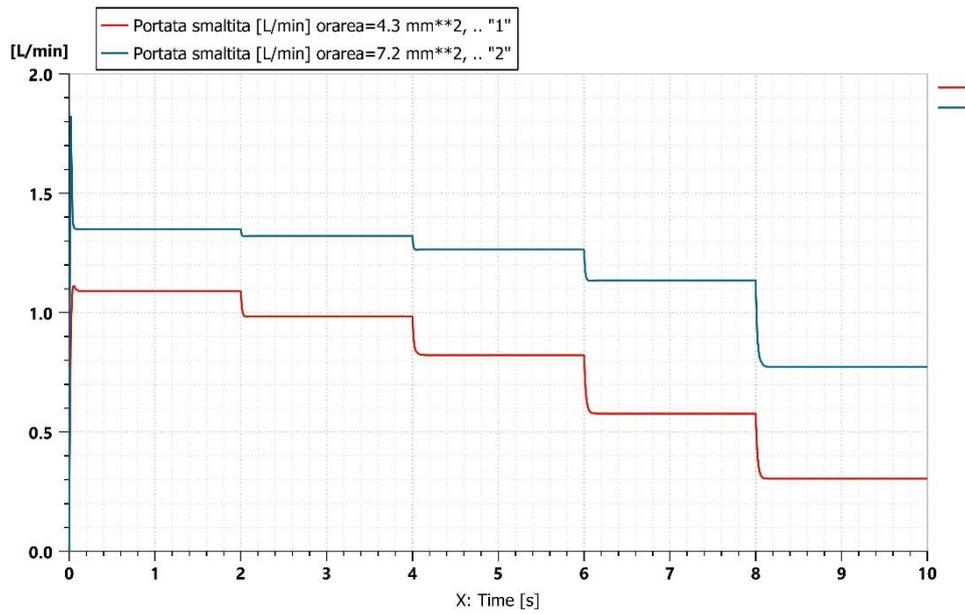


Fig. 156 Portata totale smaltita dal circuito in base alla riduzione della sezione della valvola.

### 6.1.7 Possibile avaria: intasamento di un ugello

Viste le ridotte dimensioni di passaggio interne degli ugelli, una problematica che può verificarsi durante le operazioni di spruzzatura è l'ostruzione degli stessi.

L'ambiente in cui si opera infatti, essendo quello agricolo, è ricco di agenti contaminanti che accidentalmente sia durante le operazioni di miscelazione dei prodotti, che in quelle di riempimento della tanica, possono finire nel liquido ed essere mandate in circolo dalla pompa.

Inoltre, i prodotti stessi che vengono utilizzati per i trattamenti, che possono essere sia liquidi che solidi, vengono disciolti nell'acqua e possono essere causa del problema. Infatti, soprattutto con gli ultimi, in alcuni casi può succedere che alcuni granuli più grossi non vengano sciolti in maniera ottimale e possano così venire aspirati.

Per sopperire a questo problema, sia nella bocca di riempimento della tanica che nel foro di uscita, sono previsti filtri a maglie così come nel corpo dell'ugello.

Periodicamente, per evitare intasamenti che portino alla variazione della portata smaltita dall'ugello, deve essere prevista la manutenzione smontandoli e pulendoli con gli appositi spazzolini e utilizzando getti di aria compressa, facendo comunque attenzione a non danneggiare i componenti interni con oggetti metallici e sostituendo se necessario il filtro interno.

Una volta finito ogni trattamento inoltre, è molto importante la pulizia sia interna che esterna del circuito, in modo da evitare eventuali contaminazioni nei successivi trattamenti e scongiurare la presenza di residui nella tanica e nei vari componenti di circuito che potrebbero solidificarsi e dare origine a ostruzioni e mal funzionamenti.

È quindi necessario capire come si comporta il circuito durante il funzionamento, se in uno degli ugelli dovesse presentare un'ostruzione parziale o totale.

A tal proposito è stato costruito su Amesim, sulla base del circuito precedentemente utilizzato per la valutazione fatta sulle pompe, il seguente modello.

L'ugello in basso a destra è stato sostituito con uno strozzatore pilotabile, la cui geometria interna è stata settata utilizzando i parametri degli altri ugelli presenti nel circuito, in modo da essere uniformata agli altri ugelli TXA800067VK.

Come per gli altri ugelli, il software permette di inserire la caratteristica sperimentale dell'ugello per punti, andando ad interpolare quelli mancanti.

Durante la simulazione, della durata totale di 180 s, viene utilizzata la pompa 22 series Seaflo 24V.

Un segnale variabile nel tempo, ogni 60 secondi riduce la sezione di passaggio dell'ugello su cui viene simulata l'ostruzione, riducendola al 50% dopo i primi 60 s poi serrandolo completamente trascorsi 120 s.

Al modello sono stati inoltre aggiunti i due flussimetri, per controllare la variazione della portata dei due bracci di circuito durante la progressiva ostruzione dell'ugello.

Analizzando il grafico sottostante Fig.158, che confronta la portata di un ugello normale e di quello pilotato, si può notare che nei primi 60 s quando la sezione di passaggio di quest'ultimo è al 100%, la portata sia perfettamente uguale a quella degli altri ugelli nel circuito.

Simulando quindi l'intasamento ed andando a ridurre la sezione, la portata nell'ugello esaminato diminuisce, mentre aumenta gradualmente quella degli altri ugelli.

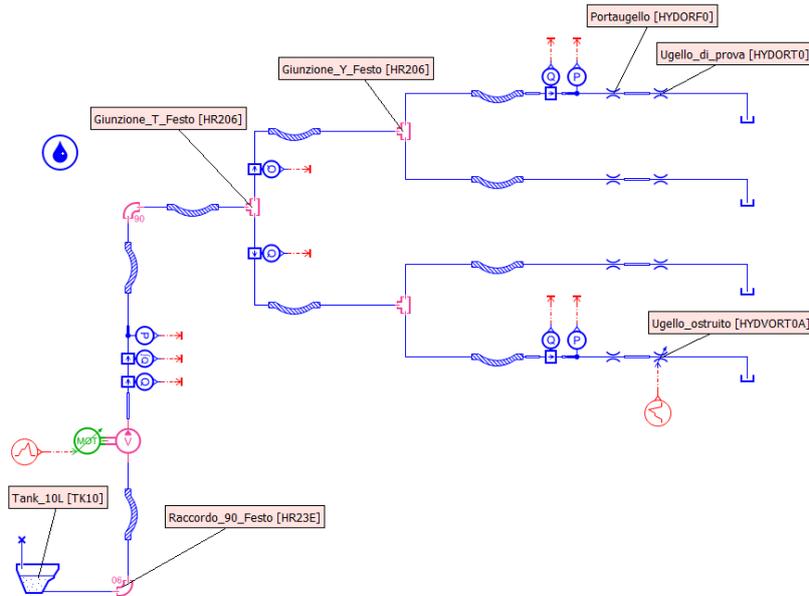


Fig. 157 Circuito utilizzato per la simulazione dell'avaria su un ugello.

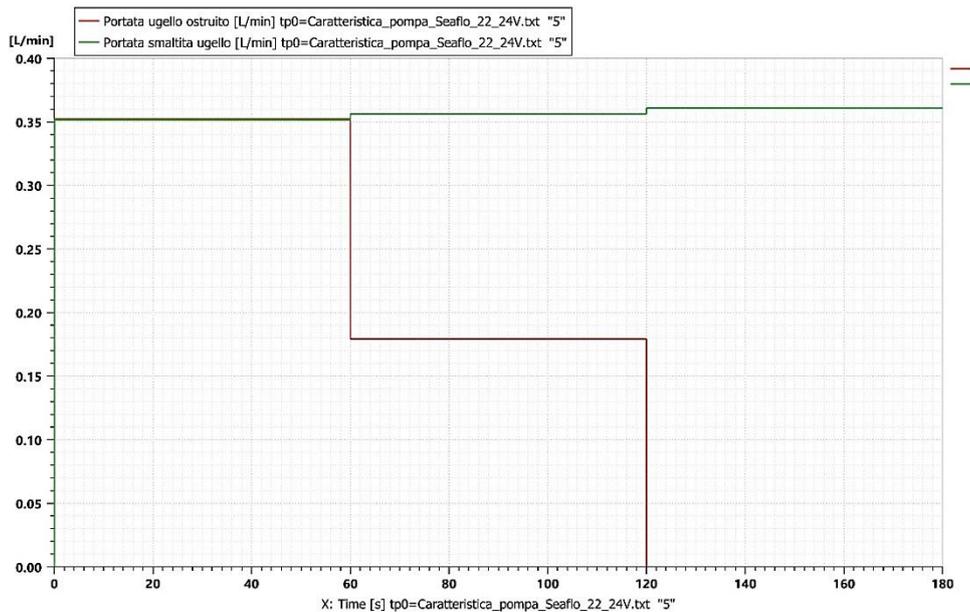


Fig. 158 Confronto fra la portata smaltita dall'ugello ostruito ed uno completamente funzionante.

Questo è dovuto al fatto che la pendenza della caratteristica del circuito varia, in quanto le perdite introdotte dall'ostruzione aumenteranno e quindi l'intersezione fra la caratteristica interna della pompa e quella del circuito si troverà in un punto diverso dai precedenti. Infatti, da com'è possibile notare nel grafico sottostante Fig.159, dovendo mandare meno portata il punto di funzionamento si sposterà verso pressioni maggiori che permettono quindi agli ugelli di far passare più liquido.

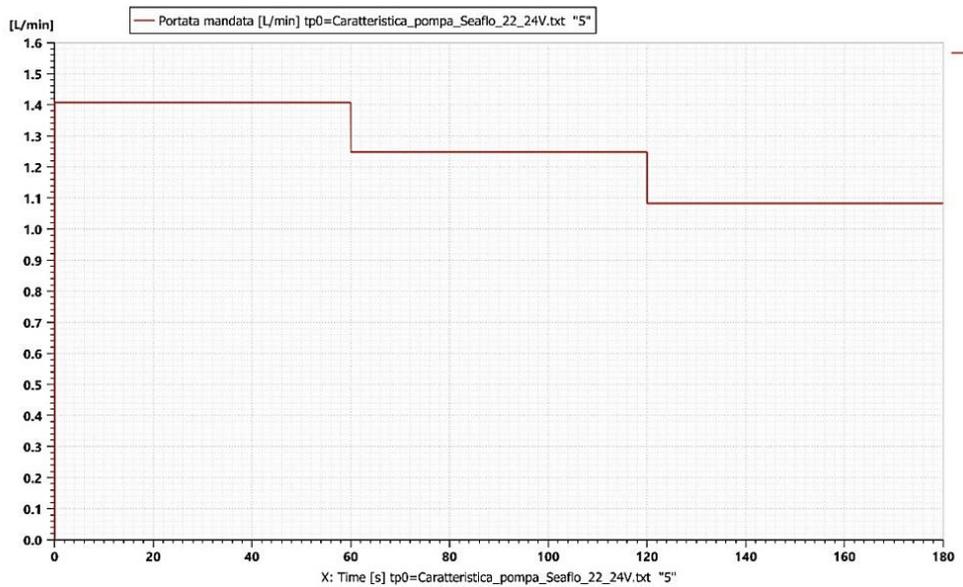


Fig. 159 Riduzione della portata mandata dalla pompa dovuta all'intasamento.

Si passa infatti da una pressione di 5,7 bar in progetto, ad una pressione di 6 bar quando l'ugello è completamente tappato, il che comporta un incremento della portata smaltita negli altri ugelli, che passa da un valore di 0,35 l/min a 0,36 l/min.

È importante, durante la spruzzatura avere la possibilità di avere un feedback dal sistema di controllo su possibili intasamenti sia parziali che totali. Infatti, il pilota dovendo manovrare il drone che può trovarsi a grandi distanze, non può preoccuparsi di verificare se tutti gli ugelli stiano spruzzando correttamente. Il sistema più semplice da adottare è quello di porre un flussimetro per ogni braccio del circuito, il quale istante per istante raccoglie l'informazione sulla portata che in quel momento sta transitando. Confrontando infatti i segnali provenienti dai due flussimetri si può capire se il circuito stia funzionando correttamente o si stiano verificando delle avarie.

Analizzando quindi il grafico sottostante Fig.161, si può notare come nei primi 60 secondi, dove non si verificano malfunzionamenti, la portata a meno di variazioni infinitesime che possono verificarsi durante il funzionamento si mantiene costante. Andando avanti con la simulazione, si può notare come i valori misurati siano man mano sempre più distanti.

Analizzando i segnali analogici provenienti dai due flussimetri è quindi possibile generare un segnale di allarme che avvisi l'utente riguardo ad un possibile malfunzionamento. È inoltre da tenere in considerazione il fatto di prevedere un certo intervallo di tolleranza che non faccia intervenire subito il sistema di allarme, in quanto durante la spruzzatura possono verificarsi delle piccole variazioni di portata che genererebbero false avarie.

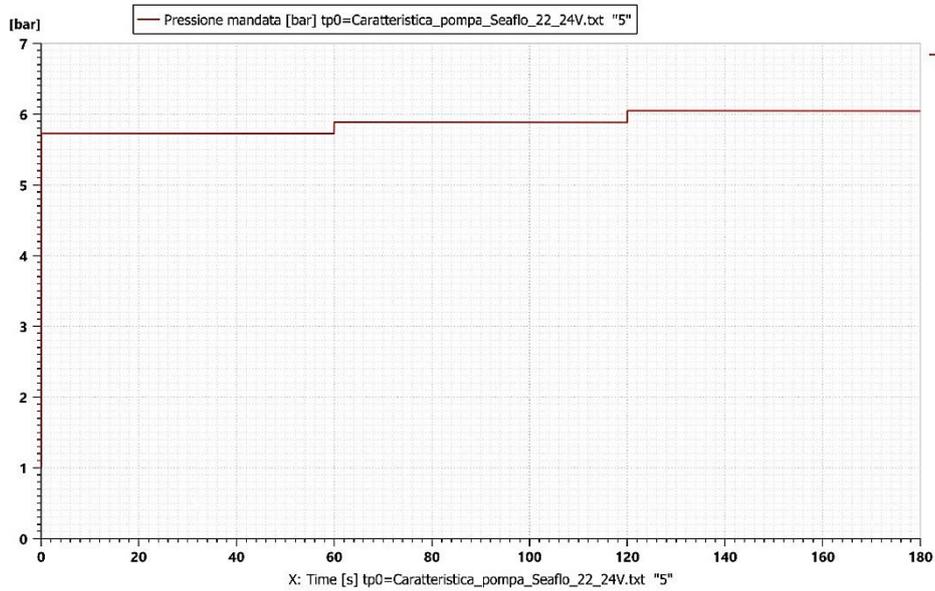


Fig. 160 Aumento della pressione di mandata dovuto all'intasamento.

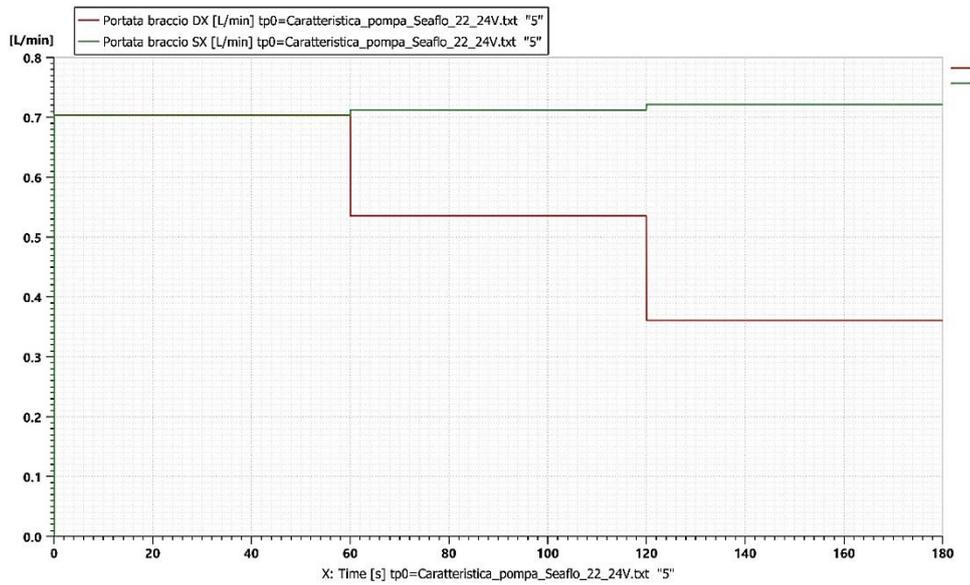


Fig. 161 Confronto fra le portate smaltite dai due bracci del circuito.

## 6.1.8 Controllore PID

La maggior parte dei controlli industriali utilizzano un controllo di tipo PID, vista la semplicità della legge di controllo che utilizza pochi parametri di taratura ed all'esistenza di metodi empirici che permettono di scegliere i parametri per un controllo ottimale.

I tre termini di regolazione sono:

- Proporzionale
- Integrativo
- Derivativo

La variazione dell'uscita del controllo viene effettuata attraverso i tre termini:

- Il primo è proporzionale all'errore fra il parametro di riferimento  $r(t)$  e la variabile da controllare.
- Il secondo è proporzionale all'integrale dell'errore  $e(t)$  e quindi tiene conto del valore medio dell'errore valutando come si evolve nel tempo.
- Il terzo è invece proporzionale alla derivata dell'errore  $e(t)$  e tiene conto quindi della velocità con cui l'errore stesso varia.

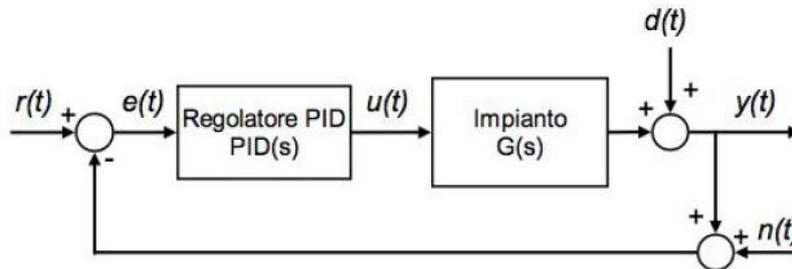


Fig. 162 Schema a blocchi di un controllore PID. [38]

L'uscita ideale nel dominio del tempo è esprimibile nella forma [36]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Dove  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  sono rispettivamente il guadagno proporzionale, integrativo e derivativo.

Con un controllo solo proporzionale, più sarà grande l'errore e maggiore sarà l'azione di controllo svolta dal regolatore. Tuttavia, non si riesce ad azzerare l'errore ottenendo quindi una discrepanza fra il valore richiesto dal riferimento e quello realmente ottenuto. La quale può essere ridotta aumentando il guadagno, che però può portare a instabilità.

Il solo controllo proporzionale è utilizzato principalmente in sistemi semplici, asintoticamente stabili.

Aggiungendo la parte integrale, questa fa sì che a regime la variabile che si vuole controllare assuma il valore di set-point, garantendo al sistema una maggior velocità di risposta. Tuttavia aumentando troppo il guadagno integrativo si rischia di avere instabilità.

C'è poi la parte derivativa, per la quale i sistemi vengono detti anche controllori di velocità o anticipatori, che però non sempre è necessaria in quanto molto spesso ci si limita a controlli P o PI. Essa aumenta la stabilità del ciclo, diminuendo la durata del transitorio.

Nel controllo, dovendosi scontrare con la realtà, bisogna prestare attenzione a quello che viene definito *wind-up dell'integratore*. Infatti, nella maggior parte delle applicazioni, la variabile di controllo è limitata sia superiormente che inferiormente, ovvero presenta saturazione.

Se il sistema è ben progettato si va a lavorare distanti dai limiti, diversamente per variazioni rilevanti del set-point si può andare incontro a saturazione.

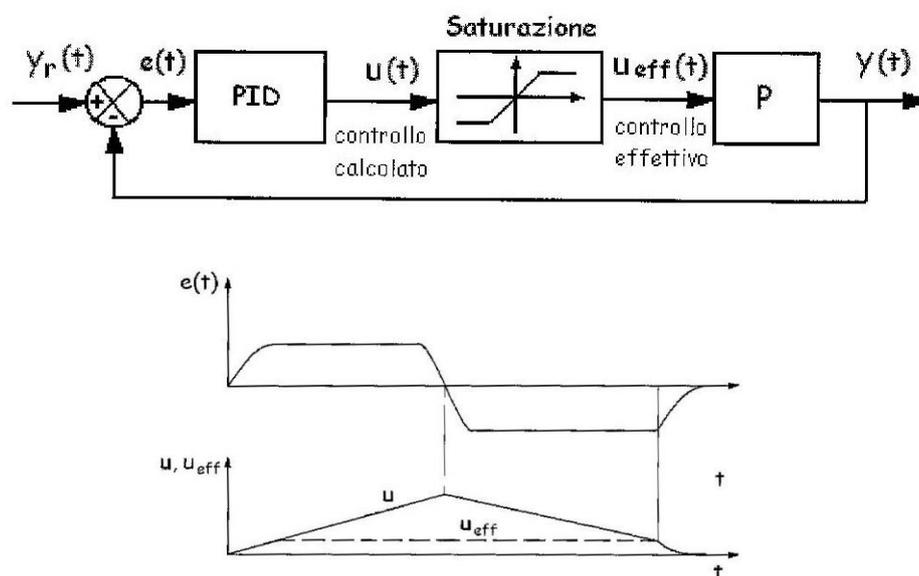


Fig. 163 Schema a blocchi del fenomeno del wind-up ed andamento nel tempo del controllo calcolato ed effettivo. [36]

Da come è possibile notare dalla figura Fig.163, in presenza di errore positivo, la parte integrativa aumenta nel tempo fino al punto in cui, se l'errore non si annulla o diventa negativo, la variabile di controllo  $u_{eff}$  satura e rimane costante. A questo punto il sistema si comporta come se fosse un sistema ad *anello aperto*, infatti ad una variazione dell'uscita  $y(t)$  misurata non corrisponde una variazione del controllo  $u_{eff}$ .

Il drone durante le sue operazioni, dovendo sorvolare un vigneto composto da filari, dovrà assumere un moto vario, in quanto la sua velocità varia nel tempo poichè sono presenti momenti in cui il velivolo accelera, decelera e avanza a velocità costante.

Inoltre, a seconda del trattamento e del prodotto che si sta spruzzando, dovrà adattare il quantitativo di liquido spruzzato nell'unità di tempo, per riuscire a spargere la quantità stabilita su unità di superficie che in agricoltura viene rappresentata con l'ettaro.

In funzione di questo è necessario avere un sistema che possa regolare la portata mandata dalla pompa istante per istante, adattando così la quantità di liquido spruzzato alle varie condizioni operative.

In particolare, serve un sistema ad anello chiuso che permetta di avere un controllo efficiente della portata.

Le soluzioni adottabili sono molteplici, la migliore pensando al risparmio di peso, potrebbe essere quella di agire sulla pompa regolandone il regime di rotazione, infatti la Seaflo scelta, è regolabile come dichiarato dal produttore tramite il PWM. Tuttavia, i dati forniti dal costruttore non sono sufficienti per poter improntare una soluzione di questo genere. Quindi non avendo a disposizione fisicamente la pompa, è stata scelta un'altra strada.

Per verificarne la fattibilità, è stata quindi intrapresa la strada della regolazione tramite una valvola a 2 vie con solenoide pilotata in PWM.

Si è pensato quindi ad un sistema in retroazione in cui la valvola viene controllata tramite un controllore PID, che riceve le informazioni sulla variazione della variabile controllata tramite il flussimetro Sea YF-S401.

È stato quindi creato su Amesim il modello corrispondente al circuito controllato tarando manualmente i parametri del controllore.

In particolare, si è iniziato con un controllo semplicemente *proporzionale* e per tentativi si è andati a trovare una  $k_p$  che portasse ad un risultato soddisfacente. Si è poi introdotta la parte *integrativa*.

Il circuito, da come si può notare dalla foto, è il circuito a 4 ugelli utilizzato nelle altre simulazioni, a cui è stato aggiunto il sistema di controllo PID che agisce intervenendo sulla valvola di controllo confrontando il dato di set-point con quello della portata reale che viene misurata dal flussimetro montato a monte della valvola.

È stato inoltre lasciato l'ugello su cui può essere simulata l'ostruzione per poter fare delle prove una volta settato il controllore PID, in modo da poter studiare la reazione del circuito all'avaria.

Le simulazioni sono state effettuate per le due valvole selezionate in precedenza.

Si tratta comunque di uno studio preliminare che permette di avere un ordine di grandezza dei parametri in gioco, infatti per il settaggio del sistema vero e proprio dovranno essere fatte delle prove sperimentali in laboratorio per la caratterizzazione dei vari componenti e del circuito completo.

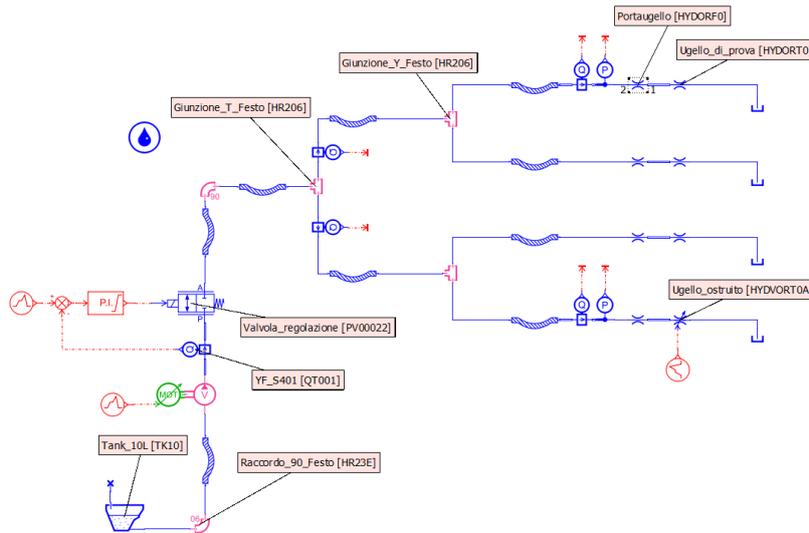


Fig. 164 Circuito utilizzato per la simulazione del controllo PID sulla valvola proporzionale.

### 6.1.8.1 Controllore PID Valvola Burkert

Per quanto riguarda la valvola, per la simulazione sono stati settati i parametri interni dati dal costruttore.

In particolare, dalle simulazioni precedentemente effettuate, la taglia scelta è quella caratterizzata da:

- $A_0 = 7,01 \text{ mm}^2$
- $C_v = 0,290$

Come da catalogo, è stata impostata la corrente nominale a 750 mA ed il tempo di attuazione a 25 ms.

A valvola completamente aperta, viste le perdite introdotte dalla stessa, in progetto la pompa Seaflo 24V è in grado di alimentare il circuito fornendo agli ugelli una pressione di 5,18 bar ed una portata complessiva smaltita di 1,34 l/min.

Per il settaggio preliminare del PID, si è impostato il tempo di simulazione a 150s, quindi si è partiti con un set-point di 1,2 l/min andando ad incrementare il  $k_p$  fino a raggiungere un valore abbastanza prossimo a quello voluto senza eccedere con il valore della costante in quanto incrementandola troppo si potrebbe andare incontro ad un'instabilità del sistema.

Partendo quindi con una  $k_p = 100$  si ottiene un andamento della portata misurata dal flussimetro che è rappresentato nel grafico Fig.165.

Si nota come con un guadagno proporzionale così basso, a regime, la portata ottenuta si attesta su un valore di molto inferiore rispetto a quello voluto, infatti la portata effettiva è di poco superiore a 0,4 l/min.

È quindi necessario incrementare il guadagno proporzionale, fino ad avvicinarsi il più possibile ad 1,2 l/min.

Andando avanti con prove successive, si è visto che un valore soddisfacente di  $k_p$  può essere 5000, che permette di avere una portata di poco superiore a 1,1 l/min. È stato scelto questo valore, in quanto incrementandolo ancora, l'effetto che si ha sulla portata diventa man mano ininfluente spostandosi verso valori più elevati, andando tuttavia incontro a possibili instabilità.

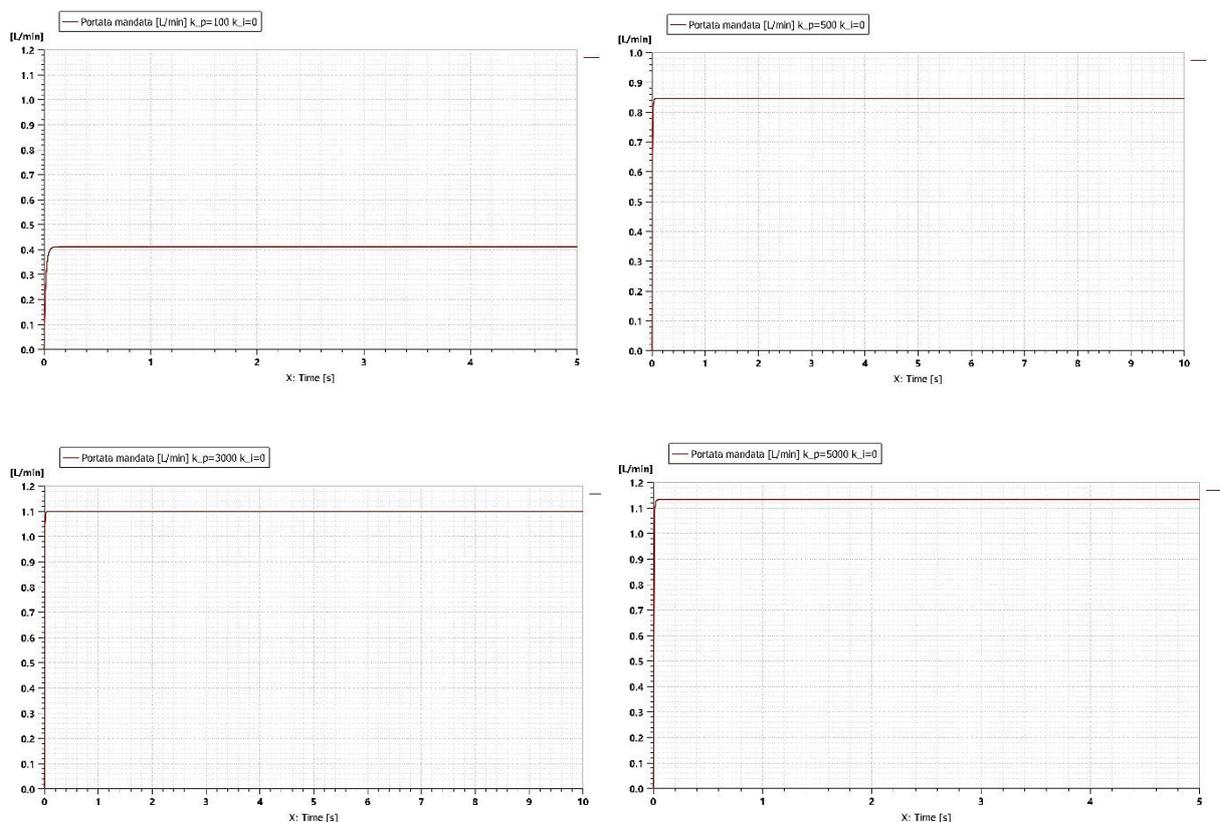


Fig. 165 Valori di portate raggiunti per valori di  $k_p$ : 100, 500, 3000, 5000.

Dopo aver trovato un valore soddisfacente della  $k_p$ , poiché a regime il sistema con la sola parte proporzionale non raggiunge il *set-point*, si è andati a lavorare sul valore della  $k_i$ .

Quindi partendo da  $k_i = 100$ , si è incrementato il suo valore fino a quando il tempo impiegato dal sistema per raggiungere il *set-point* soddisfacesse i requisiti richiesti dall'applicazione.

Dai grafici sottostanti Fig.166, si nota subito come nel primo caso, quando il guadagno integrativo si attesta su un valore molto basso, il tempo impiegato dal sistema per raggiungere il valore

prefissato di 1,2 l/min sia addirittura superiore ai 150 s della simulazione. Quindi è stato aumentato il valore fino ad arrivare a 3000, che permette da come è possibile vedere dal grafico Fig.166, un transitorio abbastanza veloce: infatti in circa 4 s viene raggiunto il *set-point*. Si può concludere quindi che con questo tipo di valvola, un  $k_p = 5000$  ed un  $k_i = 3000$  possano essere dei dati di partenza soddisfacenti per un'eventuale attività sperimentale.

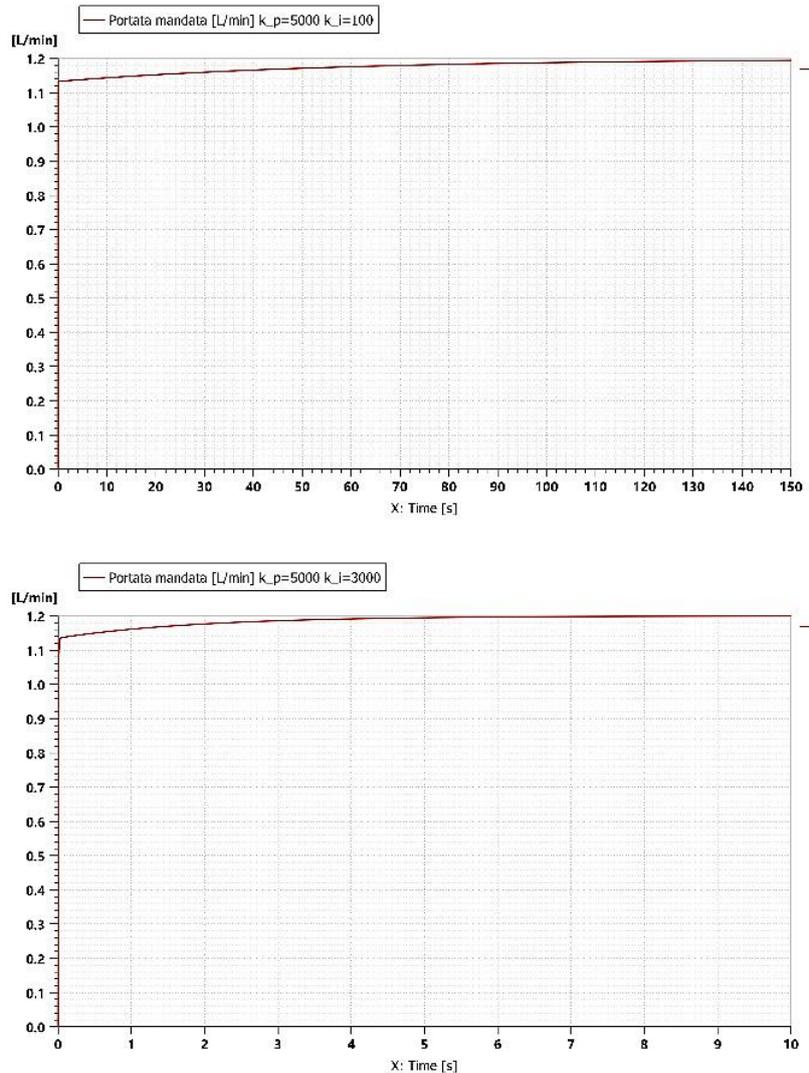


Fig. 166 Andamento della portata per valori di  $k_i$ : 100, 3000.

Infine, una volta settati i parametri, si è impostata una simulazione per capire come il controllore reagisse alle varie perturbazioni che si possono verificare durante le fasi operative della spruzzatura.

È stata quindi condotta una simulazione della durata di 30 s dove per i primi 10 s il *set-point* è stato impostato su 1,1 l/min, mentre per i successivi 20 s il valore scende a 1 l/min.

Volendo rendere poi più realistico il caso, a 20 s la sezione dell'ugello utilizzato per simulare le avarie, viene ridotta dal 100% al 20%.

Dal grafico sottostante Fig.167 si può notare come il grafico raggiunga il primo valore del set-point in circa 4 s, per poi adattarsi molto più rapidamente al secondo valore del set-point in quanto il tempo impiegato a ridurre la portata da 1,1 l/min a 1 l/min è di circa 2 s.

Per quanto riguarda l'avaria dell'ugello si può notare come a 20s, quando la sezione dell'ugello viene ridotta, si verifichi una perturbazione. Tuttavia, estinto il transitorio, il sistema si riporta abbastanza velocemente al valore di portata prestabilita.

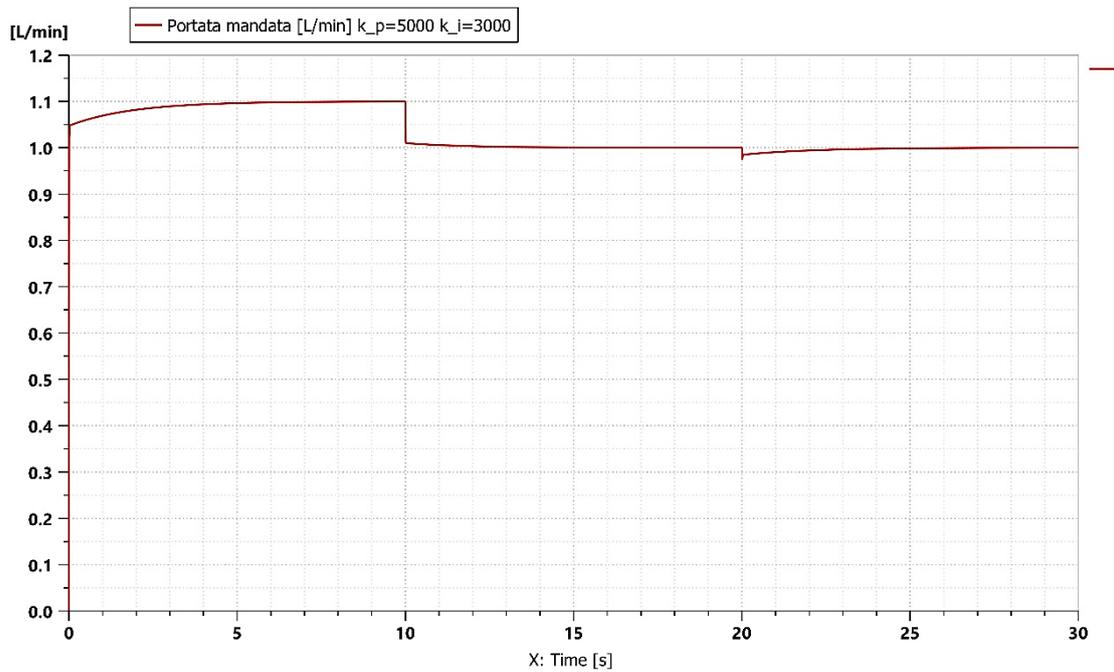


Fig. 167 Comportamento del sistema ad un cambio del set-point e successiva avaria dell'ugello.

### 6.1.8.2 Controllore PID valvola SMC

Per i problemi di peso della valvola Burkert, è stata scelta una valvola duale su cui sono state replicate le simulazioni fatte con la precedente.

Dalle simulazioni fatte sulle possibili taglie della valvola VDW è emerso che quella più adatta alla regolazione del circuito è caratterizzata da:

- $A_0 = 7,2 \text{ mm}^2$
- $C_v = 0,3$

Per quanto riguarda la corrente nominale, è stata settata a 125 mA. Mentre per il tempo di risposta, non essendo fornito a catalogo dal costruttore, è stato scelto per la simulazione un tempo di 20 ms riferendosi alle valvole Burkert.

Chiaramente l'assunzione di questo dato porterà inevitabilmente ad una variabilità dei risultati finali. Tuttavia, come detto in precedenza, queste simulazioni rappresentano solo uno studio preliminare.

Nella costruzione del circuito vero e proprio, per il settaggio del controllore, andranno fatte delle caratterizzazioni dei componenti in laboratorio e varie prove sul circuito definitivo.

La pompa Seaflo 24V, quando la sezione di passaggio della valvola è al 100% è in grado di garantire una pressione di alimentazione del circuito di 5,24 bar ed una portata di 1,35 l/min.

Come nel caso precedente per il settaggio del controllore *PID*, si è partiti da un  $k_p = 100$ , incrementandolo fino ad arrestarsi ad un valore per cui incrementandolo ulteriormente, gli effetti sulla portata fossero trascurabili.

Rispetto al caso precedente, il guadagno proporzionale si attesta su valori più bassi. Infatti Fig.168, già per  $k_p = 100$ , la portata raggiunta dal sistema è di 0,85 l/min contro i 0,4 l/min raggiunti con la valvola Burkert.

Con prove successive si è incrementato il  $k_p$ , inizialmente fino ad un valore di 600 che rappresenta un buon compromesso fra l'avvicinamento al *set-point* e la stabilità del sistema.

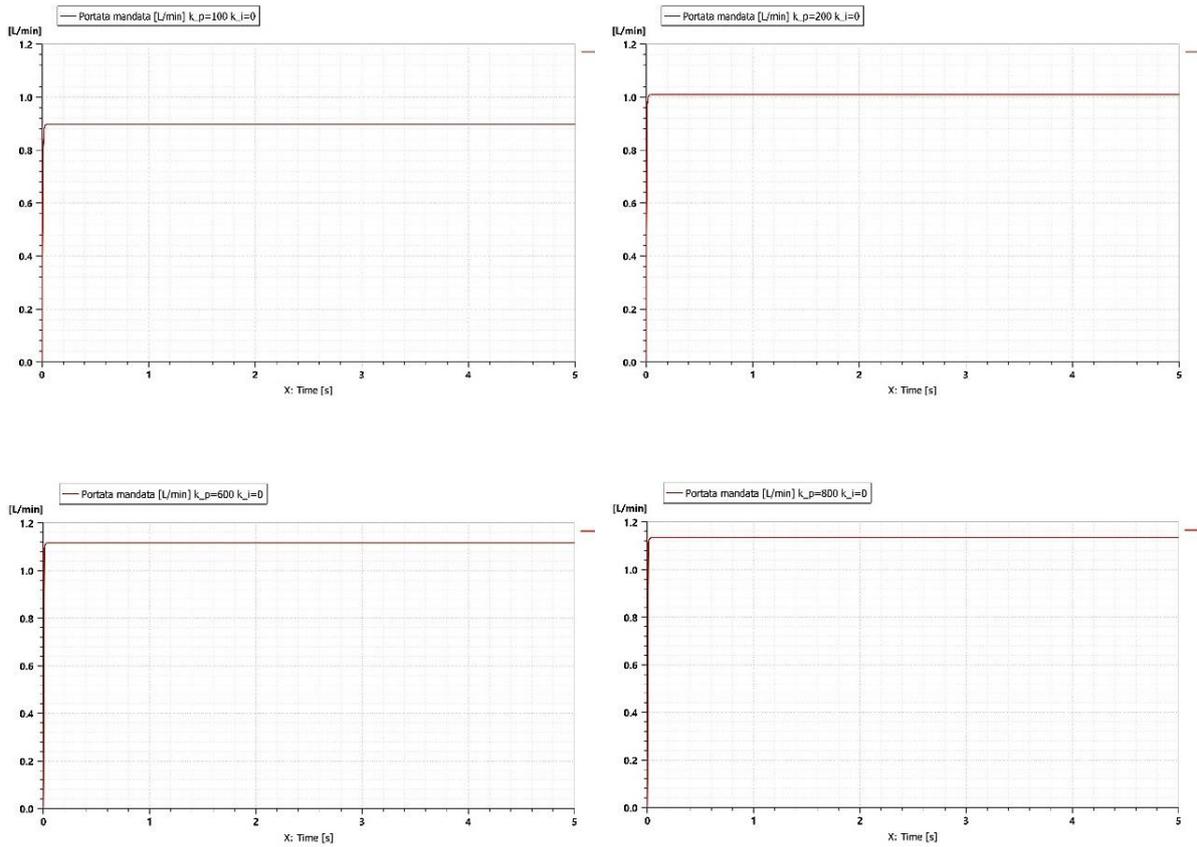


Fig. 168 Valori di portate raggiunti per valori di  $k_p$ : 100, 200, 600, 800.

Si è poi passati ad incrementare la parte integrativa, partendo anche in questo caso da un  $k_i = 100$ , per poi fermarsi una volta ottenuto un risultato soddisfacente nella regolazione. In questo primo caso, da come è possibile notare dal grafico, il sistema raggiunge il valore prefissato in circa 20s.

Andando quindi ad incrementare il guadagno integrativo fino ad un valore di 400 si ottiene un tempo leggermente superiore ai 4 s che può essere ridotto impostando un  $k_p = 800$  e un  $k_i = 600$ .

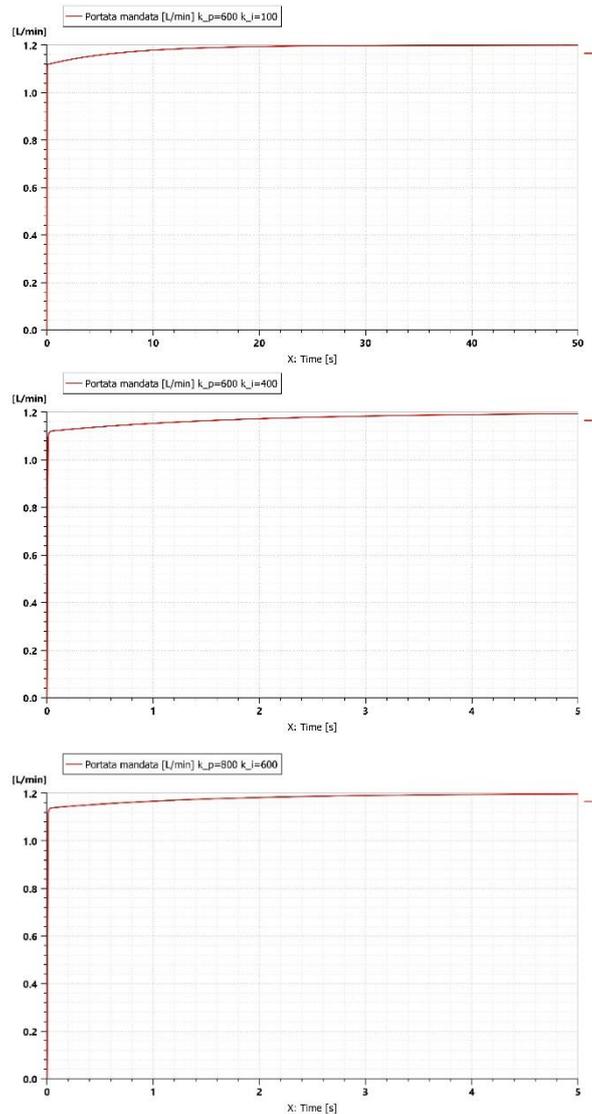


Fig. 169 Andamento della portata per valori di  $k_i$ : 100, 400, 600.

Osservando i grafici Fig.169 e confrontandoli con quelli della valvola Burkert, si nota subito come pur essendo molto simili le due valvole, trattandosi dello stesso circuito ci siano sostanziali differenze fra i parametri del PID.

Nel caso reale quindi, si deve accettare il fatto che i componenti probabilmente si discosteranno in maniera più o meno marcata dalle caratteristiche dichiarate dal costruttore, quindi per arrivare ad una buona regolazione che porti a risultati soddisfacenti, si dovranno effettuare varie prove in laboratorio fino ad arrivare al setting ottimale.

Per quanto riguarda la simulazione riguardante le fasi operative di spruzzatura Fig. 170, l'unica differenza riscontrabile con il circuito e la simulazione effettuata precedentemente è quella dei parametri che caratterizzano la valvola.

Si può notare come il grafico sia essenzialmente uguale a quello generato nella simulazione utilizzando la valvola Burkert. Le uniche differenze che si possono riscontrare sono quelle legate ai tempi dei transitori.

Infatti, in questo secondo caso, il tempo impiegato per raggiungere il primo set-point si accorcia leggermente raggiungendo 1,1 l/min in circa 3 s, mentre per gli altri due le differenze di tempo non sono sostanziali.

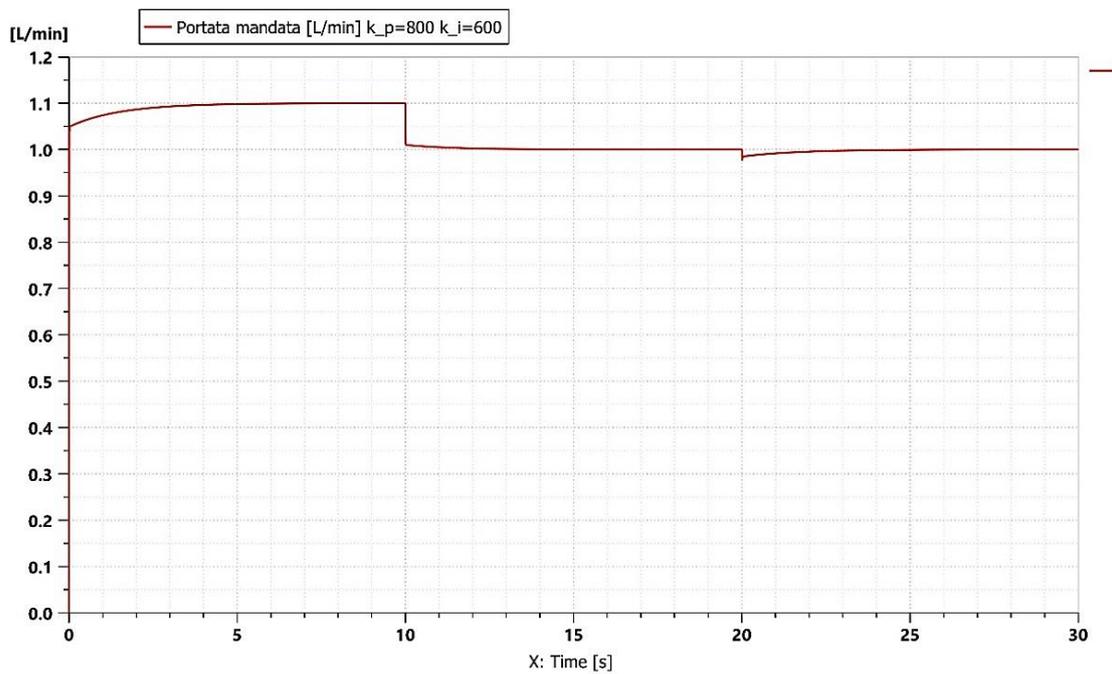


Fig. 170 Comportamento del sistema ad un cambio del set-point e successiva avaria dell'ugello.

## 6.1.9 Regolazione a pressione costante

Da come è possibile notare dal capitolo 3.2, la grandezza del droplet formato dagli ugelli è funzione della pressione di alimentazione degli stessi.

La grandezza delle goccioline è uno dei parametri fondamentali che influenza l'efficacia del processo di spruzzatura, infatti per evitare fenomeni come il *drift* o il *rebouncing* delle goccioline sulle foglie è necessario individuare la corretta dimensione del droplet, a seconda dei vari parametri operativi.

Detto ciò, avendo individuato la corretta dimensione e quindi la pressione di alimentazione dell'ugello, si potrebbe pensare ad una regolazione in cui introducendo nel circuito un'opportuna valvola si possa mantenere costante la pressione a monte degli ugelli.

Per fare ciò è possibile utilizzare una valvola riduttrice di pressione pilotata Fig. 171.

La particolarità della valvola pilotata è che a

differenza di un normale riduttore di pressione, la pressione che si viene ad instaurare a valle della valvola, non è influenzata né dalla portata smaltita né dalla pressione a monte della stessa.

Una riduttrice di pressione pilotata è essenzialmente composta dal corpo principale, dove è presente un otturatore che è collegato tramite lo stello alla membrana, dal circuito di by-pass e dal riduttore pilota che è semplicemente un riduttore di pressione ad azionamento diretto che agisce sul circuito di by-pass grazie al quale è possibile impostare la  $P_{SET}$ .

Agendo sul riduttore pilota è possibile regolare la valvola, infatti il corpo principale svolge solo la funzione di moltiplicatore.

Il funzionamento si basa sul fatto che nella parte superiore della membrana agisca quella definita come pressione di controllo  $P_c$  che è quella a monte del riduttore pilota. Mentre nella parte inferiore della membrana agisce la  $P_{valle}$ . Quindi l'apertura o la chiusura dell'otturatore è decisa dalla differenza fra queste due pressioni.

Quando la pressione a valle della valvola principale aumenta, l'otturatore del riduttore pilota si chiude riducendo la portata che passa nel circuito di by-pass facendo quindi aumentare la  $P_c$  che va ad agire sulla membrana dall'alto. Quando invece la pressione a valle diminuisce si avrà il comportamento opposto e l'otturatore della valvola principale, sarà spinto verso l'alto.

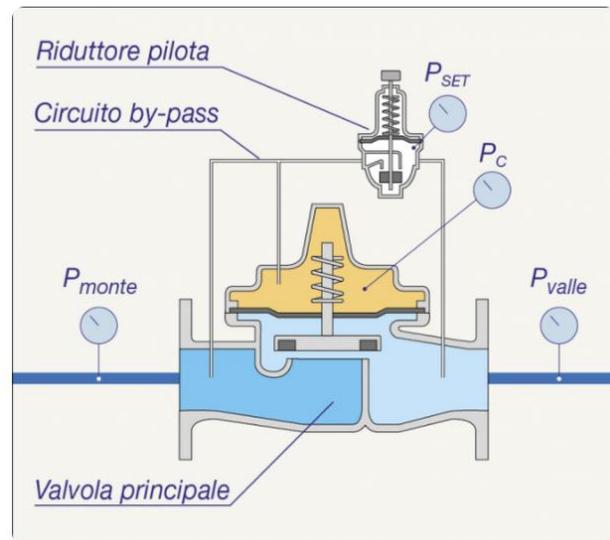


Fig. 171 Valvola riduttrice di pressione pilotata. [37]

L'applicazione di questa valvola, dato come spunto per il futuro, come nel caso precedente delle valvole a due vie va studiata attentamente in quanto un componente di questo tipo potrebbe avere un peso eccessivo.

Inoltre, un altro punto da analizzare è il fatto che le pompe selezionate che si trovano in commercio, dovendo sottostare ai limiti di peso, non riescano a garantire pressioni che vanno oltre i 6 bar. Proprio per questo, analizzando le tabelle degli ugelli fornite dai costruttori e riguardanti le dimensioni del droplet, per una data pressione si nota come nell'intervallo che le pompe equipaggiabili su un drone riescono a garantire, la dimensione delle goccioline non venga influenzata così pesantemente dalla variazione di pressione.

Quindi a meno che non venga applicata al circuito una pompa in grado di raggiungere pressioni di almeno il doppio di quelle garantite dalle attuali pompe in commercio, si andrebbe ad introdurre un componente dal peso non trascurabile, la cui utilità sarebbe comunque limitata.

Un possibile circuito per verificarne il funzionamento potrebbe essere quello a quattro ugelli utilizzato per le precedenti simulazioni ed opportunamente modificato. Viene riportato nella Fig.172 un possibile circuito utilizzabile nelle simulazioni, dove nella regolazione a pressione costante, la valvola a due vie viene sostituita con la riduttrice di pressione pilotata.

In particolare, anche in questo caso potrebbe essere interessante andare a studiare come la pompa cambi il suo punto di funzionamento a seconda della pressione impostata tramite la valvola riduttrice e come si adatti il sistema ad un'eventuale ostruzione di uno degli ugelli.

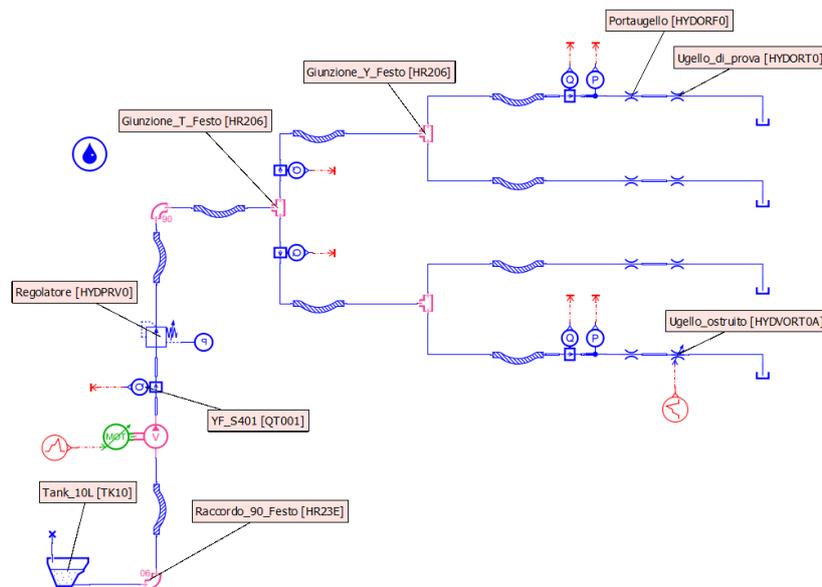


Fig. 172 Possibile circuito per la simulazione della regolazione a pressione costante.

## CONCLUSIONI

---

Dallo studio effettuato è emerso che a causa dei limiti dimensionali a cui devono sottostare i droni attualmente in commercio, l'utilizzo di un velivolo di piccole dimensioni per l'applicazione di fitofarmaci va valutato attentamente. Infatti, rappresenta una tecnologia relativamente giovane, che ha bisogno di un ulteriore sviluppo per poter competere nei diversi ambiti con i metodi tradizionali di irrorazione. Potrebbe rappresentare una svolta però, soprattutto in quegli appezzamenti difficili o impossibili da raggiungere con un normale trattore.

Grazie allo studio effettuato sugli ugelli e sul droplet è emerso che nell'utilizzo di un drone agricolo per la spruzzatura, i parametri che interessano maggiormente la deposizione del liquido sulle piante sono:

- Le dimensioni del droplet: in quanto se si scende al di sotto di una certa dimensione, il fenomeno della deriva si manifesta in maniera importante.
- L'altezza di volo: poiché più questa si attesta su valori elevati e maggiore sarà il percorso che il droplet deve percorrere prima di raggiungere l'obiettivo, aumentando la possibilità di mancarlo.
- La velocità di volo: a seconda della velocità di avanzamento si assiste ad una variazione nel fenomeno del *downwash* in quanto i vortici formati dalle pale nella zona sottostante al drone si modificano variando quindi l'interferenza sulla nube di liquido dispersa.

Sul primo parametro si potrebbe agire scegliendo opportunamente il modello dell'ugello, anche se tuttavia, visti i limiti sulla capacità di liquido trasportabile, si riscontrano delle problematiche nel trovare in commercio degli ugelli che soddisfino i tre requisiti di: dimensione delle goccioline, pressione di alimentazione e portata smaltita.

La maggior parte dei droni commerciali che vengono utilizzati per i trattamenti delle colture in campo utilizza degli ugelli a ventaglio, i quali hanno la capacità di generare gocce di buone dimensioni funzionando con basse pressioni. Tuttavia, visto che in campo viticolo vengono utilizzati preferibilmente quelli a cono, si è valutata anche la possibile applicazione di questi ultimi nel circuito sviluppato.

Gli ugelli a cono semplici e ad induzione però, anche se più indicati ad essere utilizzati nei trattamenti della vite, presentano degli svantaggi nell'utilizzo con un drone. Infatti, necessitano di pressioni più elevate per funzionare, che costringono all'utilizzo di pompe più prestanti e quindi pesanti. Per quanto riguarda invece le dimensioni delle gocce, a parità di portata smaltita, generano particelle leggermente più fini di quelli a ventaglio.

Volendo spostarsi su gocce di dimensioni maggiori, con gli ugelli a cono, si rischierebbe di ridurre drasticamente l'autonomia garantita nel processo di spruzzatura da una tanica da 10 l. Quindi, volendo impiegare questo tipo di ugelli in maniera favorevole, si dovrebbe puntare su droni di dimensioni maggiori compatibilmente con la normativa che regola il volo.

Passando poi alle possibili regolazioni applicabili al circuito per l'irrorazione, l'applicazione di una valvola pilotata risulta essere un sistema sfavorevole rispetto alla regolazione diretta sulla pompa, in quanto si ottengono gli stessi risultati incrementando però il peso dell'attrezzatura.

Considerati i limiti dei droni attualmente presenti sul mercato, alcune aziende si stanno muovendo per proporre sul droni di dimensioni notevolmente maggiori. Un esempio è il Volodrone, nato dalla collaborazione di John Deere e Volocopter, che però può essere considerato un vero e proprio velivolo con tutte le limitazioni connesse. Basti pensare che il diametro complessivo misura 9,2 m, una massa di 800 kg e può portare carichi fino a 200 kg. Per quanto riguarda le potenzialità di trattamento: è dotato di un'autonomia di 30 minuti e viene dichiarato che possa trattare fino a 6 ettari per ora.

Un altro esempio di drone agricolo è quello di Airboard adatto alla spruzzatura in vigneto. Anche questo ha dimensioni generose, infatti è dotato di 10 ugelli ed ha una capacità di carico di 60 l.

Concludendo, si può dire che per poter sostituire le macchine tradizionali con i trattamenti eseguiti tramite UAV c'è ancora molto lavoro da fare, poiché sia dal punto di vista legislativo che per quanto riguarda la tecnologia presente attualmente sul mercato si presentano notevoli svantaggi e limitazioni.

# APPENDICE A

## A.1 Caratteristica di funzionamento dell'ugello

Per riuscire ad importare la caratteristica dell'ugello tramite file di testo, si deve seguire la procedura seguente.

Dopo aver progettato il circuito su cui si vogliono effettuare le simulazioni nella sezione *SKETCH*, si deve passare alla sezione *SUBMODEL* dove deve essere scelto l'opportuno sottomodello del componente fra quelli proposti dal software.

In particolare, selezionando il componente *ugello* e cliccando come in Fig.173 su *Set submodel* si aprirà la lista dei vari sottomodelli presenti.

Quello utilizzato per le simulazioni degli ugelli nel circuito per la spruzzatura è il *HYDORT0*. In cui è possibile inserire la caratteristica dell'ugello tramite punti attraverso un file di testo, dove la portata  $q$  è espressa in funzione del salto di pressione  $dp$ .

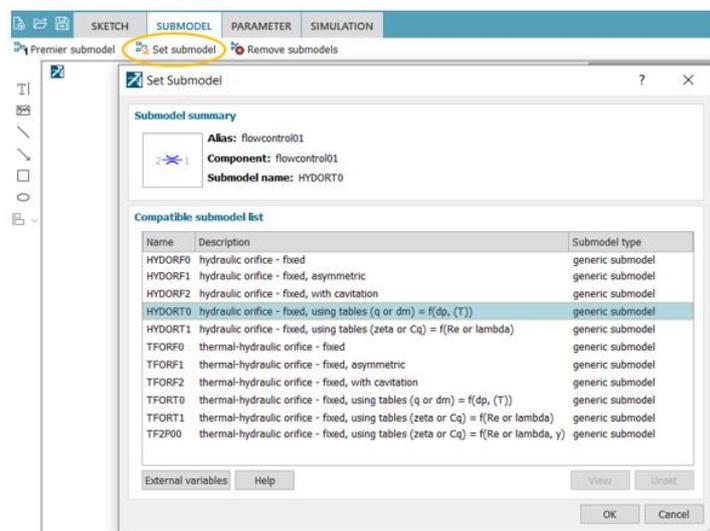


Fig. 173 Particolare del menù *Set submodel*. [44]

Dopo aver selezionato i sottomodelli opportuni per i vari componenti del circuito, è possibile passare al settaggio vero e proprio dei parametri nella sezione *PARAMETER*.

Selezionando l'ugello nel circuito, nella parte destra della schermata apparirà il seguente menù Fig.174 da cui è possibile settare diversi parametri, fra cui: portata volumica o massica, il tipo di interpolazione che può essere lineare o cubica e scegliere il percorso in cui è collocato il file di testo da cui il programma prenderà i

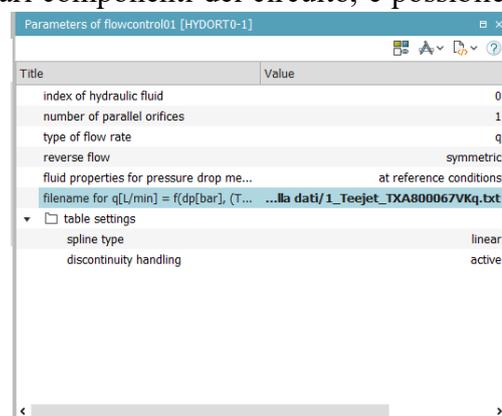


Fig. 174 Particolare del menù *Parameters*. [44]

dati riguardanti la caratteristica dell'ugello nelle simulazioni.

Per quanto riguarda il file di testo Fig.175, deve essere in formato .txt e affinché il programma riesca ad interpretare correttamente i dati inseriti e non dia errori di lettura deve seguire un'opportuna formattazione.

Nel caso degli ugelli, nella prima riga deve essere espresso il formato di tabella utilizzato che è l' 1D, il quale permette di esprimere i punti della curva tramite una successione di coppie (x,y).

Nella seconda e terza riga vengono espresse le unità di misura della portata e pressione, che nel caso degli ugelli sono L/min e bar.

Ed infine in successione si trova il salto di pressione e la corrispondente portata smaltita dei vari punti costituenti la caratteristica dell'ugello studiato.

```
# Table format: 1D
# Table_unit: L/min
# axis1_unit: bar

0 0
1 0.218
2 0.262
3 0.299
4 0.331
5 0.360
6 0.386
7 0.410
8 0.433
9 0.450
10 0.474
```

Fig. 175 Formattazione del file di testo.

## A.2 Caratteristica di funzionamento della pompa

Per riuscire ad importare la caratteristica interna della pompa tramite file di testo, si deve seguire la procedura seguente.

Dopo aver progettato il circuito su cui si vogliono effettuare le simulazioni nella sezione *SKETCH*, si deve passare alla sezione *SUBMODEL* dove deve essere scelto l'opportuno sottomodello del componente fra quelli proposti dal software.

In particolare, selezionando il componente *pompa* e cliccando come in Fig.176 su *Set submodel* si aprirà la lista dei vari sottomodelli presenti.

Quello utilizzato per le simulazioni del circuito per la spruzzatura è HRPUI. In cui è possibile inserire la caratteristica della pompa tramite punti attraverso un file di testo, dove la portata  $qv$  è espressa in funzione del salto di pressione  $dp$  e del regime di rotazione della pompa stessa  $w$ .

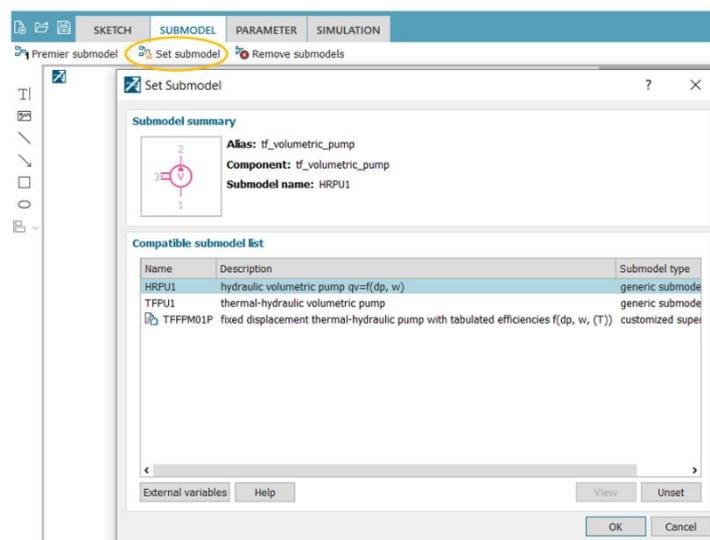


Fig. 176 Particolare del menù *Set Submodel*. [44]

Dopo aver selezionato i sottomodelli opportuni per i vari componenti del circuito, è possibile passare al settaggio vero e proprio dei parametri nella sezione *PARAMETER*.

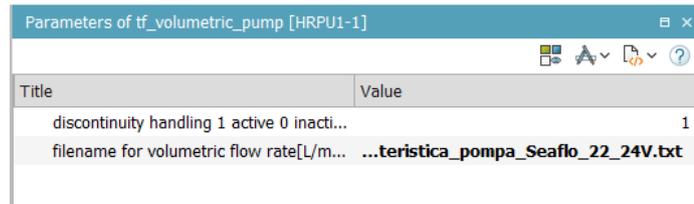


Fig. 177 Particolare del menù *Parameters*. [44]

Selezionando la pompa nel circuito, nella parte destra della schermata apparirà il seguente menù Fig.177 da cui è possibile settare il percorso in cui è collocato il file di testo da cui il programma prenderà i dati riguardanti la caratteristica della pompa nelle simulazioni.

Per quanto riguarda il file di testo Fig.178, deve essere in formato .txt e affinché il programma riesca ad interpretare correttamente i dati inseriti e non dia errori di lettura deve seguire un opportuna formattazione.

Nel caso della pompa nella prima riga deve essere specificato il tipo di tabella, che in questo caso è T1D. Nelle righe seguenti devono essere specificati l'unità di misura della portata che è in L/min, l'unità di misura della pressione che è il bar e quella riguardante il regime di rotazione espresso in rev/min.

Infine, vengono inserite le caratteristiche della pompa per punti a diversi regimi di rotazione. Nella quinta riga 3000 rappresenta il regime di rotazione, mentre l'11 è riferito al numero di punti che compongono la caratteristica interna della pompa.

```
#Table format: T1D
#table_unit = L/min
#axis1_unit = bar
#axis2_unit = rev/min

3000 11
0      4.84
0.69  4.4
1.38  4
2.07  3.8
2.72  3.4
3.45  3.2
4.21  3
4.83  2.2
5.52  1.6
6.21  0.9
6.9   0

2800 11
0.00  4.52
0.60  4.11
1.20  3.73
```

Fig. 178 Formattazione del file di testo.

Nella prima colonna viene inserito il  $dp$ , mentre nella seconda la portata  $qv$ .

Il programma necessita di almeno due curve per funzionare correttamente, quindi oltre a quella a 3000 rev/min con la similitudine fluidodinamica è stata calcolata anche quella a 2800 rev/min.

# BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

---

- [1] <https://blog.analistgroup.com/fotosintesi-clorofilliana-indice-ndvi-agricoltura/>
- [2] <https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-agrofarmaci-difesa/droni-prodotti-fitosanitari/>
- [3] <https://qds.it/uso-dei-droni-in-agricoltura-tra-novita-e-questioni-aperte/>
- [4] <https://dblue.it/blog/drones-european-rules-easa/>
- [5] <https://www.uplitalia.com/newsite/product-list.cfm?codice=13>
- [6] Veneto Agricoltura-Gestione dei prodotti fitosanitari-Le fasi operative nella gestione dei PF
- [7] <https://spray-imaging.com/spray-description.html>
- [8] Antonio Cavaliere-Lezioni di combustione
- [9] Atomization and Sprays-Arthur H. Lefebvre Vincent G. McDonell- 2nd Edition
- [10] Engineering Principles of Agricultural Machines - Ajit K. Srivastava - 2nd Edition
- [11] Luca Lattanzi- Analisi fluidodinamica di un nebulizzatore per applicazioni sanitarie
- [12] Marco Persico - Studio e progetto di un banco prova per irrorazione di pesticidi in vigneto tramite droni
- [13] Programma di sviluppo rurale -Approfondimento N. 02 del 25 maggio 2018- Componenti delle macchine irroratrici: gli ugelli.
- [14] Catalogo Teejet- <https://www.teejet.com/it>
- [15] ASABE S572.1 Droplet Size Classification
- [16] Handbook of Agricultural Engineering Volume III- American Society of Agricultural Engineers
- [17] Effect of Droplet Size Parameters on Droplet Deposition and Drift of Aerial Spraying by Using Plant Protection UAV- Shengde Chen, Yubin Lan , Zhiyan Zhou, Fan Ouyang, Guobin Wang, Xiaoyu Huang, Xiaoling Deng, and Shengnan Cheng.
- [18] CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover- Qiwei Guo, Yaozong Zhu, Yu Tang, Chaojun Hou, Yong He, Jiajun Zhuang, Youliang Zheng, Shaoming Luo.
- [19] Numerical analysis and validation of spray distributions disturbed by quadrotor drone wake at different flight speeds- Sheng Wen, Jie Hanb, Zhihua Ning, Yubin Lan, Xuanchun Yin, Jiantao Zhang, Yufeng Ge.
- [20] <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2019/12/02/ugelli-antideriva-cosa-sono-e-come-funzionano-spiegato-bene/64845>
- [21] Misure dirette per la mitigazione della deriva- CRPV (Centro Ricerche Produzioni Vegetali).

- [22] Mitigazione dell'inquinamento diffuso nei trattamenti fitosanitari- Paolo Balsari- DiSAFA-Unito.
- [23] Application analysis of hydraulic nozzle and rotary atomization sprayer on plant protection UAV- Jiaqin Gong, Wenqing Fan, Jin Peng.
- [24] Design and Development of a Drone for Spraying Pesticides, Fertilizers and Disinfectants
- [25] <https://it.aliexpress.com/item/4001034243114.html>
- [26] Catalogo Festo - [https://www.festo.com/cms/it\\_it/index.htm](https://www.festo.com/cms/it_it/index.htm)
- [27] <https://www.aliexpress.com/i/32821407355.html>
- [28] <https://www.robotics.org.za/YF-S401>
- [29] Evaluation of Spray Characteristics of Pesticide Injection System in Agricultural Drones- Seung-Hwa Yu, Young-Keun Kim, Hyeon-Jong Jun, Il Su Choi, Jea-Keun Woo, Young-Hwa Kim, Young-Tae Yun, Yong Choi, Reza Alidoost, Jeekeun Lee.
- [30] <https://renlight.com.br/wp-content/uploads/2019/06/BOMBA-SOLAR-SINGFLO-LINHA-FL-40-DATASHEET-RENLIGHT-ENERGY.pdf>
- [31] [https://it.aliexpress.com/item/4000507231447.html?spm=a2g0o.search0302.0.0.64317071uGkjLd&algo\\_pvid=78f46ae1-fb8c-4557-bdb6-bbf01086ae32&algo\\_expid=78f46ae1-fb8c-4557-bdb6-bbf01086ae32-0&btsid=2100bdd816136008370177472ebc73&ws\\_ab\\_test=searchweb0\\_0,searchweb201602\\_,searchweb201603\\_](https://it.aliexpress.com/item/4000507231447.html?spm=a2g0o.search0302.0.0.64317071uGkjLd&algo_pvid=78f46ae1-fb8c-4557-bdb6-bbf01086ae32&algo_expid=78f46ae1-fb8c-4557-bdb6-bbf01086ae32-0&btsid=2100bdd816136008370177472ebc73&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_)
- [32] <https://it.aliexpress.com/item/32916481736.html>
- [33] [www.seaflo.com](http://www.seaflo.com)
- [34] <https://www.burkert.it/it>
- [35] <https://www.smc.eu/it-it>
- [36] Automazione dei sistemi meccanici – Vladimir Viktorov, Federico Colombo
- [37] <https://idraulica.caleffi.com/articolo/riduttori-di-pressione-pilotati>
- [38] [http://www.unife.it/ing/lm.meccanica/insegnamenti/dinamica-controllo-diagnostica-di-sistemi-b/materiale-didattico/Controllori\\_PID.pdf](http://www.unife.it/ing/lm.meccanica/insegnamenti/dinamica-controllo-diagnostica-di-sistemi-b/materiale-didattico/Controllori_PID.pdf)
- [39] [https://www.venetoagricoltura.org/wp-content/uploads/2019/10/Distribuzione-agrofarmaci\\_Mochetti.pdf](https://www.venetoagricoltura.org/wp-content/uploads/2019/10/Distribuzione-agrofarmaci_Mochetti.pdf)
- [40] <https://www.volocopter.com/en/volodrone/>
- [41] <https://www.airboard.co/agriculture-drone>
- [42] Effect of Nozzle Orientation on Droplet Size and Droplet Velocity from Vineyard Sprays - Ariane Vallet, Cyril Tinet, Jean-Paul Douzals
- [43] <https://www.futurefarming.com/>
- [44] Simcenter Amesim- Siemens Digital Industries Software

## RINGRAZIAMENTI

---

Vorrei iniziare con il ringraziare Marcello Travenzoli per essere stato sempre molto disponibile durante le conversazioni avute, Fabrizio Lebole per le informazioni fornitemi ed Eugenio Pastoris per avermi accompagnato durante i rilievi nei suoi vigneti.

Ringrazio poi tutti i miei relatori, che malgrado le difficoltà dovute alla pandemia, sono sempre stati precisi e puntuali nel fornirmi chiarimenti e nel rispondere alle mie richieste.

Ed infine ringrazio la mia famiglia, i miei compagni ed amici che in questi anni mi hanno sempre supportato e condiviso le mie scelte.

È stato un percorso a tratti tortuoso, soprattutto nell'ultimo anno. Nonostante le difficoltà, giunto alla fine, sono ancora fermamente convinto e felice di aver intrapreso questo corso di studi.